



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
République Algérienne Démocratique et Populaire  
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي  
Ministère de l'Enseignement Supérieure et de la Recherche Scientifique

جامعة وهران 2 محمد بن أحمد

Université d'Oran 2 Mohamed Ben Ahmed

معهد الصيانة والأمن الصناعي

Institut de Maintenance et de Sécurité Industrielle

Département de Maintenance en Electromécanique

## MÉMOIRE

Pour l'obtention du diplôme de Master

Filière : Electromécanique

Spécialité : Electromécanique

## Thème

# Analyse par éléments finis des joints soudés

Présenté et soutenu publiquement par :

**BELARBI Ismail & BOUSBAA Nour Elislam**

Devant le jury composé de :

Nom et Prénom	Grade	Etablissement	Qualité
SENHADJI Salima	MCB	Université d'Oran 2	Président
YAHIAOUI Reda	MCA	Université d'Oran 2	Encadreur
BOUHAFS Mohamed	MCB	Université d'Oran 2	Examineur

Année 2021-2022

# *Dédicaces*

*Je tiens C'est avec grande plaisir que je dédié ce modeste travail :*

*A l'être le plus cher de ma vie, ma mère,*

*A celui qui m'a fait de moi un homme, mon père*

*A mon frère et ma petite sœur*

*A mon cousin hichem et mon ami Ayoub*

*A tous mes amis de promotion de 2<sup>ème</sup> année master Electromécanique*

*Toute personne qui occupe une place dans mon cœur*

*A tous les membres de ma famille et toute personne qui porte le nom*

*BELARBI, je dédie ce travail à tous ceux qui ont participé à ma réussite*



*Belarbi Ismail*

# *Dédicaces*

*Je dédie ce travail a mes très chers parents , source de vie , d'amour et d'affection*

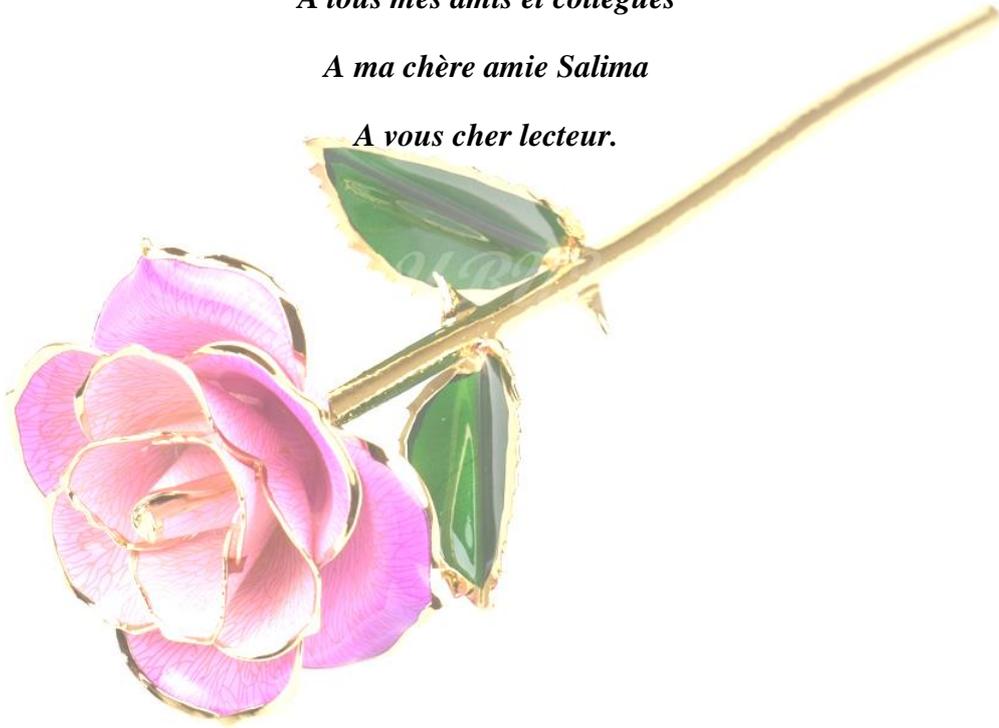
*A mes chers frères : dalil , salah , alla , islam ,Seifeddine et ca femme et ses enfants*

*A mes chers sœurs : Fairouz, Amel et son mari et ses enfants*

*A tous mes amis et collègues*

*A ma chère amie Salima*

*A vous cher lecteur.*



*Bousbaa Nour Elislam*

# Remerciements

*Mes remerciements s'adressent à mon encadreur, Coresponsable de ce Master, l'enseignant Mr Yahiaoui Reda , maître de conférences à institut de maintenance et sûreté industriel Oran , pour avoir accepté de diriger ce travail. Son soutien, ses compétences et sa voyance m'ont été d'une aide inestimable.*

*Remercier sincèrement les membres du jury qui me font le grand honneur d'évaluer ce travail.*

*Mes remerciements les plus chaleureux vont à tous mes camarades au Master 2 Electromécanique , ainsi que tous mes amis de cette leur présence dans les moments difficiles et les excellents moments que j'ai passé avec eux tout au long de cette année.*

*Et bien sûr, nous n'oublions pas de remercier nos familles, mère, père, sœurs, oncle, tante, grand-père et grand-mère. Merci à tous pour leur soutien.*

*Au final, sincères remerciements au chef du département de Electromécanique et à tous les employés de institut.*

## Résumé

Le soudage est un processus de fabrication dans lequel deux matériaux, généralement des métaux ou des thermoplastiques, sont assemblés à la chaleur pour faire fondre ensemble les extrémités des deux matériaux, parfois accompagnés d'une pression externe, puis les laisser refroidir, leur donnant une dureté permanente.

L'objectif de cette thèse est d'analyser les joints soudés par la méthode des éléments finis, et cette méthode a prouvé sa capacité à étudier la résistance des matériaux dans des conditions de déformation et est une méthode efficace pour la prédiction des contraintes dans les structures complexes mécanique.

## Abstract

Welding is a manufacturing process in which two materials, usually metals or thermoplastics, are joined using heat to melt the ends of the two materials together, sometimes accompanied by external pressure, and then let them cool, giving them permanent hardness.

The objective of this thesis is to analyze welded joints by the finite element method, and this method has proven its ability to study the resistance of materials under deformation conditions and is an effective method for the prediction of stresses in structures complex mechanics.

## ملخص

اللحام هي عملية تصنيعية يتم فيها وصل مادتين عادةً من الفلزات أو اللدائن الحرارية باستخدام الحرارة لصهر أطراف المادتين سوياً، أحياناً ما تكون مصحوبة بضغط خارجي، ثم تركهما يبردان، مما يعطيها صلادة دائمة.

تهدف هذه المذكرة إلى تحليل الوصلات الملحومة بواسطة استخدام طريقة العناصر المحدودة ، وقد أثبتت هذه الطريقة قدرتها على دراسة مقاومة المواد في ظل ظروف التشوهات و على انها طريقة فعالة للتنبؤ بالإجهاد في الهياكل الميكانيكية المعقدة..

## ***Table des matières***

Introduction générale .....	1
Chapitre I: La Soudage .....	2
I.1 Introduction : .....	3
I.2 Types d'assemblages: .....	3
I.2.1 Assemblage permanent:.....	3
I.2.2 Assemblage démontables : .....	4
I.2.3 Assemblage direct : .....	4
I.2.4 Assemblage indirect: .....	4
I.3 ASSEMBLAGE PAR SOUDAGE : .....	5
I.3.1 Soudage oxyacétylénique : .....	5
I.3.2 Soudage aluminothermique : .....	5
I.3.3 Soudage électrique par résistance : .....	6
I.3.4 Soudage à l'arc a électrodes enrobées :.....	7
I.3.5 Soudage à l'arc sous flux : .....	7
I.3.6 Soudage à l'arc avec électrode fusible sous flux gazeux : .....	8
I.3.7 Soudage à l'arc avec fil électrodes fusibles ou soudage semi-automatique : .....	8
I.3.8 Soudage orbital : .....	8
I.3.9 Soudage laser: .....	9
I.3.10 Soudage plasma: .....	9
I.3.11 Soudage par faisceau d'électrons :.....	10
I.3.12 Soudage par friction : .....	10
I.3.13 Soudage par friction malaxage ou soudage thixotropique : .....	12
I.4 Types des cordons de soudage :.....	13
I.4.1 Soudure d'angle : .....	13
I.4.2 Soudure en entaille : .....	13
I.4.3 Soudures en bout : .....	14
I.4.4 Soudure en bouchon : .....	14
Les soudures en bouchon, figure 1.17, sont réalisées dans des trous circulaire ou oblongs ce genre de soudure permet de transmettre les efforts de cisaillement [9]......	14
I.5 Préparation des bords des pièces à souder :.....	15
I.6 Calcul de résistance des assemblages soudés : .....	16
I.6.1 Soudure d'angle : .....	16
Application de la formule fondamentale .....	18
I.6.2 Soudures en bout : .....	19

I.6.3 Soudures en bouchon : .....	20
I.7 Combinaisons de cordons de soudure : .....	20
I.8 Conclusion : .....	21
Chapitre II: .....	22
Chapitre II: La Méthode Des éléments finis .....	22
II.1 Introduction : .....	23
II.2 Définition de la méthode des éléments finis : .....	23
II.3 Principes de la MEF : .....	24
II.4 Les Avantages et inconvénients de la MEF : .....	25
II.4.1 Les Avantages de la MEF: .....	25
II.4.2 Les Inconvénients de la MEF : .....	25
II.5 L'analyse par élément finis : .....	26
II.6 Domaines d'application de la MEF : .....	26
II.7 Concepts de base, procédures de la MEF: .....	27
II.8 Description de la méthode : .....	31
II.8.1 Maillage : .....	31
II.8.2 Différents types de maillage : .....	32
II.8.3 Type des éléments finis : .....	32
II.8.4 Choix des éléments finis : .....	33
II.8.5 Qualité d'un élément fini : .....	33
II.9 Les logiciels de simulations par éléments finis : .....	34
II.9.1 Présentation générale d'ABAQUS : .....	34
II.9.2 Principe : .....	35
II.10 Conclusion : .....	36
Chapitre III: .....	37
Chapitre III: Modélisation et Discussion .....	37
III.1 Introduction : .....	38
III.2 Présentation de problème : .....	38
III.3 Modélisation par la méthode des éléments finis : .....	39
III.4 Distribution des contraintes au niveau du joint de soudure : .....	40
III.5 Effet de la taille du joint de soudure : .....	43
III.5.1 Variation horizontale .....	43
III.5.2 Variation verticale : .....	44
III.6 Conclusion: .....	46
Conclusion générale.....	47
Bibliographie .....	48

# Liste des figures

## Chapitre I :

Figure I. 1 : Clinchage .....	4
Figure I. 2: Soudage oxyacétylénique .....	5
Figure I. 3: Soudage aluminothermique .....	6
Figure I. 4 : Soudage par résistance.....	6
Figure I. 5: Soudage à l'arc électrodes enrobées .....	7
Figure I. 6 : Soudage à l'arc sous flux .....	7
Figure I. 7 : Soudage semi-automatique .....	8
Figure I. 8 : Soudage tige orbital.....	9
Figure I. 9 : Soudage laser .....	9
Figure I. 10 : Soudage plasma .....	10
Figure I. 11 : Soudage par faisceau d'électrons .....	10
Figure I. 12 : Soudage linéaire .....	11
Figure I. 13 : Soudage rotatif .....	11
Figure I. 14 : Soudage thixotropique .....	12
Figure I. 15 : Soudure d'angle .....	13
Figure I. 16 : Soudure en entaille .....	14
Figure I. 17 : Soudure en bouchon .....	14
Figure I. 18 : Exemples d'épaisseurs "a "de quelques cordons de soudures .....	16
Figure I. 19 : Représentation d'un cordon de soudure .....	17
Figure I. 20 : Représentation des cordons de soudure frontaux .....	18
Figure I. 21 : Représentation des cordons de soudure latéraux .....	19

## Chapitre II :

Figure II. 1: Principe d'analyse par la MEF .....	24
Figure II. 2: Solution bidimensionnelle d'une équation magnétostatique .....	26
Figure II. 3 : Exemple (a)d'un treillis et (b) d'une plaque de forme similaire .....	27
Figure II. 4 : Barre tendue.....	28
Figure II. 5 : Décomposition de la structure d'une aile d'avion.....	30
Figure II. 6 : Poutre à caisson (a) structure originale (b) Modèle éléments finis .....	30
Figure II. 7 : Plaque rectangulaire avec ouverture.....	31
Figure II. 8 : Quelques éléments finis classiques les plus utilisés en MEF.....	33

## Chapitre III :

Figure III. 1: Schéma globale de la structure métallique .....	38
Figure III. 2: Représentation de la structure .....	39

Figure III. 3: Maillage de la structure métallique .....	40
Figure III. 4 : Distribution des contraintes au niveau de la structure métallique.....	40
Figure III. 5 : distribution des contraintes au niveau du joint de soudure supérieure.....	41
Figure III. 6 : Variation de la contrainte du cordon de soudure supérieure .....	41
Figure III. 7 : Distribution des contraintes au niveau du joint de soudure inférieure.....	42
Figure III. 8 : Variation de la contrainte du cordon de soudure inférieure .....	42
Figure III. 9 : Variation de la contrainte le long du coté oblique du cordon de soudure .....	43
Figure III. 10 : Variation de la contrainte maximale en fonction de la taille horizontal .....	44
Figure III. 11 : Variation de la contrainte le long du coté oblique du cordon de soudure.....	44
Figure III. 12 : Variation de la contrainte maximale en fonction de la taille du coté vertical ....	45

## **Liste des tableaux**

Tableau I. 1: Types de chanfreins pour les soudures bout à bout.....	15
Tableau I. 2: Chanfreins des soudures d'angle .....	16
Tableau II. 1: Matrices et vecteurs caractéristiques pour certaines applications .....	29
Tableau III. 1: Propriétés et dimensions de la Structure étudiée .....	39

# Introduction générale

L'assemblage par soudage est connu depuis le XIX e siècle dans l'esprit scientifiques, il se développe rapidement dans la main des techniciens passant par le soudage oxyacétylénique puis le soudage à l'arc et le soudage par résistance et enfin le soudage laser. Il représente actuellement le principal moyen d'assemblage des structures métalliques, sans lui, de nombreuses applications industrielles n'auraient pas pu être réalisées.

