

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE SAAD DAHLEB DE BLIDA
FACULTE DES SCIENCES DE L'INGENIEUR
Département D'Aéronautique



PROJET DE FIN D'ETUDES

Pour l'obtention du diplôme

D'ingénieur d'état en Aéronautique

Option : Construction et Maintenance Aéronautique.

Spécialité : structure.

**SIMULATION NUMERIQUE DES ETUDES EXPERIMENTALES
DES CORDONS DE SOUDURE EN ALUMINIUM.**

Présentés par :

Mr. STOUTAH ABDE RAOUF.

Mr. CHEIKH BELHADJ MOHAMED.

Dirges par:

PROMOTEUR: **Mr. ALLALI ABDERRAZAK.**

CO-PROMOTEUR: **Mr. ABADA MORAD.**

Promotion: 2010/ 2011

لقد قمنا في هذا العمل بدراسة إحدى أهم الطرق (TIG) على صفيحة الألمنيوم سبيكة (2024T3) عن طريق تطبيق قوى الشد الديناميكية لامتحان مدى قوة هذا و تحتوي هذه الدراسة على تطبيق النتيجة حدود صفيح و هذا ما لم يكن موافق مع نتيجة المحاكاة الرقمية (SOLID WORKS) الذي أعطى نتائج مختلفة وهذا يعود عملية

Résumé

Ce projet propose une étude théorique et numérique avec une réalisation d'un cordon de soudure en TIG sur deux tôles bout à bout de l'alliage de aluminium 2024. Qui est utilisé beaucoup plus en aéronautique pour le fuselage des avions comme un revêtement, après avoir réalise la soudure. On a testé les cordons de soudure sure un appareil de traction pour connaitre les contraintes admissibles et les points fragile de notre tôle soudée. Et après quoi on à validé les résultats expérimentales par une étude numérique à partir de logiciel « SOLIDWORKS ». Qui nous a donné des résultats un peu différents par rapport aux résultats expérimentaux a cause de manque de l'expérience de soudages. Et enfin on peut dire que l'amélioration de notre travail et très important.

Abstract

This memory proposes a study theoretical and numerical with a realization of a weld bead in TIG on two sheets end to end of L alloy of aluminum 2024 which used much more in aeronautics for the fuselage of L plane like a coating, after having carries out welding one A tests the sour weld beads one installs traction to know working stress and the points fragile of our welded sheet and after one validated the results experimental by a numerical study from software of SOLIDWORKS which gives us results one can deferent with the results experimental because of lack of the experience of welding sand finally one can say that the improvement of our works and very significant to finish this memory.

Remerciements

Nous tenons à remercier « Dieu » le tout puissant de nous avoir donné le courage, la force et la volonté pour réaliser ce mémoire.

Nous tenons à remercier notre promoteur monsieur ALLALI .A et Co-promoteur monsieur ABADA .M qui nous a aidé et guidé durant toute la période de la réalisation de ce mémoire.

*Nous tenons à remercier encore monsieur AZIZE soudeur atelier de structure AIR ALGERIE.
monsieur AHMED soudeur atelier de structure AIR ALGERIE.
monsieur ABAH soudeur atelier de structure AIR ALGERIE.
et KARIM composite atelier de structure AIR ALGERIE.
qui nous donnent des informations et aidé au cours de la réalisation du projet fin d'étude.*

C'est pour nous autant un plaisir qu'un devoir d'exprimer notre gratitude et reconnaissance, à toutes les personnes qui ont contribué de loin ou de près à la réalisation de ce mémoire.



Dédicace

Je dédie ce modeste travail

A la mémoire des Martyrs de la nation,

A la mémoire de ma très chère mère,

A mon très chère père,

A mes sœurs, frère, et leurs enfants,

A toute ma famille proche,

A mon binôme stotah ,

*A tous mes collègues de promotion 2010/2011 en aéronautique, et mes
amis de l'enfance en El-Menia et Guerrara*

un par un.

Cheïkh Belhadj Mohamed.

DEDICACE

C'est avec une immense fierté que je dédie ce mémoire de fin d'études aux personnes les plus chères à mon cœur, celles qui m'ont offert l'amour et la volonté afin de toujours poursuivre mon idéal avec courage et honnêteté, à mes très chers parents.