La méthode des éléments finis ( MEF ) est une technique d'analyse numérique permettant obtenir des solutions approximatives à une large variété des sciences de l'ingénieur ,Le principe de base de la MEF consiste à remplacer le domaine réel par un ensemble d'éléments discrets , qui peuvent être réunis de plusieurs manières , et donc les employer pour représenter les formes les plus complexes, Parmi certaines applications de la méthode des éléments finis , on retrouve la modélisation des plaques ; sa géométrie , les conditions aux limites ( appuyé où encastré ) , l'épaisseur ( mince où épaisse ) , le matériau utilisé ( homogène où isotrope ) , tous ces paramètres devraient être bien connus au préalable et leurs prise en considération dans la conception du programme d'éléments finis est indispensable.

Ce mémoire intitulé par « analyse par élément finis des joint soudés » à pour objective d'identifier la distribution des contraintes a niveau de joint soude et optimiser ce joint à travers d'une simulation numérique, l'influence de la taille des joint soudés et les paramètres liés au chargement et la géométrie du cordon du soudure sur le comportement des joints soudés.

L'étude illustrée dans ce mémoire est composée en trois chapitres :

Le premier chapitre représente les notions générales sur le soudage tel que les procédés de soudage les types de cordons de soudage, effet de la forme géométrique et de la taille du cordon de soudage) Rappels sur l'analyse des contraintes et de résistance des assemblages soudés.

Le deuxième chapitre est consacré pour l'étude La méthode des éléments finis, Notions de l'analyse par éléments finis, description de la méthode (analyse 2D ou 3D, maillage, types d'éléments) petite description du logiciel utilisé « Abaqus ».

Le troisième chapitre est visé pour étude de cas, présentation du problème, Présentation des différentes étapes pour traiter le problème (faire varier la taille du cordon de soudage), les Résultats et discussion (analyse de la répartition de contrainte).

# Chapitre I: La Soudage



## I.1 Introduction :

La fabrication d'une structure passe généralement par l'assemblage de pièces les unes avec les autres. Ainsi, une structure constituée de pièces différentes, en particulier au niveau de la nature des matériaux utilisés pour les réaliser, est construite par l'assemblage de ces différentes pièces [1].

L'assemblage joue un rôle majeur dans la structure. Les assemblages sont très fréquemment localisés dans les zones d'effort tranchant ou de moment fléchissant maximaux. La conception et les détails d'un assemblage sont importants, car ils conditionnent les problèmes de transmission d'efforts.

Au-delà de rendre possible la construction d'une structure, l'assemblage assure la transmission des charges d'une pièce à l'autre, et par conséquent la technique d'assemblage devient un facteur prépondérant. Il existe de nombreux modes d'assemblage (par exemple l'agrafage des boîtes de Conserve, les reliures des livres, le clouage ...) mais de manière générique les trois grandes techniques d'assemblage structural sont le soudage, le collage et le boulonnage.

## I.2 Types d'assemblages :

Un assemblage est caractérisé par ses degrés de liaison, c'est-à-dire les mouvements relatifs interdits ou autorisés entre les pièces assemblées. D'autre part, ces assemblages peuvent être permanents, direct ou indirect.

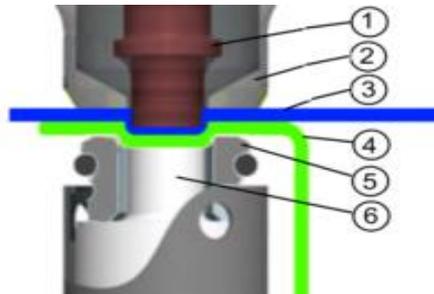
### I.2.1 Assemblage permanent :

Pour supprimer une liaison permanente, il est nécessaire de déformer ou de détruire au moins une des pièces formant l'assemblage, tels que :

- **Le soudage** : Le soudage est un procédé d'assemblage permanent. Il a pour objet d'assurer la continuité de la matière à assembler. Dans le cas des métaux, cette continuité est réalisée à l'échelle de l'édifice atomique. En dehors du cas idéal où les forces interatomiques et la diffusion assurent lentement le soudage des pièces métalliques mises entièrement en contact suivant des surfaces parfaitement compatibles et exemptes de toute pollution, il est nécessaire de faire intervenir une énergie d'activation pour réaliser rapidement la continuité recherchée.
- **Le clinchage** : clinchage ou assemblage-emboutissage est une technique d'assemblage mécanique de tôles métalliques minces (3) et (4).

Le principe de base est de connecter deux tôles métalliques par emboutissage entre un poinçon (1), guidé par une presse (2), et une matrice (5), et éjectées par un doigt (6).

Les tôles subissent localement une déformation plastique à froid, formant un point de connexion. Le formage à froid est utilisé comme technique d'assemblage [2].



**Figure I.1** : Clinchage

### **I.2.2 Assemblage démontables :**

La liaison est conçue pour ne pas endommager de façon importante les pièces qui sont généralement réutilisables pour le remontage, l'élément assurant la liaison peut ne pas être réutilisable.

### **I.2.3 Assemblage direct :**

L'assemblage ne nécessite aucune pièce intermédiaire, la forme des pièces en contact suffit pour la réalisation de celui-ci, tels que :

- **Emboîtement élastique** : L'emboîtement élastique est un mode d'assemblage (une emboîture) où les éléments sont déformés lors de l'introduction. Après la construction, il n'y a plus de contraintes et les éléments ne peuvent être plus séparés. La vue en coupe ci-contre expose graphiquement le principe : la pièce bleue (pièce mâle) ne peut manifestement plus bouger sans déformer la pièce verte (pièce femelle) [2].
- **Frettage** : Le frettage est l'assemblage de deux pièces grâce à un ajustement serré. La pièce extérieure est appelée « frette », la pièce intérieure est dite « frettée ». L'assemblage est réalisé avec des tolérances d'usinage qui interdisent son montage à la main ou même à la presse.

### **I.2.4 Assemblage indirect :**

L'assemblage nécessite un ou des éléments intermédiaires, comme dans le cas du

- **Collage** : Une colle, est un produit de consistance liquide, gélatineuse ou pâteuse servant à lier des pièces entre elles par contact. Ces pièces peuvent être de même nature ou de natures différentes.

- **Anneau élastique** : Un anneau élastique est un composant d'assemblage mécanique généralement monté dans une gorge réalisée sur des portées cylindriques extérieures (arbres, axes...) ou dans des alésages. Il permet de réaliser des arrêts axiaux, des rattrapages de jeu destinés à réduire le bruit de fonctionnement des mécanismes, etc.
- **Embrèvement** :(avec tenon, mortaise et cheville) : Un embrèvement est une technique d'assemblage pour deux pièces (de bois ou de tôle). L'une des pièces possède la languette ou le tenon destiné à s'emmancher dans la rainure ou la mortaise de l'autre pièce.
- **Visserie** : vis, écrou, boulon, goujon, filetage, taraudage [2].

### I.3 Assemblage par soudage :

#### I.3.1 Soudage oxyacétylénique :

L'énergie thermique, générée par l'oxycombustion d'un mélange gazeux combustible et le comburant, focalisé à la sortie de la buse du chalumeau, est utilisé pour faire fondre les bords afin Souder, figure I.2. Lorsqu'un métal d'apport est nécessaire, il se présente sous la forme d'une tige de métal de diamètre approprié tenu à la main et amené pas à pas dans le bain de Fusionnement. La baguette de brasage pour effectuer le soudage doit contenir une quantité minimale de deux alliages à souder pour que cela soit réussi [3].



**Figure I.2** : Soudage oxyacétylénique

#### I.3.2 Soudage aluminothermique :

Utilisé pour la réparation de pièces massives comme les voies ferrées, c'est une méthode de soudage chimique, figure I.3 : le joint à réaliser est emprisonné dans une forme, qui est remplie. Un mélange de poudres à base d'aluminium et d'oxyde de fer. Les pièces à souder sont chauffé au rouge et le mélange est ensuite enflammé ; la réduction de l'oxyde de fer par

l'aluminium provoque la fusion et l'alumine produite est expulsée vers le haut par décantation [3].



**Figure I.3 :** Soudage aluminothermique

### **I.3.3 Soudage électrique par résistance :**

Le soudage est réalisé par la combinaison d'une forte intensité électrique et d'une pression ponctuelle. Ce processus ne nécessite aucune entrée externe. Le courant électrique chauffe la matière jusqu'à fusion. La pression maintient le contact entre l'électrode et l'ensemble. Pour souder, une pince plaque l'ensemble avec des viroles ou des électrodes en cuivre, matériau bon conducteur d'électricité et de chaleur, ce qui permet de moins chauffer la zone de contact avec cette pince et d'éviter la fusion qui se limite à la zone de contact entre les deux tôles à souder. Cette technique est donc dépendante de la résistivité des matériaux, l'épaisseur totale de l'assemblage et le diamètre des électrodes. Ce type de soudage est principalement utilisé dans l'assemblage de tôles fines (< 6 mm) [3].



**Figure I.4:** Soudage par résistance

### I.3.4 Soudage à l'arc a électrodes enrobées :

Le soudage à l'arc à l'électrode enrobée (SAEE ou MMA), est l'un des procédés de soudage les plus utilisés. Lorsque l'on approche l'électrode enrobée des pièces à assembler, il se crée un arc électrique qui dégage un fort effet calorifique provoquant la fusion de l'électrode [4].

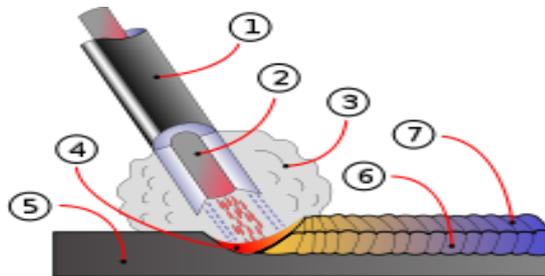


Figure I.5: Soudage à l'arc a électrodes enrobées

Schéma de fonctionnement :

- 1) Enrobage
- 2) Électrode
- 3) Gaz protecteur
- 4) Bain de fusion
- 5) Métal de base
- 6) Cordon de soudure
- 7) Laitier

### I.3.5 Soudage à l'arc sous flux :

Appelé aussi « Soudage à l'Arc Submergé », il consiste à réaliser un joint de soudure sur de l'acier à l'aide d'un arc électrique immergé dans un flux de poudre .Ce processus de soudage est réalisé à l'aide d'un robot, ce qui lui confère une grande régularité. Deux robots de ce type positionnés face à face (articulation en "T") peuvent effectuer un soudage pleine pénétration d'acier épais sur de longues distances (plusieurs mètres). Ce procédé est principalement utilisé pour la production de pièces en grande série [4].

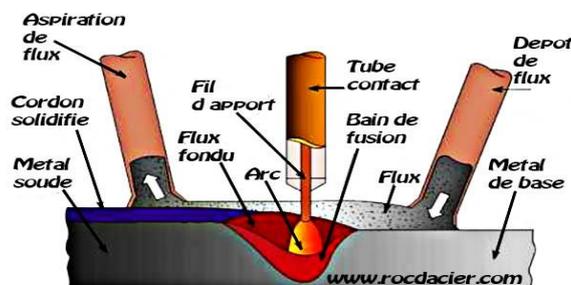


Figure I.6 : Soudage à l'arc sous flux

### I.3.6 Soudage à l'arc avec électrode fusible sous flux gazeux :

Un arc électrique est créé entre l'extrémité de l'électrode en tungstène thermoplastique (qui peut être en tungstène pur, 1% et 2% thériidiidé ou zirconium mais celui-ci est uniquement pour le soudage de aluminium) et la pièce à souder, sous la protection d'un gaz inerte (argon, hélium ou un mélange Hélium argon). Une charge métallique est ajoutée si nécessaire sous forme de tige ou le ruban doit être placé dans le bain de soudure et ne doit pas croiser l'arc électrique ou entrer en contact avec la pointe de perche. Ce processus peut être automatisé dans le cas courant du soudage TIG (gaz inerte tungstène) orbital.

### I.3.7 Soudage à l'arc avec fil électrodes fusibles ou soudage semi-automatique :

Un arc électrique est créé entre l'extrémité de l'électrode consommable et la pièce requise assemblage, sous protection d'un mélange gazeux dont la nature dépend du type de soudure terminé. Le pôle, qui est automatiquement alimenté en continu à partir de la bobine, est introduit sous forme de fil solide ou fourré. [5]

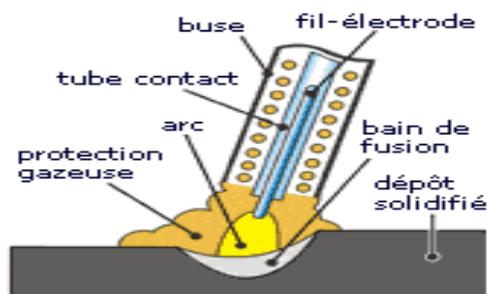
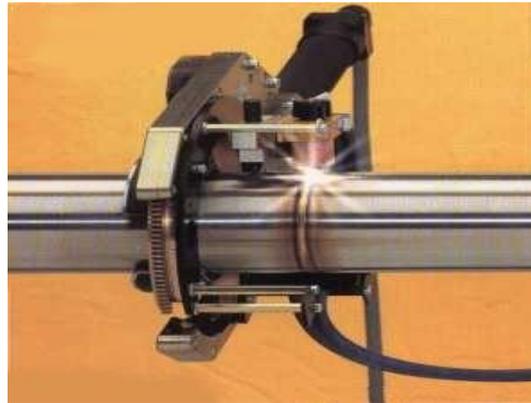


Figure I.7 : Soudage semi-automatique

### I.3.8 Soudage orbital :

Le soudage orbital est un procédé de soudage spécial pendant lequel un arc tourne sans interruption à au moins 360° autour d'une pièce fixe (composant cylindrique, tel qu'un tube). Pour maîtriser sans difficulté le bain de soudage, quelle que soit la position de la torche, un équilibre parfait entre la gravité et la tension superficielle doit être préservé. Dans le cas de la variante mécanisée, les éléments du procédé de soudage sont pris en charge par les composants mécaniques tandis qu'un soudeur contrôle et dirige l'opération.

L'idéal est que les paramètres de soudage soient entièrement programmés avant le début du soudage. Dans la pratique, les contraintes diverses amènent souvent le soudeur à apporter des modifications en cours de route. Dans le cas d'un soudage automatisé, le procédé est entièrement géré par un ordinateur. Par conséquent, le soudeur n'intervient pas.



**Figure I.8 :** Soudage tige orbital

### **I.3.9 Soudage laser :**

L'énergie est apportée sous forme d'un faisceau laser. Les sources laser peuvent être de type CO<sub>2</sub>, LED, Un système optique concentre l'énergie du faisceau laser, ( $1 \times 10^5 \text{ W/cm}^2$  à  $1 \times 10^6 \text{ W/cm}^2$ ) et génère un capillaire rempli de vapeurs métalliques dont les parois sont tapissées de métal liquide en fusion. Le bain de fusion ainsi créé est déplacé et le métal liquide se resolidifie après le passage du faisceau assurant la continuité métallurgique entre les pièces [5].



**Figure I.9:** Soudage laser (LBW: Laser Beam Welding)

### **I.3.10 Soudage plasma :**

Considéré comme une évolution du soudage TIG, il s'en distingue par le fait que l'arc est contraint mécaniquement ou pneumatiquement, générant ainsi une densité d'énergie supérieure. L'arc peut jaillir entre la tuyère et l'électrode (arc non-transféré) ou entre la pièce et l'électrode (arc transféré) voire même semi-transféré. Le soudage plasma peut être réalisé sans chanfrein sur un assemblage en bout à bout d'un dixième de mm jusqu'à des épaisseurs de 8 mm. Dans ce cas, il nécessite très peu de métal d'apport. Il est utilisé quasi exclusivement en mode automatisé (robot) et les vitesses de soudage sont élevées (dizaines de cm par

seconde). Cette méthode permet de souder à des températures atteignant les 10 000 °C. Il permet de souder les aciers « noirs », les aciers inoxydables et l'aluminium [6].



Figure I.10: Soudage plasma (PAW: Plasma Arc Welding)

### I.3.11 Soudage par faisceau d'électrons :

Utilise l'énergie cinétique des électrons projetés dans une enceinte sous vide et focalisés sur la pièce à souder pour créer une zone fondue [7].



Figure I.11: Soudage par faisceau d'électrons

### I.3.12 Soudage par friction :

Ce type de soudage est obtenu par l'échauffement de deux pièces pressées et en mouvement l'une par rapport à l'autre. Le mouvement relatif entraîne un échauffement de l'interface jusqu'à plastification locale du matériau, puis soudage par diffusion atomique. La qualité de la liaison ainsi obtenue est supérieure à celle des matériaux utilisés. Il n'y a pas de métal d'apport et cela permet de souder des matériaux différents [8].

On distingue deux familles de soudage par friction :

- a- Le soudage linéaire (LFW, Linear Friction Welding) : obtenu par un mouvement d'aller/retour linéaire. Une variante, appelée friction orbitale, permet la génération d'un mouvement ovoïde de la pièce en lieu et place du mouvement linéaire.

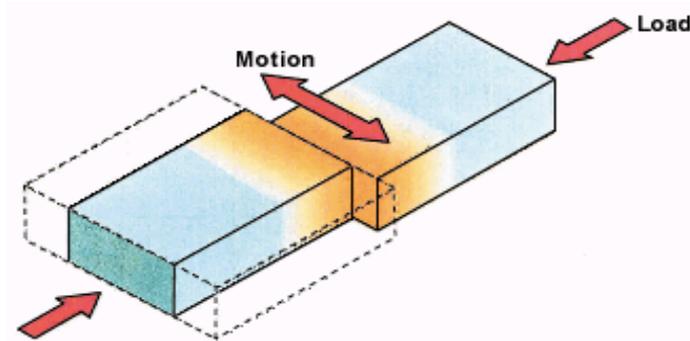


Figure I.12: Soudage linéaire (LFW, Linear Friction Welding)

- b- Le soudage rotatif : obtenu par rotation relative des deux pièces (méthode utilisée pour souder les deux parties d'une soupape d'un moteur thermique). Ce type se compose de deux familles :
- *Le soudage à friction pilotée* : pour lequel le couple du moteur d'entraînement est transmis directement à la pièce en rotation.
  - *Le soudage à friction inertielle* : qui utilise un volant d'inertie pour fournir le couple de frottement [7].

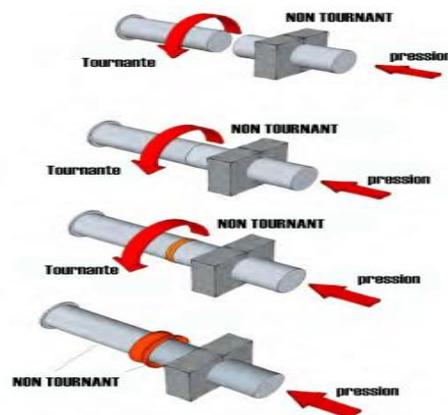
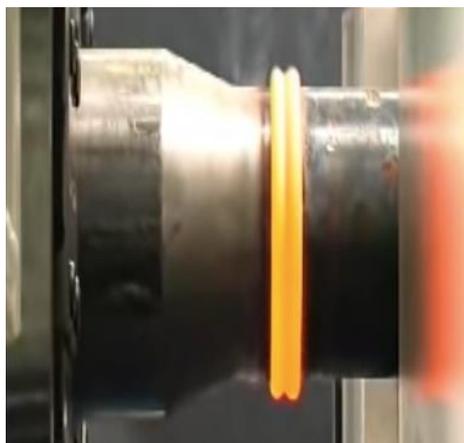


Figure I.13 : soudage rotatif

### I.3.13 Soudage par friction malaxage ou soudage thixotropique :

Le « friction stirwelding » (FSW) est le procédé de soudage le plus récent de tous. Il a été inventé par Wayne Thomas et breveté par le TWI en 1991, figure 1.14. Les outils utilisés pour le soudage FSW de l'acier doivent être très durs et très résistants, ce qui concentre aujourd'hui les applications du FSW surtout pour le soudage des alliages d'aluminium, magnésium, plomb et cuivre. Dans le cas du soudage de l'aluminium, les outils sont en acier trempé. Le FSW permet de souder des alliages d'aluminium qui sont difficiles voire impossibles à souder avec les autres techniques comme les séries 2000 ou 7000 parce que la température n'atteint pas la fusion du matériau.[7]

Comme la soudure est réalisée à l'état solide du matériau à assembler, des forces importantes sont générées sur l'outil. Cela nécessite l'utilisation de machines spécifiques de type portique. Pour baisser le coût d'investissement, des robots industriels peuvent être mis en œuvre pour des épaisseurs à souder inférieures à 8 mm. Pour de plus fines épaisseurs, des essais sont réalisés sur des commandes numériques de type fraiseuse.

Ses applications principales se retrouvent dans la fabrication de trains (le TGV par exemple), de pièces automobiles, de structures de bateaux, de composants pour l'aviation ou l'espace [8].

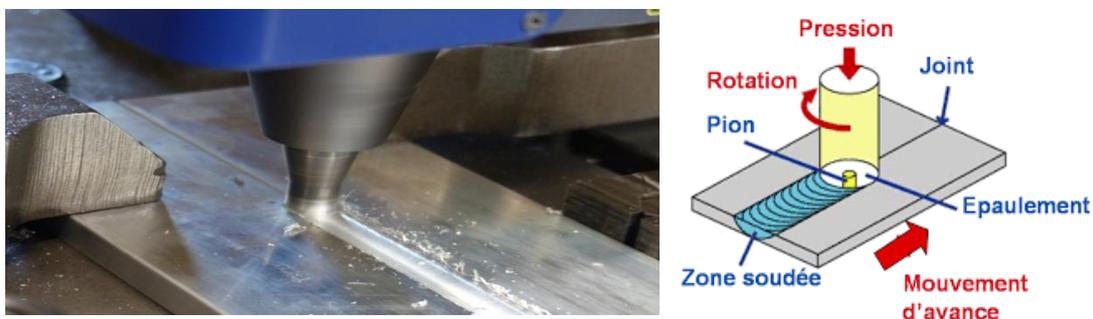
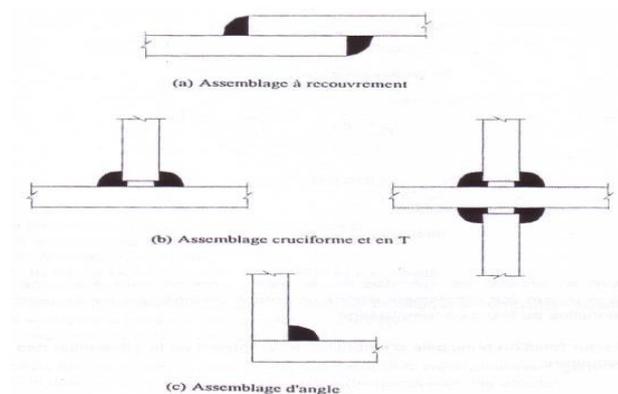


Figure 1.14 : soudage thixotropique

## I.4 Types des cordons de soudage :

### I.4.1 Soudure d'angle :

Les soudures d'angle peuvent être utilisées pour assembler des éléments dont les faces à assembler par fusion forment un angle compris entre  $60^\circ$  et  $120^\circ$ , figure I.15. Des angles inférieurs à  $60^\circ$  sont également admis. Toutefois, dans ces cas, la soudure doit être considérée comme une soudure en bout à pénétration partielle [9].



**Figure I.15** : Soudure d'angle

### I.4.2 Soudure en entaille :

Les soudures en entaille, figure I.16, 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 doive être inférieur à 4 fois l'épaisseur de l'élément perforé [9].

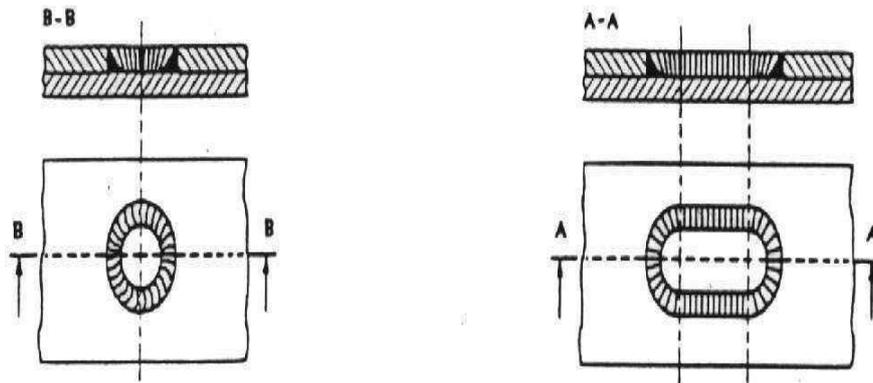


Figure I.16 : Soudure en entaille

#### I.4.3 Soudures en bout :

Soudure réalisée dans l'épaisseur des plats aboutés, dans un assemblage bout à bout ou en té, avec pénétration de matière.

#### I.4.4 Soudure en bouchon :

Les soudures en bouchon, figure 1.17, sont réalisées dans des trous circulaire ou oblongs ce genre de soudure permet de transmettre les efforts de cisaillement [9].