Je dédie également ce mémoire à :

☞ *Ma chère mère.*

☞ *Mon cher père.*

☞ *A Mon FRERE*

☞ *A Mes Sœurs.*

☞ *A Monsieur : AZIZE... AIR ALGERIE*

☞ *A Monsieur : AHMED... AIR ALGERIE*

☞ *A Monsieur : RABAH ... AIR ALGERIE*

☞ *À Madame FATIHA -REBAHI*

☞ *A Monsieur TSABITE -ALI*

☞ *A Monsieur DAHOIADJIE -MERZAK*

☞ *A Madame ATIKA-ARIB*

☞ *A Madame LILA-LAZRAG*

☞ *A Monsieur DJELAL-FAID*

☞ *A Monsieur RAMDANE-TSAILEE*

Ames cher amis de la promotion 2010/2011

Amine tuile -Moh AKA -Rabah -Chafik -Amine ciaha-Ali-Moussa-Walid

Samir sousou-Labadi -Krimie-Redoiane- Salah tuile -Cikh med-Boutagou

Jamel zero-Khaled -Haoiarie -Amine Tlemcanie -Amine la mère- feiousa

Hicham-Elhadje

Et à toute ma promotion STRUCTURE 2010/2011

STOUTAH-ABDE RRAOUF

(SMINA)

-TABLE DES MATIÈRES-

RESUMEE	1
DÉDICACE.....	2
REMERCIEMENTS.....	4
NOMENCLATURE	5
LISTES DES FIGURES ET TABLEAUX.....	6
SOMMAIRES.....	13
INTRODUCTION GENERALE.....	14
CHAPITRE I: Généralités.....	15
I.1 SOUDAGE.....	15
I.2 ALUMINIUM	18
I.3 SOUDAGE TIG	27
I.4 CONTROLE DES CORDONS DE SOUDURE (T.I.G) PAR C.N.D.....	37
CHPITRE II : Réalisation d'un cordon de soudure et différentes essai.....	42
II.1 GENERALITES SUR ALUMINIUM.....	42
II.2 PREPARATION DES ECHANTILLION POUR SOUDAGE.....	65
II.3 OPERATION DE SOUDAGE	67
II .4 OPERATION DE LA MECROGRAPHIQUE.....	73
II.5 OPERATION D'ESSAI DE TRACTION.....	78
II.6 OPERATION DE MICROSCOPE APRES L'ESSAI DE TRACTION	86

CHPITRE III : Simulation numérique	87
III INTRODUCTION	87
III.1 LES METHODE DE DISCRECTISATIONS.....	87
III.2 LES AVANTAGES ET LES ETAPES DE SIMULATION NUMERIQUE.....	94
III.3 LE SOLID WORKS.....	94
III.4 ETAPES DE CREATION DE LA GEOMETRIE AVEC SOLID WORKS	95
III.5 GENERATION DU MAILLAGE	96
III.6 SIMULATION DES PIECES.....	97
III.7 ETUDE DE SIMULATION	98
CHPITRE IV : Interprétations des résultats	124
IV.1 INTRODUCTION.....	124
IV.2 INTERPRETATION	124
IV.3 COMPARAISENT ENTRE L’ETUDE PRATIQUE ET L’ETUDE THEORIQUE.....	126
IV.4 CONCLUSION	126
CONCLUSION GENERALE.....	127

LISTE DES FIGURES ET TABLEAUX:

Liste des figures :

Fig. (I.1) les différents procédés du soudage.....	16
Fig. (I.2) Procédé T.I.G.....	28
Fig (I.3) Variété de microstructures dans un cordon de soudure TIG.....	29
Fig. (I.4) Forces et courants de convection dans le bain de fusion de soudage TIG	31
Fig. (I.5) Représentation schématique de la vitesse de croissance en fonction de la vitesse de Soudage	32
Fig(II.1) : Guioutine.....	66
Fig(II.2) : Préparation Chanfrein de Forme V.....	67
Fig(II.3) : Poste de Soudage TIG.....	68
Fig(II.4) : Torche Utilisé pour Soudage TIG.....	69
Fig(II.5) : Préparation de Soudure avec Protection ep 2 mm.....	72
Fig(II.6) : Opération de Soudage TIG ep 2mm.....	72
Fig (II.7) Fixation de tôle entre eux par des points soudure ep 2 mm.....	72
Fig (II.8) Cordon de Soudure tôle ep 2 mm.....	72
Fig (II.9) Pénétration de Cordon de Soudure ep 2 mm.....	72
Fig(II.10) : ENROBEUSE.....	73
Fig(II.11) : Talons de Soudure enrobe par la Résine ep2 mm.....	73
Fig(II.12) : POLISSEUSE.....	74
Fig(II.13) : 1 ^{er} Etape de Polissage.....	74
Fig(II.14) : 2 ^{eme} Etape de Polissage.....	75

Fig(II.15) : 3 ^{eme} Etape de Polissage (FINITION).....	75
Fig(II.16) : Après Polissage Cordant de Soudure Enrobe par la Résine ep2 mm.....	75
Fig(II.17) : MICROSCOPE.....	76
Fig(II.18) : Photo Microscope de Tôle ep (20/10) mm 500x.....	76
Fig(II.19) : Photo Microscope de Cordon de Soudure ep 2 mm 500x.....	77
Fig(II.20) : Photo Microscope de la Zone Aferte Thermique ep 2 mm 500x.....	77
Fig(II.21) : MACHINE DE TRACTION.....	81
Fig(II.22) : Eprouvettes pour essai de traction ep (20/10) mm.....	82
Fig(II.23) : Eprouvette dans la machine traction ep 2 mm.....	83
Fig(II.24) : Eprouvette au cours l'essai de traction ep 2 mm.....	83
.Fig(II.25) :L'échantillon sur microscope.....	86
Fig(II.26) : Photo Microscope de la zone affecté thermique ep 2 mm 500x.....	86
Fig(II.27) : Photo Microscope de Cordant de Soudure ep 2 mm 500x	86
Fig (III.1) - Maillage 1D.....	90
Fig (III.2) : Demi-pièce chanfreinée avec un angle de 30 degré.....	96
Fig (III.3) : Assemblage les deux pièces sont cordon de soudure crée chanfrein de forme V.....	96
Fig (III.4) : Assemblage des deux pièces avec cordon de soudure de forme V	96
Fig (III.5) : Maillage de la pièce.....	97
Fig(III.6) Préparation à la simulation.....	98
Fig (III.7) : Assemblage1-Etude 1-Qualité de maillage-Qualité de maillage1.....	107
Fig(III.8) : Contraintes nodale-Contraintes1.....	109

Fig(III.9) : Déplacements statique-Déplacements1	109
Fig (III.10) : Déformations statique -Déformations1	110
Fig (III.11) : Coefficient de sécurité-Coefficient de sécurité1	110
Fig (III.12) : Maillage-qualité maillage 1	120
Fig (III.13) : Contraintes nodale-Contraintes.....	121
Fig (III.14) : Déplacements statique-Déplacements1	122
Fig (III.15) : Déformations statique-Déformations1	122
Fig (III.16) : Coefficient de sécurité-Coefficient de sécurité1	123

Liste des tableaux :

Tableau (I.1) les méthodes d'amélioration des propriétés mécaniques	23
Tableau (I.2) Normalisation des états métallurgiques	23
Tableau(I.3) Subdivisions de l'état écroui	24
Tableau(I.4) Eléments d'alliage pour améliorer certaines propriétés du produit final...24	
Tableau(I.5) Familles d'alliages aluminium principales (Association Aluminium).....25	
Tableau (I.6) les qualités des alliages de fonderie	26
Tableau(I.7) Paramètres de soudage	30
Tableau(II.1) Production d'Aluminium	43
Tableau(II.2) La charge de rupture en fonction de la température.....	46
Tableau(II.3) Les différentes séries d'aluminium.....	48
Tableau (II. 4) Alliages non trempant.....	49
Tableau (II. 5) Les caractéristiques mécaniques de l'alliage.....	49
Tableau (II. 6) Désignation des états obtenues en France et en Europe	50

Tableau (II. 7) Désignation des normes	51
Tableau (II. 8) Les caractéristiques typiques des alliages et des états de livraison.....	52
Tableau (II. 9) Les caractéristiques mécaniques.....	53
Tableau (II. 10) Les alliages - états les plus adaptés à l'usinage.....	55
Tableau (II. 11) Les alliages - états les plus utilisés.....	57
Tableau (II. 12) Les alliages - états utilisés.....	57
Tableau (II. 13) Les alliages contenant du cuivre sont plus difficilement anodisables.....	59
Tableau (II. 14) Résistance à haute et basse température.....	60
Tableau (II. 15) Résistance à haute et basse température.....	60
Tableau (II. 16)) Mécanique générale.....	60
Tableau (II. 17) Aéronautique et armement.....	61
Tableau (II. 18) Chimie, produits alimentaires.....	61
Tableau (II. 19) Electricité.....	61
Tableau (II. 20)) Transport.....	62
Tableau (II. 21)) Sport.....	62
Tableau (II. 22) Traitements thermiques.....	64
Tableau (II. 23) Choix des électrodes tungstène.....	70
Tableau (II. 24) Choix des buses.....	70
Tableau (II. 25) Paramètre de Soudage.....	71
Tableau (II. 26) Paramètre de l'essai de traction.....	82
Tableau (II. 27) Tableaux du résultat obtenu pour la 1 ^{ère} manipulation.....	84
Tableau (II. 28) Tableaux du résultat obtenu pour la 2 ^{ème} manipulation.....	85