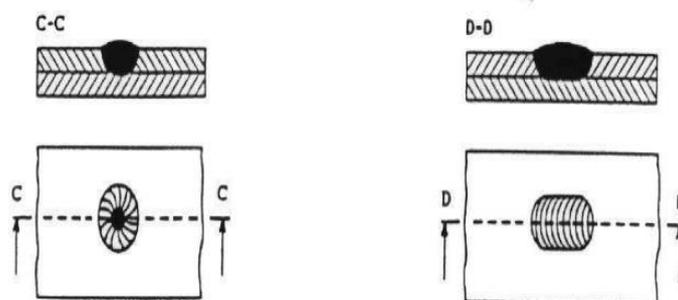


Figure I.17 : Soudure en bouchon

### I.5 Préparation des bords des pièces à 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, les différents types de chanfreins utilisés en charpente métallique sont donnés dans les tableaux suivants :

**Tableau I .1** : Types de chanfreins pour les soudures bout à bout

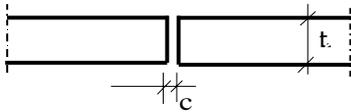
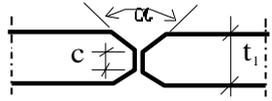
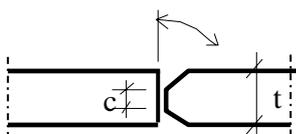
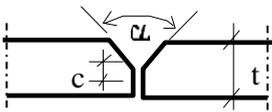
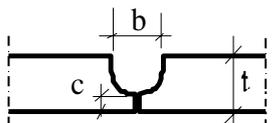
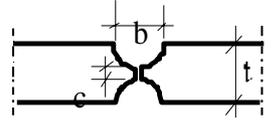
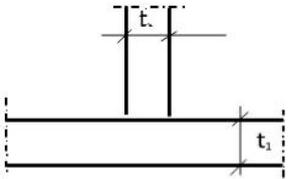
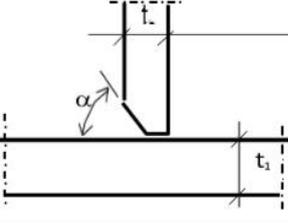
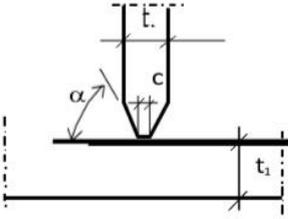
	Mode de chanfrein	Valeurs	Observation
Sans		$t < 6\text{mm}$ $c = 1\div 3\text{mm}$	
en X		$t = 12\div 40\text{mm}$ $c = \min(3\text{mm}; t/5)$ $\alpha = 60^\circ$	Symétrie donc élimine les phénomènes de déformation ou de contraintes internes
en K		$t = 12\div 40\text{mm}$ $c = \min(3\text{mm}; t/5)$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

Tableau I.2 : Chanfreins des soudures d'angle

	Mode de chanfrein	Valeur	Observation
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		$t_2 > 25\text{mm}$ $C = \min(3\text{mm}; t_2 / 5)$	

## I.6 Calcul de résistance des assemblages soudés :

### I.6.1 Soudure d'angle :

Définitions:

- Épaisseur utile "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 [9].
- Longueur utile du cordon "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.

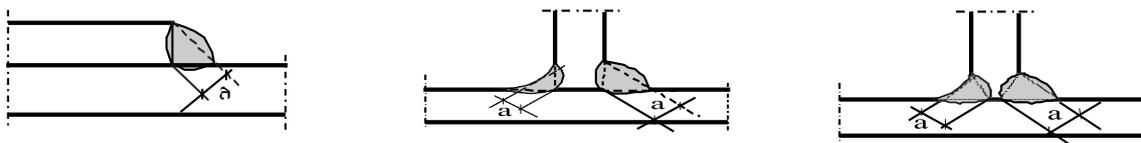


Figure I.18 : Exemples d'épaisseurs "a" de quelques cordons de soudures

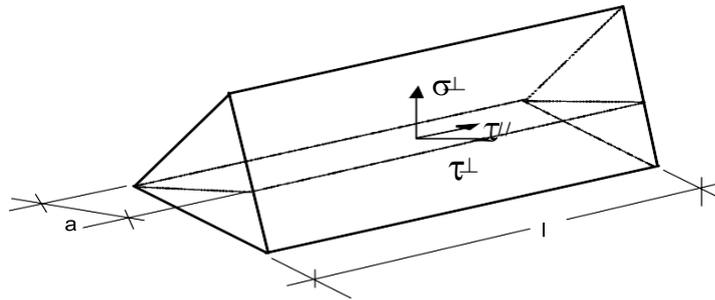


Figure I.19: Représentation d'un cordon de soudure

Avec

$\sigma_{\perp}$ : Composante perpendiculaire à la section;

$\tau_{\perp}$ : 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;

$f_u$ : Limite ultime du métal de base;

$\beta_w$ : facteur de corrélation qui dépend de l'acier utilisé donné par le tableau suivant:

$\beta_w = 0,8$  pour l'acier S235 ( $f_u = 360$ )

$\beta_w = 0,85$  pour l'acier S275 ( $f_u = 430$ )

$\beta_w = 0,9$  pour l'acier S355 ( $f_u = 510$ )

$\gamma_{Mw}$ : 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

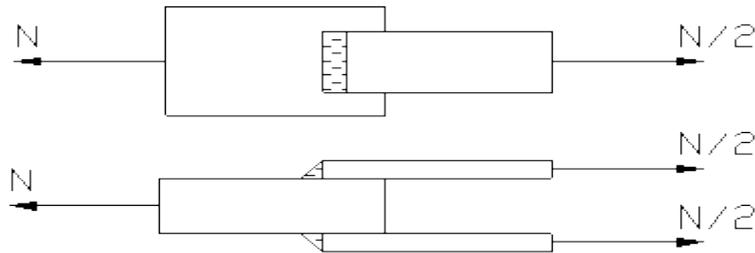
$\gamma_{Mw} = 1,35$  pour les aciers de limite élastique S355 L'indice w signifie soudure (welding en anglais) [9].

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

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

Application de la formule fondamentale

➤ Cordons frontaux



**Figure I.20:** Représentation des cordons de soudure frontaux

$$\sigma_{\perp} = \frac{F_{\sigma_{\perp}}}{aL} = \frac{F \cos 45^{\circ}}{aL} = \frac{F\sqrt{2}}{2aL}$$

$$\tau_{\perp} = \frac{F_{\tau_{\perp}}}{aL} = \frac{F \cos 45^{\circ}}{aL} = \frac{F\sqrt{2}}{2aL}$$

$$\tau_{//} = \frac{F_{\tau_{//}}}{aL} = 0 \text{ car il n'y pas de composante selon la longueur de la gorge}$$

(La force F représente N dans la **Figure I.20**)

La formule fondamentale s'écrit:

$$\sigma_{eq} = \sqrt{\sigma_{\perp}^2 + 3\tau_{\perp}^2} = \sqrt{\left(\frac{F\sqrt{2}}{2aL}\right)^2 + 3\left(\frac{F\sqrt{2}}{2aL}\right)^2} = \frac{F\sqrt{2}}{aL}$$

➤ Cordons latéraux

$$\sigma_{\perp} = 0 \qquad \tau_{\perp} = 0 \qquad \tau_{//} = F / \sum a l_1$$

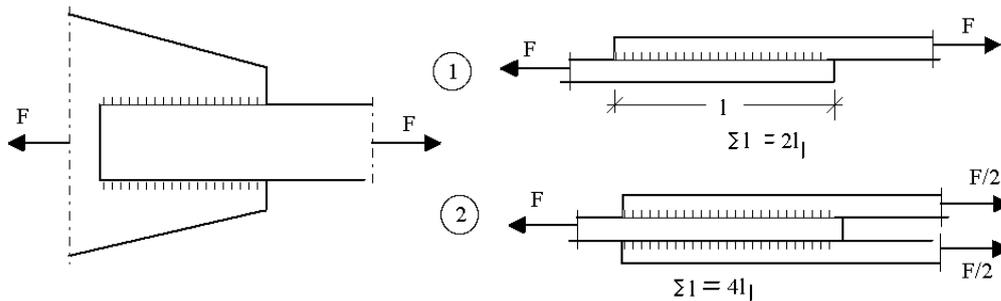


Figure I.21: Représentation des cordons de soudure latéraux

On doit vérifier que :

$$\sigma_{eq} \leq \frac{f_u}{\beta_w \gamma_{Mw}}$$

On obtient:

$$\frac{F\sqrt{3}}{\sum a l_1} \leq \frac{f_u}{\beta_w \gamma_{mw}} \rightarrow \text{par unité de longueur } \frac{F}{\sum l_1} \frac{a.f}{\beta_w \gamma_{saw} \sqrt{3}} = F$$

**I.6.2 Soudures en bout :**

Pour une soudure en bout à pleine pénétration, si le métal d'apport l'autorise, la résistance de calcul sera celle de la plus faible des parties assemblées.

Pour une soudure en bout à pénétration partielle, le calcul se fait comme pour les soudures d'angles. La gorge est prise égale à la profondeur de pénétration effectivement réalisée. Si la préparation de la soudure se fait par un chanfrein, la gorge est prise égale à la profondeur de préparation moins 2 mm.

### I.6.3 Soudures en bouchon :

La formulation de la résistance d'une soudure en bouchon est fondée sur la formule enveloppe, en remplaçant la section de gorge par l'aire du trou bouché par la soudure [10].

La résistance de calcul d'une soudure en bouchon doit être prise égale à :

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

Avec :  $A_w$  l'aire efficace d'une soudure en bouchon doit être prise égale à l'aire du trou.

### I.7 Combinaisons de cordons de soudure :

Cas où on a plusieurs cordons de soudure, soumis aucun effort :

On détermine un ensemble d'efforts appliqués au milieu de chaque cordon capable d'équilibrer les sollicitations exercées sur l'assemblage et on vérifie au moyen de la formule précédente que chaque cordon peut supporter l'effort qui lui revient.

Cas d'assemblage est soumis à une charge excentrée :

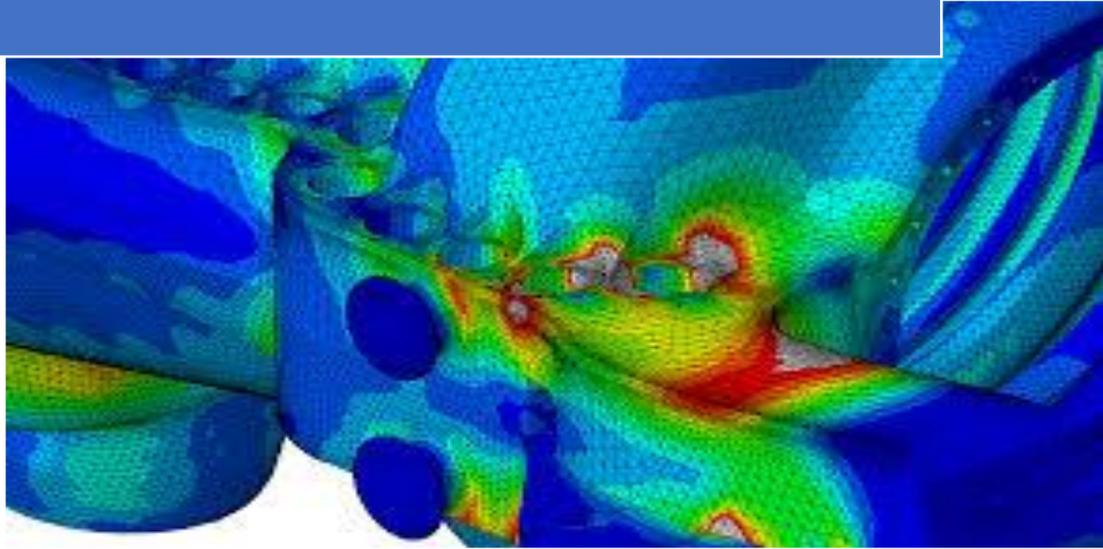
On peut être conduit à envisager des efforts de direction différente sur les cordons parallèles et on vérifie au moyen de la formule simplifiée précédente [9].

### **I.8 Conclusion :**

Le soudage est une opération qui consiste à réunir deux ou plusieurs parties constitutives d'un assemblage, de manière à assurer la continuité entre les parties à assembler par de différents procédés. Cependant, il est indispensable de s'assurer que le cordon de soudure est en mesure de supporter le chargement appliqué. Les différentes situations de chargement et de formes géométriques des pièces et du cordon de soudure ne permettent pas l'application directe des lois de résistance mécanique.

Le recours à la méthode des éléments finis permet de traiter les situations les plus complexes et offre une bonne alternative aux calculs usuels de résistances des cordons de soudure.

## Chapitre II: La Méthode Des éléments finis



## **II.1 Introduction :**

La méthode des éléments finis fait partie des outils de mathématiques appliquées. Il s'agit de mettre en place, à l'aide des principes hérités de la formulation variation elle ou formulation faible, un algorithme discret mathématique permettant de rechercher une solution approchée d'une équation aux dérivées partielles (ou EDP) sur un domaine compact avec conditions aux bords et/ou dans l'intérieur du compact. On parle couramment de conditions de type Dirichlet (valeurs aux bords) ou Neumann (gradients aux bords) ou de Robin (relation gradient/valeurs sur le bord).

Il s'agit donc avant tout de la résolution approchée d'un problème, où, grâce à la formulation variation elle, les solutions du problème vérifient des conditions d'existence plus faibles que celles des solutions du problème de départ et où une discrétisation permet de trouver une solution approchée. Comme de nombreuses autres méthodes numériques, outre l'algorithme de résolution en soi, se posent les questions de qualité de la discrétisation :

- existence de solutions.
- unicité de la solution.
- stabilité.
- convergence.
- et bien sûr : mesure d'erreur entre une solution discrète et une solution unique du problème initial [11].