Etude de la simulation1

Tableau (III. 1) Informations sur le modèle	99
Tableau (III. 2) Propriétés de l'étude	100
Tableau (III. 3) Unités	100
Tableau (III. 4) Propriétés du matériau	101
Tableau (III. 5)) Propriétés d'aluminium	102
Tableau (III. 6) les données de l'alliage utilisé.....	103
Tableau (III. 7) les coefficients de l'alliage utilisé.....	104
Tableau (III. 8) Déplacement imposé	105
Tableau (III. 9) Chargements	105
Tableau (III. 10) Contact.....	105
Tableau (III. 11) Informations sur le maillage.....	106
Tableau (III. 12) Forces de réaction.....	106
Tableau (III. 13) Forces externes	106
Tableau (III. 14) Moments externes.....	107
Tableau (III. 15) résultats sur le maillage.....	108

Etude de la simulation2

Tableau (III. 16) Informations sur le modèle.....	112
Tableau (III.17) Propriétés de l'étude.....	113
Tableau (III. 18) Unités.....	113
Tableau (III. 19) Propriétés du matériau.....	114
Tableau (III. 20)) Propriétés d'aluminium	115

Tableau (III. 21) les donnes de l'alliage utilisé.....	116
Tableau (III. 22) les coefficient de l'alliage utilise	117
Tableau (III. 23) Déplacement imposé.....	118
Tableau (III. 24) Chargements.....	118
Tableau (III. 25) Contact.....	118
Tableau (III. 26) Informations sur le maillage.....	119
Tableau (III. 27) Forces de réaction.....	119
Tableau (III. 28) Forces externes.....	119
Tableau (III. 29) Moments externes.....	120
Tableau (III. 30) résultats sur le maillage.....	121

INTRODUCTION GENERALE :

Parmi les problèmes qui rencontrent les constructeurs en aéronautique ou mécanique c'est le problème d'assemblages des pièces mécaniques.

En fait l'assemblage par plusieurs méthodes mais en choisie la méthode qui garde les performances les plus élever pour la structure faces aux efforts dynamique (traction , torsion, flexions, flembment, compression).

Dans notre travail nous avons réalisé une étude pratique et théorique dans un domaine très important et très large qui est la construction mécanique c'est l'assemblage entre deux objets métallique (soudage, rivetage, assemblage par boulon et par vis, brassage, collage, etc.), dans notre projet nous allons nous intéresser a l'assemblage par soudage

Il ya plusieurs type de soudage :

- Soudage électrique à l'arc.
- Soudage par point.
- Soudage par résistance.
- Soudage aux gaz.....etc.

Dans notre étude nous avons choisir le type de soudage selon les conditions suivante :

- Le manque des ouvre études ce genre de soudage dans les bibliothèques.
- Utilisations l'aluminium dans l'aéronautique.
- L'intérêt de soudage en construction mécanique.
- Disponibilité des moyens de soudage avec les moyens de traitements de notre cordon de soudure.

Nous nous intéressons ici aux procédés de soudage en TIG, les procédés gaz utilisé, la vitesse de soudage, résistance électrique, etc. ne seront pas traités.

Le montage des pièces à souder sera abordé selon les deux aspects suivants :

- préparation en atelier des pièces à souder, en ce qui concerne l'accostage des bords, les moyens de maintien des pièces pendant le soudage, et le bridage.

vis-à-vis des déformations :

- description des machines et outillages de mise en mouvement des pièces et des torches de soudage, en vue d'une automatisation de l'opération (chariots sur poutres ou positionneurs, vireurs, potences, tours, rails, etc.).

Ce projet de fin étude a pour but de réaliser des pièces en aluminium type 2024 T3 spécialisé dans le domaine aéronautique assemblées avec un cordon de soudure par la procédure T.I.G avec des normes internationales.

Et en fait, sur ce cordon de soudure, les essais de traction, on obtient des résultats qu'on va comparer avec une simulation numérique faite par le logiciel « SOLID WORKS ».