## **II.2 Définition de la méthode des éléments finis :**

La méthode des éléments finis est une procédure numérique pour analyser les structures et les milieux continus. Habituellement le problème adressé est compliqué à résoudre d'une manière satisfaisante par des méthodes analytiques classiques. Le problème peut concerner des analyses des contraintes, la conduction de la chaleur, ou n'importe lequel de plusieurs autres secteurs. Le procédé de la méthode des éléments finis produit beaucoup d'équations algébriques simultanées, qui sont produites et résolues sur un ordinateur numérique. Les calculs des éléments finis sont exécutés sur l'ordinateur personnel. Cependant, les erreurs ont diminué en traitant plus d'équations. Et les résultats assez précis pour la technologie sont parcourables à un coût raisonnable La méthode des éléments finis a commencé comme méthode d'analyse des contraintes. Aujourd'hui les éléments finis sont également employés pour analyser des problèmes du transfert thermique, champs de lubrification de flux de fluide, électriques et magnétiques et beaucoup d'autres. Les problèmes qui étaient précédemment tout à fait insurmontables sont maintenant résolus par habitude. Les procédures des éléments finies sont employées dans la conception des bâtiments, des moteurs de chaleur de moteurs électriques, des fuselages des bateaux et du vaisseau spatial [12].



## **II.4 Les Avantages et inconvénients de la MEF :**

### **II.4.1 Les Avantages de la MEF:**

La MEF étant versatile, elle présente des avantages par rapport aux autres méthodes numériques :

- Elle est applicable à tout type de problème dit de champs, d'analyses de contraintes, de transfert thermique, etc.,
- Elle n'impose aucune restriction géométrique, le corps ou le domaine à modéliser peut avoir une forme quelconque,
- Elle n'impose aucune restriction sur les conditions aux limites et le type de chargement,
- Elle n'impose aucune restriction sur les propriétés du matériau. Ces propriétés ne sont donc pas réduites à l'isotropie, et peuvent changer d'un élément à un autre,
- Les éléments possédant différents comportements (modèles mathématiques) peuvent être combinés (ex : voile-portique dans une structure 3D), donc un seul modèle d'élément fini (EF) peut contenir des barres, des poutres, des plaques, etc.
- La structure modélisée par les éléments finis représente le possible à la structure réelle ou au domaine à analyser.
- L'approximation peut être facilement améliorée en développant la taille du maillage en augmentant le nombre d'éléments [14].

### **II.4.2 Les Inconvénients de la MEF :**

- La méthode des éléments finis a néanmoins quelques inconvénients. Elle donne un résultat numérique particulier pour un problème spécifique. Elle ne fournit aucune forme de solution susceptible de permettre une étude analytique de l'effet d'un changement de paramètre par exemple.
- .Un ordinateur, un programme fiable et une utilisation intelligente sont nécessaires;
- Les programmes généraux de calcul doivent être fortement documentés.
- L'expérience et le bon sens de l'ingénieur sont indispensables à la définition d'un bon modèle [15].

## II.5 L'analyse par élément finis :

En analyse numérique, la méthode des éléments finis (MEF, ou FEM pour finit élément méthode en anglais) est utilisée pour résoudre numériquement des équations aux dérivées partielles.

Celles-ci peuvent par exemple représenter analytiquement le comportement dynamique de certains systèmes physiques (mécaniques, thermodynamiques, acoustiques, etc.).

Concrètement, cela permet par exemple de calculer numériquement le comportement d'objets même très complexes, à condition qu'ils soient continus et décrits par une équation aux dérivées partielles linéaire : mouvement d'une corde secouée par l'un de ses bouts, comportement d'un fluide arrivant à grande vitesse sur un obstacle, déformation d'une structure métallique, etc. [11].

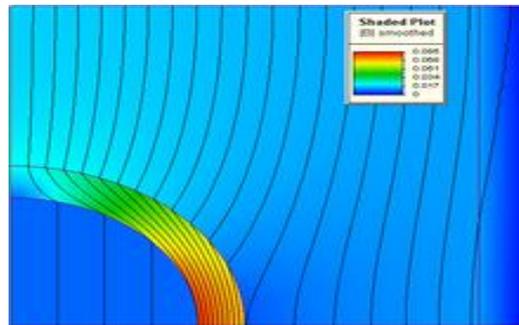


Figure II.2 : Solution bidimensionnelle d'une équation magnétostatique

## II.6 Domaines d'application de la MEF :

- Modélisation des structures.
- analyse linéaire (statique et dynamique).
- analyse non linéaire (grands déplacements et rotations, grandes déformations, contact et frottement, flambage, ...).
- mise en forme des matériaux thermique (en régime permanent et transitoire,...).
- mécanique des fluides.
- Electromagnétisme.
- dynamique rapide (choc, impact, crash).
- optimisation des structures [16].

## II.7 Concepts de base, procédures de la MEF:

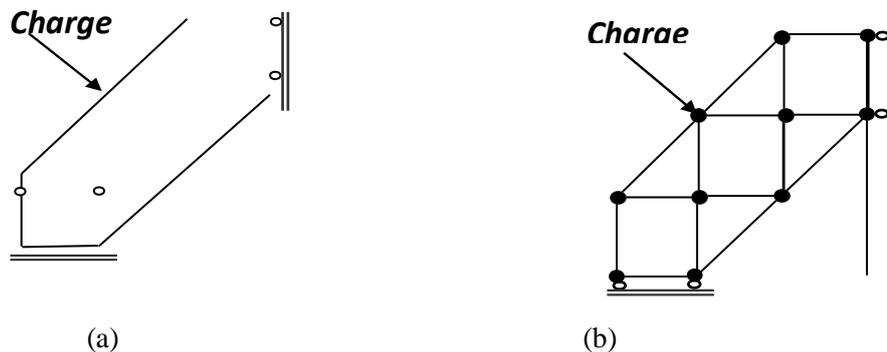
### A- Concepts

C'est l'intuition physique qui pour la première fois, a mis en évidence les concepts de la MEF, pour les ingénieurs.

Pour un ingénieur de structure, le problème d'un treillis par exemple figure 3 (a), sera un ensemble de barres dont il combine les caractéristiques individuelles selon les lois d'équilibre pour ensuite résoudre le système d'équations pour tout le système.

Cette procédure marche bien pour un certain nombre de points de connections (nœuds), mais qu'en est il cependant d'une structure continue comme la plaque figure 3 (b) qui possède un nombre infini de points de connexion (nœuds) ?

Le problème aurait été plus difficile sans l'intuition de Hrenikoff qui proposa de diviser la structure continue en un certain nombre d'éléments de sections de structure (barres ou poutres) interconnectés à un nombre fini de points nodaux, figure II.3.



**Figure II.3 :** Exemple (a)d'un treillis et (b) d'une plaque de forme similaire supportant la même charge.

### Concept 1

Les problèmes d'ingénieurs sont le plus souvent exprimés en terme :

- d'équations gouvernantes (différentielles essentiellement) et
- des conditions aux limites.

Exemple : Barre en traction (figure II.4)

$$A \cdot E \frac{du}{dx} = N = Cst \quad a < x < b$$

$$u(a) = u(b) = 0$$

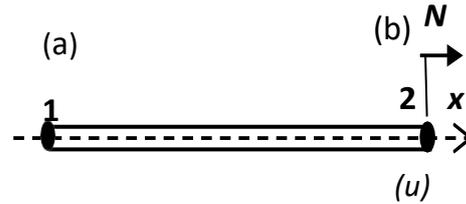
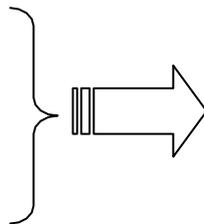


Figure II.4 : Barre tendue

Plus généralement :

Problèmes d'Elasticité  
 Problèmes de transfert de chaleur  
 Ecoulement hydraulique  
 Etc....



$$L(u) + f = 0 \text{ eq. diff.}$$

⊕

$$B(u) + g = 0 \text{ Condition aux limites}$$

*L* et *B* sont des opérateurs :  $d^2( \cdot )/dx^2$  ;  $[d^2( \cdot )/dx^2 + d^2( \cdot )/dy^2]$  ;  $d/dx$

### Concept 2

On connaît toutes les équations mais on ne peut pas résoudre manuellement.

$$L(u) + f = 0 \text{ eq. diff.}$$

⊕

$$B(u) + g = 0 \text{ Condition aux limites}$$



**MEF (Système d'équations algébriques)**

$$\mathbf{K} \cdot \mathbf{U} = \mathbf{F}$$

**Approximation-**

( Géométrie du domaine compliqué)

**K** – Matrice de rigidité du système

**U** – Vecteur de déplacement

**F** – Vecteur force

### Concept 3

$$\mathbf{K} \cdot \mathbf{U} = \mathbf{F} \quad \rightarrow$$

$$\text{Résolution } \mathbf{U} = \mathbf{K}^{-1} \cdot \mathbf{F}$$

Propriété      Comporteme      Sollicitation

**Tableau II. 1** : Matrices et vecteurs caractéristiques pour certaines applications

	Propriété de <b>K</b>	Comportement <b>U</b>	Sollicitation <b>F</b>
Elasticité	Rigidité	Déplacement	Force
Transfert de chaleur	Conductivité thermique	Température	Source de chaleur
Fluide	Viscosité	Vitesse	Force interne

#### Concept 4

Il est difficile d'obtenir un système d'équations pour la totalité du domaine..

- Diviser le domaine en un nombre d'éléments petits et simples,
- Choisir un paramètre de champ (déplacement, température, vitesse) représentant les degrés de liberté (d.d.l.s.) via une interpolation (approximation) polynomiale sur chaque élément,
- Les éléments adjacents partagent les mêmes degrés de liberté aux points d'intersection (nœuds).

#### Concept 5

Obtenir les équations algébriques pour chaque élément

- Mettre tous les éléments ensembles (processus d'assemblage de tous les éléments,

$$\sum K^e \cdot U^e = \sum F^e \Rightarrow K \cdot U = F$$

#### Concept 6

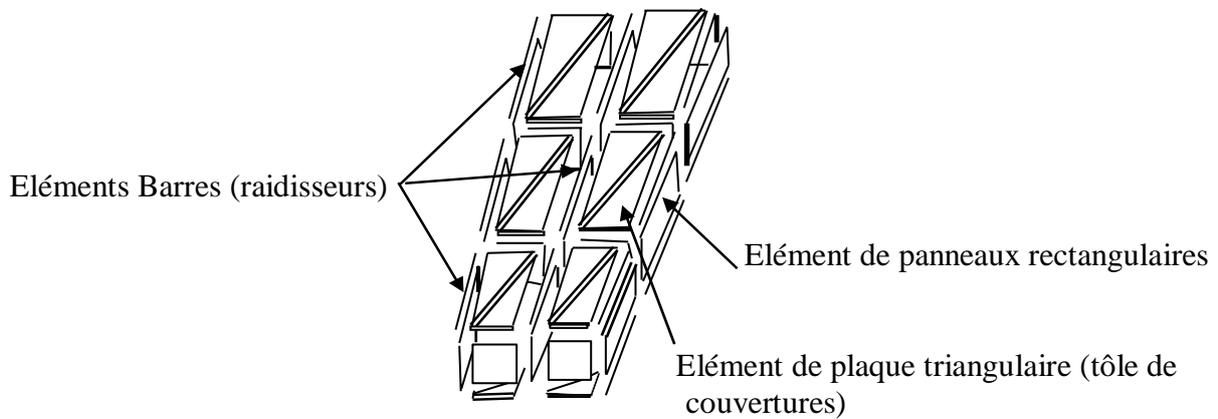
Résoudre le system d'équations pour obtenir les variables inconnues (déplacements) aux nœuds.

$$K \cdot U = F \rightarrow \text{Résolution} \quad U = K^{-1} \cdot F$$

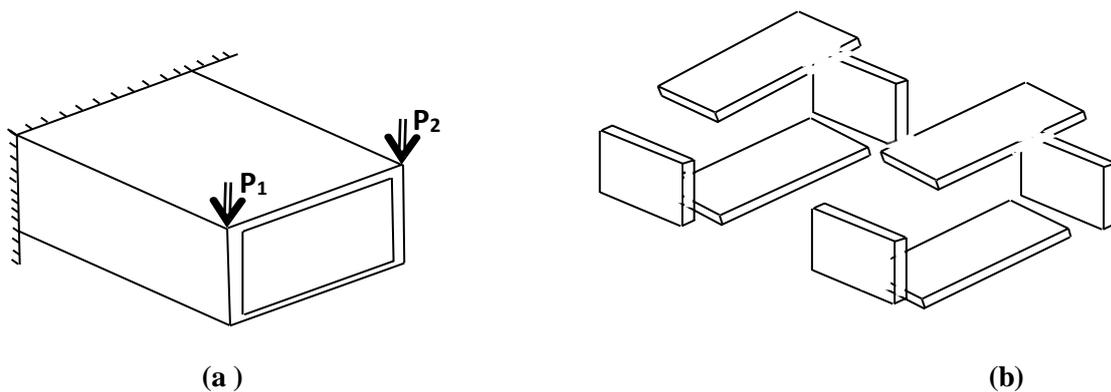
**B- Procédures**

- Diviser la structure en un certain nombre de pièces (formant des éléments avec des nœuds).
- Décrire le comportement des quantités physiques pour chaque élément (champs de déplacement - choix d'une forme d'approximation).
- Relier (assembler) les éléments aux nœuds pour former un système d'équations approximatif pour toute la structure.
- Résoudre le system d'équations comportant les inconnues aux nœuds (en génie civil les inconnues sont en général des déplacements).
- Calculer les quantités désirées (en génie civil, il s'agit de contraintes et déformations) pour des éléments choisis.

Exemples :



**Figure II.5 :** Décomposition de la structure d'une aile d'avion



**Figure II.6:** Poutre à caisson (a) structure originale (b) Modèle éléments finis.

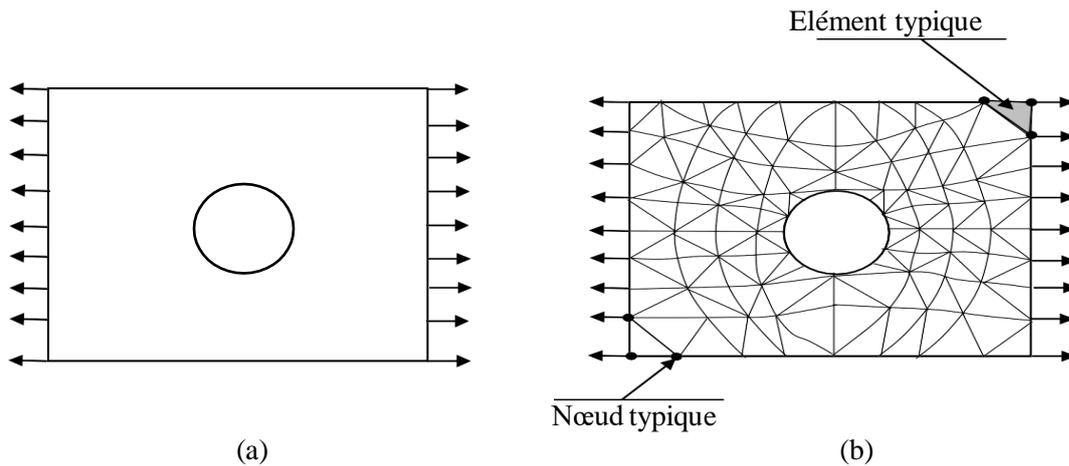


Figure II.7: Plaques rectangulaires avec ouverture.

(a) Model de base

(b) Discrétisation par EF de tailles différentes

## II.8 Description de la méthode :

### II.8.1 Maillage :

La méthode des éléments finis repose sur un découpage de l'espace selon un maillage. D'habitude l'on choisit un maillage carré ou triangulaire mais rien n'interdit de choisir des maillages plus complexes. Il n'est pas non plus nécessaire que le maillage soit régulier et l'on a tendance à resserrer le maillage près des endroits d'intérêt (par exemple aux endroits où l'on pense que la solution va beaucoup varier) ; cependant, il faut veiller à avoir des éléments faiblement distordus (se rapprocher d'un polygone régulier). Plus ce maillage est resserré, plus la solution que l'on obtient par la méthode des éléments finis sera précise et proche de la « vraie » solution de l'équation aux dérivés partielles.

On appelle traditionnellement  $h$  la plus grande dimension d'un élément (le diamètre de la sphère dans laquelle s'inscrit l'élément), et  $p$  le degré du polynôme décrivant le côté ou l'arête ( $p = 1$  pour des côtés/arêtes droits,  $p = 2$  pour des côtés/arête présentant une courbure).

Dans l'idéal, le maillage doit donc épouser les contours  $\delta\Omega$  du domaine. Si  $\delta\Omega$  est courbe, alors on peut :

Soit utiliser des éléments plus petits, on parle de raffinement de type  $h$  ;

Soit utiliser des éléments dont les côtés (en 2D) ou arêtes (en 3D) sont courbes, on parle de raffinement de type  $p$ .

Lorsque le degré des polynômes  $p$  est élevé, on parle de méthode des éléments spectraux [17].

### **II.8.2 Différents types de maillage :**

La connectivité d'un élément (au sens de nœud, arête, cellule ...) est la liste de ses voisins. Un maillage structuré est un maillage à connectivité fixe. Le maillage est alors défini par sa seule liste de nœuds :

- Structuré : grille (nœuds toujours adjacents aux mêmes éléments)
- Non-structuré : les autres.

➤ **types de maillage :**

- Simpliciaux : triangles, tétraèdres
- Mixtes / hybrides : différents types d'éléments (contient des éléments structurés et non structurés) [18].

### **II.8.3 Type des éléments finis :**

La sélection de l'élément sera fonction du type de problème à résoudre, généralement. Ils sont groupés en quatre classes :

- 1- les déplacements et les déformations planes.
- 2- la flexion des plaques.
- 3- les coques.
- 4- l'analyse des solides (3D).

Nous distinguons trois familles correspondantes à des différents type d'éléments finis à une, deux, trois dimension :

- **Les éléments unidimensionnels (1D) :** barres, poutres rectilignes ou courbes utilisées de façon individuelle ou associées à des plaques pour modéliser les raidisseurs dans un voile.
- **Les éléments bidimensionnels (2D) :** élasticité plane (déformation on contraint ) on plaque en flexion, coques courbes , de forme triangulaire ou quadrangulaire.
- **Les éléments tridimensionnels (3D) :** éléments de volume ou coques épaisses
- **Les éléments axisymétriques :** qui constituent une classe bien particulière.

Toutes à section triangulaire ou quadrangulaire, coques conique ou méridienne courbe, (éléments de volume ou coques épaisses) [19].

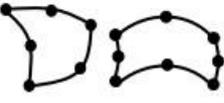
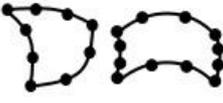
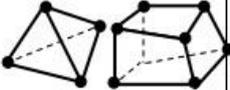
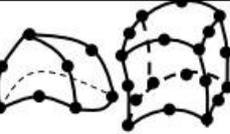
Eléments	linéaires	paraboliques (quadratiques)	cubiques
unidimensionnels			
bidimensionnels			
tridimensionnels			

Figure II.8: Quelques éléments finis classiques les plus utilisés en MEF.

#### II.8.4 Choix des éléments finis :

Les éléments doivent s'adapter à la nature du problème à traiter, c'est-à-dire respecter les hypothèses et se conformer aux caractéristiques de la modélisation. Certains programmes offrent un choix très vaste, d'autres très limité. Il convient donc de passer en revue les particularités essentielles des éléments disponibles :

- Modèle (déplacement, équilibre, mixte, ...)
- Convergence (critères et taux)
- Degré (des divers champs)
- Nœuds, et inconnues aux divers nœuds
- Compatibilité des éléments les uns avec les autres
- Performances et limitations [20].

#### II.8.5 Qualité d'un élément fini :

Un bon élément fini doit réunir les propriétés suivantes :

- Aucun défaut de base (mécanisme...)
- Convergence rapide
- Bonne précision, déjà dans un maillage grossier
- Qualités de convergence et précision conservée pour une distorsion raisonnable

- Vecteurs forces consistants ;
- souplesse d'emploi ;
- Connexion (conforme) possible avec d'autres modèles ;
- Dérivation théorique simple et claire ;
- Programmation efficace et limpide.

## **II.9 Les logiciels de simulations par éléments finis :**

Dans le domaine de la recherche industrielle privée ou publique (construction automobile, aéronautique, spatial...), des techniques de simulation et d'analyse numérique de phénomènes physiques se sont beaucoup développées ces dernières années et ont contribué grandement à améliorer la productivité des industriels et la vie de tous les consommateurs. La quatrième révolution industrielle en cours de démarrage et dont la clé de voûte est l'usine digitale sera entièrement basée sur des outils numériques de représentation de la réalité virtuelle combinée avec une robotisation de la production.

Dans cette quête de logiciels de conception et de calculs assistés par ordinateur de plus en plus performants on peut mentionner le logiciel ABAQUS.

ABAQUS c'est avant tout un logiciel de simulation par éléments finis de problèmes très variés en électromécanique des milieux continus. Il est très répandu et connu, en particulier pour ses traitements performants de problèmes non-linéaires [21].

### **II.9.1 Présentation générale d'ABAQUS :**

ABAQUS est un logiciel de calcul éléments finis développé initialement par HKS et depuis 2005 par ABAQUS Inc (Dassault Systèmes). Il se compose de trois produits :

ABAQUS/Standard, ABAQUS/Explicit et ABAQUS/CAE. :

- ❖ ABAQUS/Standard est un solveur généraliste qui recourt à un schéma traditionnel d'intégration implicite.
- ❖ Le solveur ABAQUS/Explicit emploie un schéma d'intégration explicite pour résoudre des problèmes dynamiques transitoires ou quasi statiques non linéaires.
- ❖ ABAQUS/CAE constitue une interface intégrée de visualisation et de modélisation pour les dits solveurs.

Chacun de ces produits est complété par des modules additionnels et/ou optionnels, spécifiques à certaines applications. Les produits ABAQUS, ABAQUS/CA notamment, sont écrits intégralement avec les langages Fortran pour les parties calcul C++ pour les parties visualisation graphiques et Python pour les scripts et les para métrisations. La gestion de l'interface graphique est assurée par FOX Toolkit.

ABAQUS est très largement utilisé dans les industries automobiles et aéronautiques. En raison du large spectre de ses capacités d'analyse et de sa bonne ergonomie, il est également très populaire dans les milieux universitaires, pour la recherche et l'éducation.

ABAQUS fut d'abord conçu pour analyser les comportements non-linéaires. Ils possèdent conséquence une vaste gamme de modèles de matériaux.

En 2005, ABAQUS Inc. a été acquise par Dassault Systèmes et est devenue SIMULIA.85 [21].

### **II.9.2 Principe :**

ABAQUS n'est qu'un solveur (Standard, Explicite ou Implicite, ...) qui effectuera résolution d'un problème décrit par un fichier « entrée » (ou fichier de données) et qui écrit la solution vers un fichier « de sortie » (ou fichier de résultats):

- Le fichier (« texte ») de données a pour extension (.inp) et son contenu correspond à des combinaisons qui décrivent les géométries, les matériaux, les conditions aux limites,...

- Le fichier de résultats a pour extension (.odb) et son contenu se représente sous forme de contours et de courbes montrant les résultats.

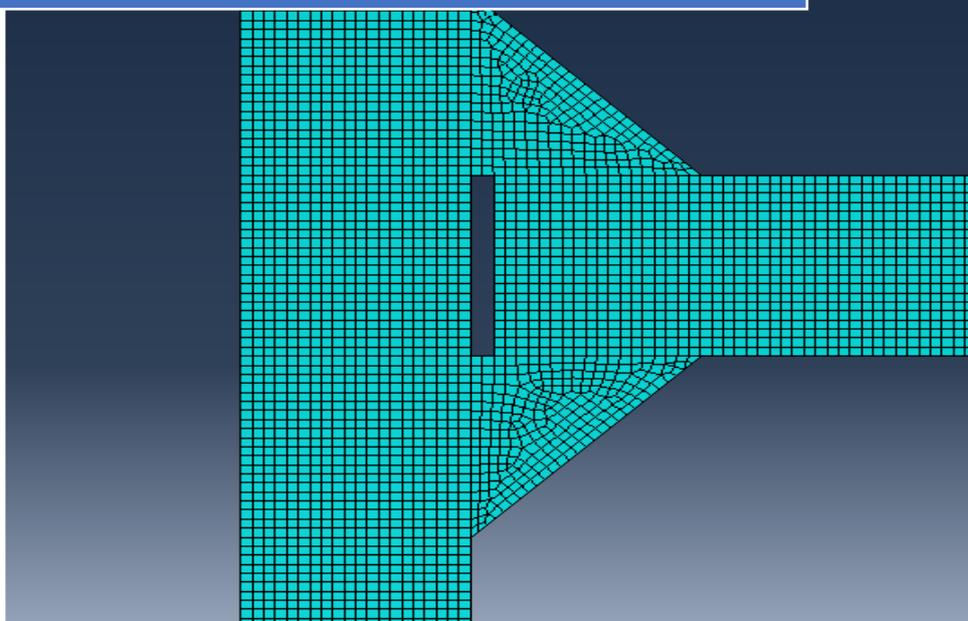
Les autres fichiers créés pendant le calcul dans ABAQUS sont :

- ❖ Le Fichier (.dat) qui contient :
  - Le résumé du modèle élaboré,
  - Les messages d'erreur concernant notre modélisation,
  - Les temps de calcul.
- ❖ Le fichier (.msg) qui contient :
  - Le fichier résumant le calcul en cours
  - Les messages d'erreur lors du déroulement du calcul [21].

## **II.10 Conclusion :**

La méthode des éléments finis est une technique récente à caractère pluridisciplinaire, car elle met en œuvre les connaissances de trois disciplines de base, la mécanique des structures, l'analyse numérique et la programmation. Elle permet de résoudre différents problèmes de mécanique des structures et son domaine d'application ne cesse de s'élargir. Son utilisation dans le calcul de résistance des cordons de soudure permet de mieux optimiser leur forme géométrique et dimensionnelle.

## Chapitre III: **Modélisation et Discussion**



### III.1 Introduction :

Le soudage occupe une place importante dans toutes les branches de l'industrie, c'est une opération consistant à assembler deux éléments métalliques, En d'autres termes, il s'agit d'assurer la continuité mécanique entre les parties. La modélisation des assemblages soudés permet de prévoir la distribution des contraintes et la déformation de l'ensemble des parties soudées.

Notre travail consiste à modéliser le soudage d'un joint de soudure en T par la méthode des éléments finis. Dans cette étude on analysera la distribution des contraintes au niveau du joint de soudure, tout en étudiant l'influence de la variation dimensionnelle et géométrique du joint de soudure sur la répartition des contraintes. Pour ce, une modélisation par éléments finis est conduite sur l'ensemble de la structure par le logiciel Abaqus.

### III.2 Présentation de problème :

La structure étudiée est représentée sur la figure (III.1), dans laquelle deux barres métalliques sont assemblées par soudage sous forme de T, et où deux cordons de soudure sont utilisés. Les dimensions et les propriétés de la structure métallique sont données dans le tableau III.1.

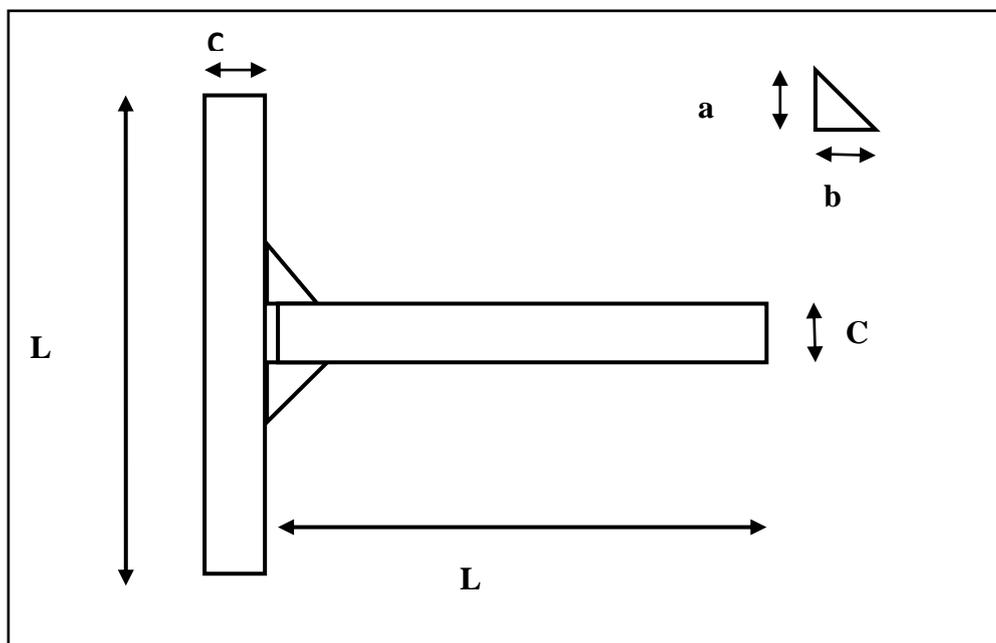


Figure III.1 : Schéma globale de la structure métallique

Tableau III. 1 : Propriétés et dimensions de la structure étudiée :

Paramètres	Valeurs
L	150 mm
C	10 mm
F	10 MPa
R	10mm
$\nu$	0.33
E	210000 MPa
a	10 mm
b	10 mm

### III.3 Modélisation par la méthode des éléments finis :

La modélisation par éléments finis de la structure métallique est conduite en deux dimensions et en supposant que les matériaux ont un comportement linéaire élastique. Une force verticale est appliquée à l'extrémité de la barre horizontale, alors que les bords supérieur et inférieur de la barre verticale sont encastrés, Figure (III.2).

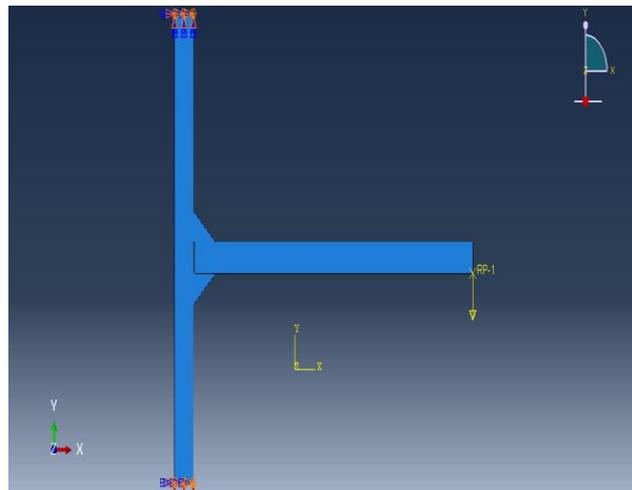
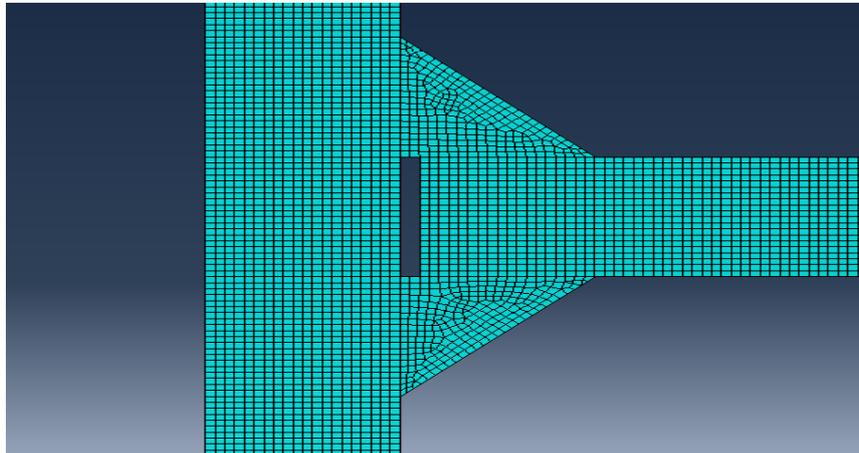


Figure III.2: Représentation de la structure

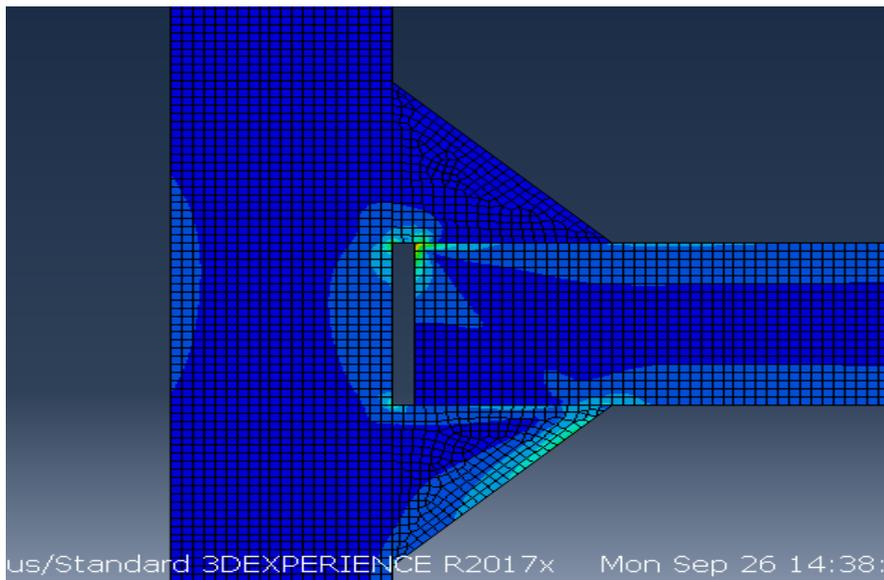
Un ensemble de 12487 éléments de contraintes planes biquadratiques à 8 nœuds et à intégration réduite sont utilisés (CPS8R) pour le maillage de la structure métallique, figure (III .3).



**Figure III.3 :** Maillage de la structure métallique

#### **III.4 Distribution des contraintes au niveau du joint de soudure :**

L'analyse par éléments finis de la structure métallique montre que la répartition de la contrainte au niveau du joint de soudure supérieur et inférieur n'est pas identique, vu que la force appliquée sur la barre horizontale induit un chargement en mode de flexion.



**Figure III.4 :** distribution des contraintes au niveau de la structure métallique

La figure III.5 montre que les contraintes sont principalement localisées au niveau de l'angle droit du cordon de soudure supérieure, avec un niveau de contrainte qui est relativement faible comparé à celui observé pour le cordon de soudure inférieure. Ce dernier est caractérisé par une forte localisation de contrainte le long du côté oblique du cordon, figure III.7-8. Ce qui montre qu'il est le plus sollicité dans la structure métallique et qu'il nécessite une analyse spécifique. Par conséquent, la suite de l'étude ne concernera que le cordon de soudure inférieure.

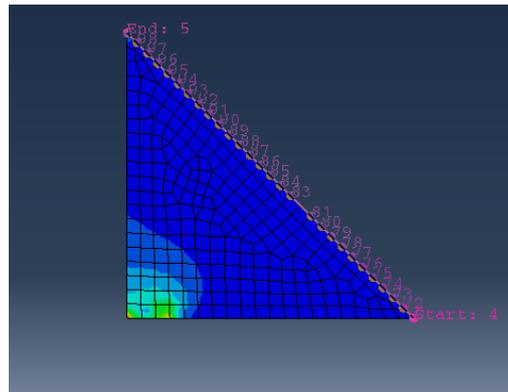


Figure III.5 : distribution des contraintes au niveau du joint de soudure supérieure

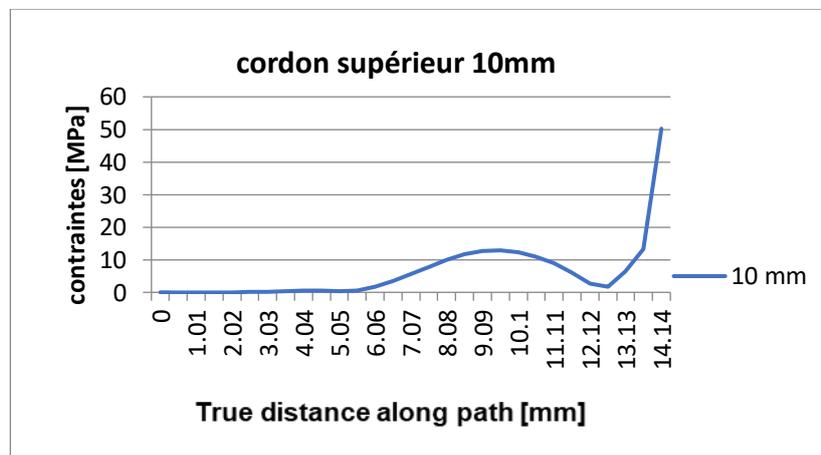


Figure III.6 : variation de la contrainte le long du côté oblique du cordon de soudure supérieure

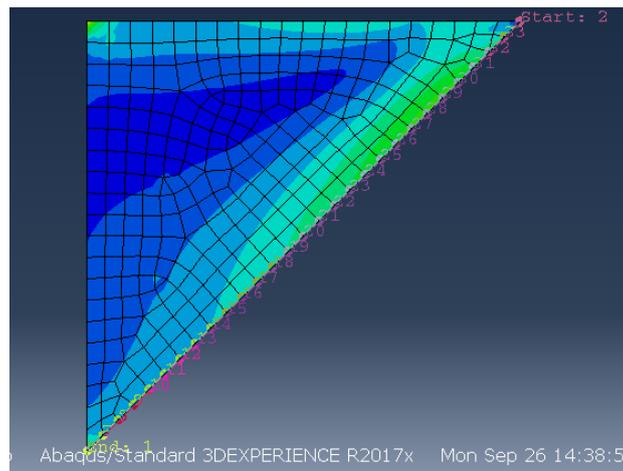


Figure III.7 : distribution des contraintes au niveau du joint de soudure inférieure

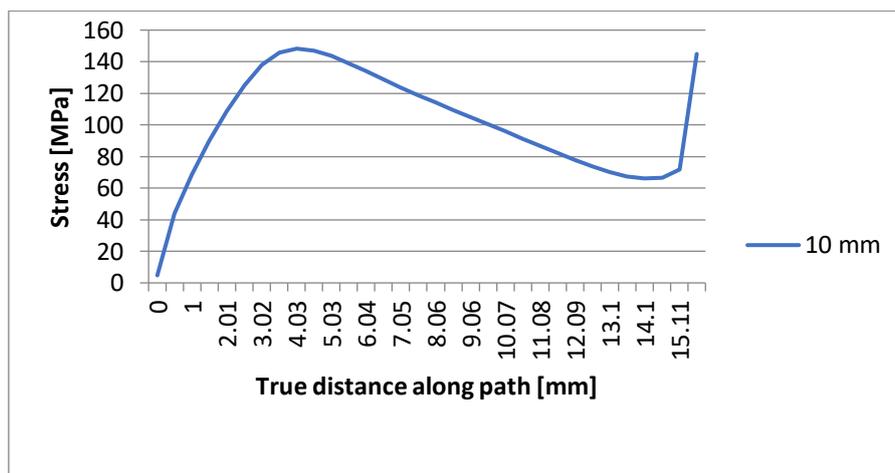


Figure III.8 : variation de la contrainte le long du coté oblique du cordon de soudure inférieure

### III.5 Effet de la taille du joint de soudure :

Afin de mettre en relief l'influence des dimensions du joint de soudure sur la répartition des contraintes le long du coté oblique, la dimension du coté horizontal et vertical du cordon de soudure est variée séparément.

#### III.5.1 Variation horizontale

La variation de la contrainte le long du coté oblique du cordon de soudure garde la même allure pour les différentes longueurs étudiées du coté horizontal. On constate également que la contrainte maximale est localisée globalement à l'extrémité inférieure du coté oblique du cordon.

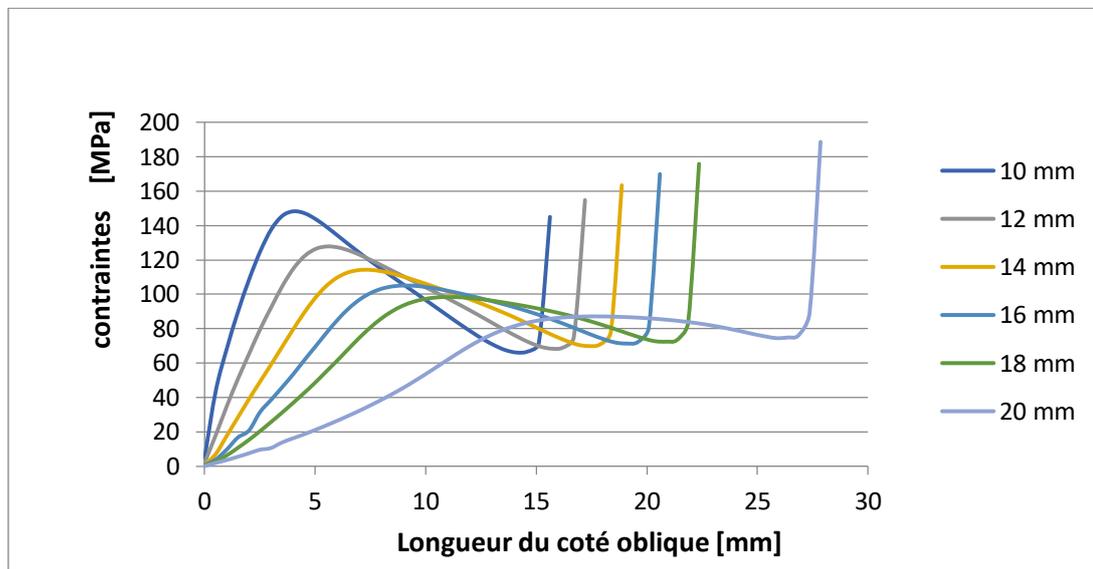


Figure III.9 : Variation de la contrainte le long du coté oblique du cordon de soudure

Après avoir obtenu la valeur maximale de la contrainte pour chaque courbe, on peut tracer l'évolution de la contrainte maximale en fonction de la taille du coté horizontal du cordon de soudure, figure III.10. On constate que la valeur maximale de la contrainte augmente avec l'augmentation de la taille du coté horizontal. Néanmoins, il faut noter que parallèlement le niveau de contrainte est en nette réduction sur l'arrête oblique du cordon de soudure, figure III.9.

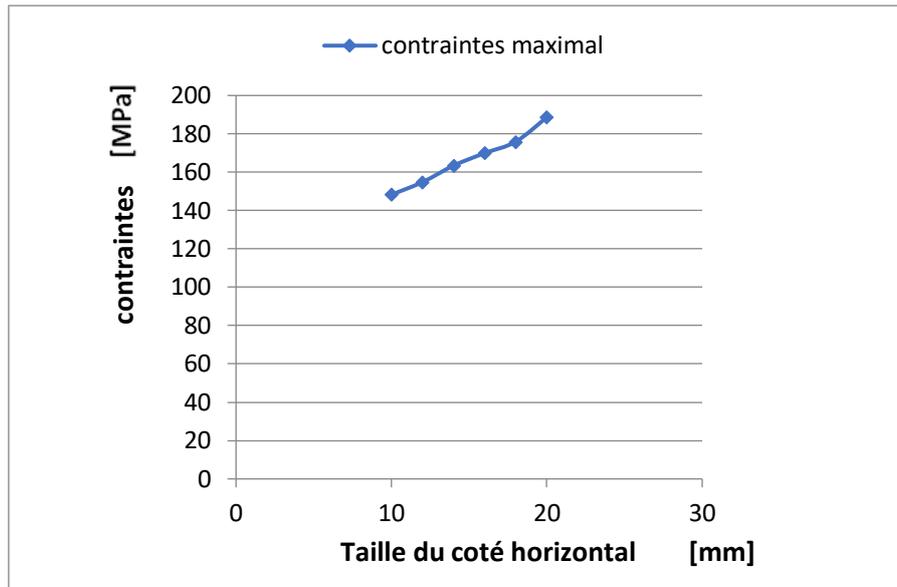


Figure III.10 : variation de la contrainte maximale en fonction de la taille du coté horizontal

### III.5.2 Variation verticale :

La variation de la contrainte le long du coté oblique du cordon de soudure semble être affectée par la taille du coté vertical du cordon de soudure. On constate également que la contrainte maximale est localisée globalement à l'extrémité supérieure du coté oblique du cordon.

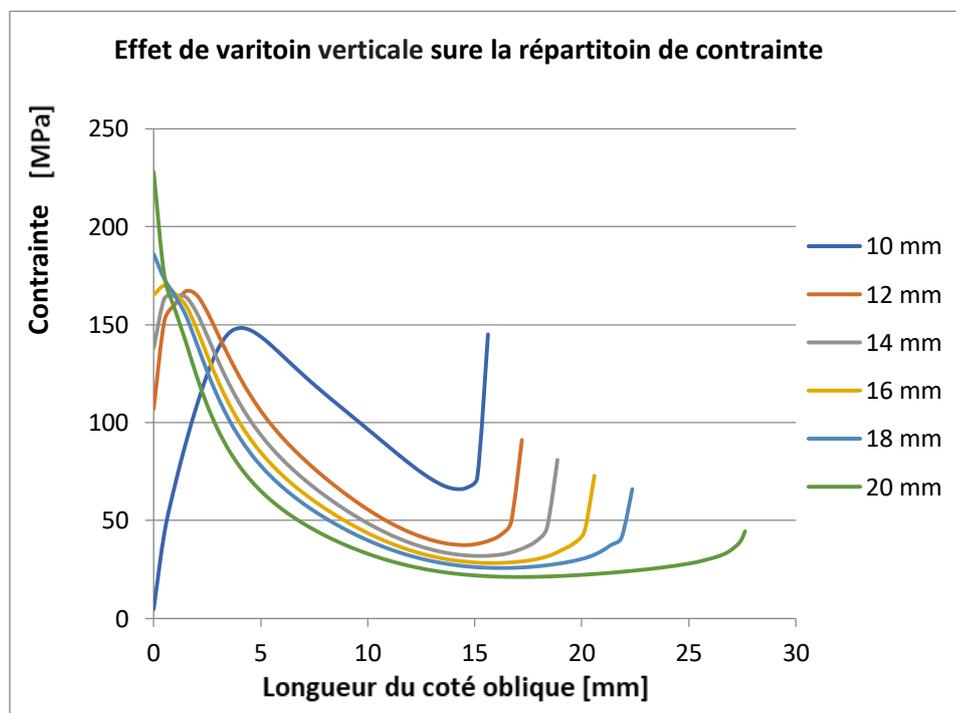
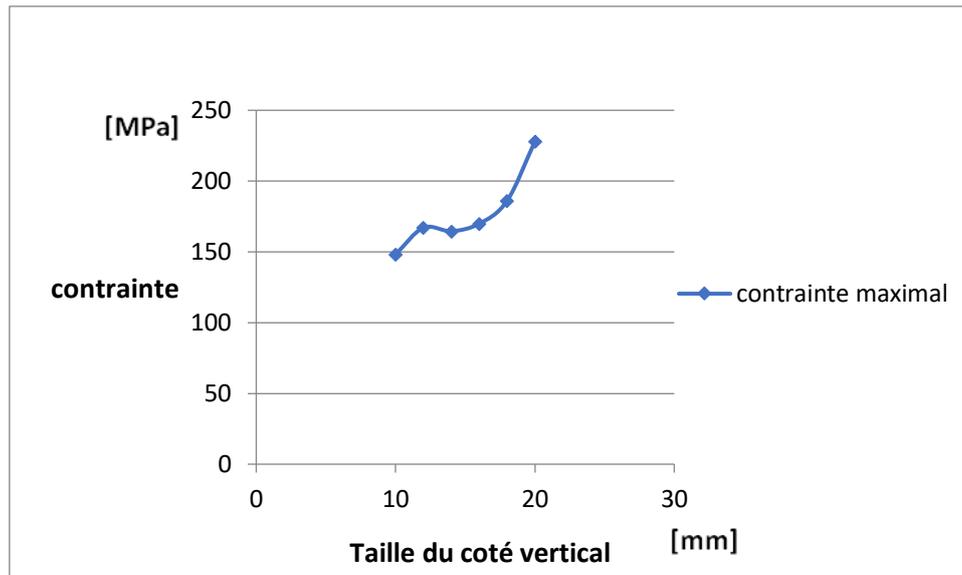


Figure III.11 : Variation de la contrainte le long du coté oblique du cordon de soudure

Après avoir obtenu la valeur maximale de la contrainte pour chaque courbe, on peut tracer l'évolution de la contrainte maximale en fonction de la taille du coté vertical du cordon de soudure, figure III.12. On constate que mise à part la taille de 20 mm du coté verticale du cordon, la valeur de la contrainte maximale demeure relativement comparable, de l'ordre de 160 MPa.



**Figure III.12 :** Variation de la contrainte maximale en fonction de la taille du coté vertical

### **III.6 Conclusion :**

La modélisation par éléments finis de la structure métallique nous permet d'évaluer les zones où des niveaux élevés de contrainte sont observés. Il en ressort de la modélisation que le cordon de soudure inférieure est le plus sollicité, particulièrement au niveau de l'arête oblique. D'autre part, la taille du coté horizontal et vertical affecte considérablement la distribution des contrainte et leur niveau.

## Conclusion générale

la méthode des éléments finis est une technique pluridisciplinaire récente, son utilisation permet de faire face aux situations les plus complexes et offre une bonne alternative aux calculs habituels de résistance des cordons de soudure.

Car il met en œuvre les connaissances de trois disciplines de base, la mécanique des structures, l'analyse numérique et la programmation. Elle résout divers problèmes de mécanique des structures et son champ d'application est en constante expansion. Son utilisation dans le calcul de la résistance des cordons de soudure permet de mieux optimiser leur forme géométrique et dimensionnelle.

nous avons appliqué la modélisation par éléments finis du joint soudé à l'aide du programme ABQUES nous a permis de constater et de conclure le point suivant :

- la répartition des contraintes au niveau du cordon de soudure,
- l'effet de la taille fait varier la valeur de la contrainte,
- L'augmentation de la taille du cordon au niveau des axes OX et OY entraîne une augmentation de la valeur de la contrainte maximale

Au final nous concluons que le cordon de soudure inférieure est le plus sollicité et la taille du coté horizontal et vertical affecte considérablement la distribution des contraintes et leur niveau.

# Bibliographie

---

- [1] Fayolle, Sébastien. "Etude de la modélisation de la pose et de la tenue mécanique des assemblages par déformation plastique." Paris: Ecole nationale supérieure des Mines de Paris (2009).
- [2] Roux, Emile. *Assemblage mécanique: stratégies d'optimisation des procédés et d'identification des comportements mécaniques des matériaux*. Diss. École Nationale Supérieure des Mines de Paris, 2011.
- [3] Thieblemont, Éric. *Modélisation du soudage par résistance par points*. Diss. Institut National Polytechnique de Lorraine, 1992.
- [4] HACHI, ABDEL AZIZ, and N. A. B. I. L. BENHAMIDOU CHE. *ÉTUDE COMPARATIVE SUR LE SOUDAGE À L'ARC ÉLECTRIQUE AVEC ÉLECTRODE ENROBÉE (SMAW) ET AVEC ÉLECTRODE RÉFRACTAIRE (GTAW)*. Diss. university of M'sila, 2021.
- [5] BENOIT, Alexandre. "Soudage à l'arc semi-automatique (MIG/MAG)." (2015).
- [6] Brochard, Michel. *Modèle couplé cathode-plasma-pièce en vue de la simulation du procédé de soudage à l'arc TIG*. Diss. Aix-Marseille 1, 2009.
- [7] Grégoire Noble(2019) Fini l'acétylène, maintenant on soude à l'eau (batiactu.com)
- [8] Marcelo B. Antunes et coll., *San Francisco/Oakland Bay Bridge Welder Study : Olfactory Function*, vol. 69 n°12, Neurology, 2007, p. 1278-1284
- [9] MUZEAU, Jean-Pierre. "Constructions métalliques-Assemblages par soudage." (2012).
- [10] Bramat, M. "Conception et calcul des assemblages soudés." Souder (Paris) 22.3 (1998): 21-27.
- [11] BERDJI MOHAMED EL BACHIR GHERIBI NOUREDDINE / Modélisation d'une Structure en matériaux isotropes par la méthode des éléments finis / Université Kasdi Merbah Ouargla Département Génie Mécanique 2018/2019
- [12] ROBERT D. COOK, DAVID S. Malkus and Michael E. plesha , « Concepts and applications of finit element analyses » .University of Wisconsin-Madison, john wiley&sons 1988.
- [13] Dr. AMIRAT Mohamed / Dr BELOUFA Mohammed Amine.«COURS ET APPLICATIONS DE LA METHODE DES ELEMENTS FINIS». Universitaire d'AinTémouchent Département de Génie Mécanique Polycopiés MEF 2021.
- [14] Abdelhak, K. A. D. A. "DES ELEMENTS FINIS." (2017).
- [15] TURNER G. ET DHATT G,«Une présentation de la méthode des éléments finis »,Eds.P.U.L.Q., France, 1981.

- [16] BATHEK.J.«Finite Element Procedures ».Prentice Hall,1996.
- [17] Advanced Finite Element Methods, University of Colorado at Boulder, 2013
- [18] ANNABELLE COLLIN ET CÉCILE DOBRZYNSKI«MAILLAGES POUR LECALCUL SCIENTIFIQUE » 2014.
- [19] BATOZ J.L. ET DHATT G, « Modélisation des structures par éléments finis.Poutres et Plaques ». Vol. 2 : élastiques, Eds Hermès, Paris, 1990.
- [20] FRE F. ET JIROUSK J, « Analyse des structures et milieux contenus, Méthode des éléments finis».Vol.6 Eds P.P.U.R., 1èreEdition, Lausanne, 2001.
- [21] Mechri, Oussama. Modélisation par éléments finis de l'usinage des pièces en alliages d'aluminium AA 7175-T74. Diss. Université Laval, 2016.