Notre étude est constituée d'une introduction et d'une conclusion ainsi que les quatre chapitres sont :

Chapitre I : Généralité.

Chapitre II : Réalisation d'un cordon de soudure et différents essais.

Chapitre III : Simulation numérique.

Chapitre IV : Interprétations des résultats.

NOMENCLATURE :

: contrainte normale en MPa ou N.mm

N : effort normal en N

S : aire de la section droite en mm

: allongement relatif (sans unite)

a : Déformation latérale

L : Déformation axiale

: coefficient de poisson

E : module d'élasticité

: La densité du fluide

\vec{v} : Le vecteur de vitesse $\left(\vec{v} = v_x \vec{i} + v_y \vec{j}\right)$.

\vec{A} : Le vecteur l'aire de la surface.

Γ_Φ : Le coefficient de diffusion de la grandeur .

$grad$: Le gradient de $\left(grad\Phi = \vec{\nabla} = \frac{\partial\Phi}{\partial x} \vec{i} + \frac{\partial\Phi}{\partial y} \vec{j} \right)$ en 2D.

S_Φ : Le terme source (la source de par unité de volume).

N_{faces} :Le nombre de faces (interfaces) du volume de contrôle.

f : La valeur de transférée par convection à travers l'interface f .

v_f : Le flux de masse a travers l'interface f .

A_f : L'aire de l'interface f $\left(\left|\vec{A}\right| = \left|A_x \vec{i} + A_y \vec{j}\right|\right)$ en 2D.

$\left(\vec{\nabla}\Phi\right)_n$:La valeur de $\vec{\nabla}\Phi$ normal (perpendiculaire) à l'interface f

V :Le volume du volume de contrôle (VC).

Chapitre I

Généralités

I.1 SOUDAGE :

I.1.1 HISTORIQUE DU SOUDAGE :

Depuis l'apparition de l'être humain sur terre, ce dernier a toujours essayé de faciliter son existence. De là, à travers les ères des techniques ont été inventées, pour éliminer les problèmes qui s'imposaient, citant parmi eux la technique d'assemblage qui était un impact à résoudre.

De l'histoire du soudage quelques étapes clés :

- L'origine du soudage remonte à l'âge des métaux :
 - à l'âge de bronze on soudait à la poche
 - à l'âge de fer on soudait à la forge.

- Jusqu'au milieu du 19ème siècle, les procédés de soudage évoluent peu. Vers 1850 on commence à se servir du gaz pour chauffer les métaux à souder.

Début du 20ème siècle : le soudage se répand dans tous les secteurs industriels.

Le soudage devient indissociable du développement de nombreux secteurs économiques .

Dans les années trente, le champ d'application du soudage s'élargit : construction navale, automobile, aéronautique. Pendant des années, le soudage ne cesse d'évoluer sur le plan technologique.

- Industrialisation de principes physiques : faisceau d'électrons, soudage au laser et aux ultrasons.

- Découvertes involontaires : le soudage par explosion et par diffusion.

- Introduction croissante de la micro-électronique dans les équipements de soudage et développement de la robotisation, d'où une amélioration de la qualité et de la productivité.

Depuis ces dix dernières années, les innovations portent moins sur les procédés eux mêmes, mais sur le matériel de soudage et les matériaux d'apport, ainsi que sur les méthodes et conditions de travail, qui continuent de s'améliorer, notamment en matière d'hygiène et de sécurité.

Au temps actuel, on estime que 60% à 80% de la production mondiale de l'acier est destinée à la fabrication des produits soudés, la technique s'est bien développée car maintenant on peut souder presque tous les métaux et alliages utilisés dans l'industrie moderne de différentes épaisseurs même les plus faibles. [1]

I.1.2 DEFINITION DE SOUDAGE :

Le soudage est une opération de micro métallurgie consistant à exécuter un cordon fondu liant les bords de deux pièces ; il est dit homogène quand ces deux pièces, ainsi que le métal d'apport du joint, ont une composition chimique identique ou voisine, et hétérogène dans les autres cas.

Le soudage nécessite un apport de chaleur, toutes les sources d'énergie peuvent être utilisées : chimique (flammes), lumineuse (laser), électrique (arc) ou mécanique (friction).

I.1.3 LES DIFFERENTES PROCÉDES DE SOUDAGE :

En général, on peut aisément classer les différents procédés de soudage en fonction des énergies mises en œuvre comme présenté sur la (figure I.1).

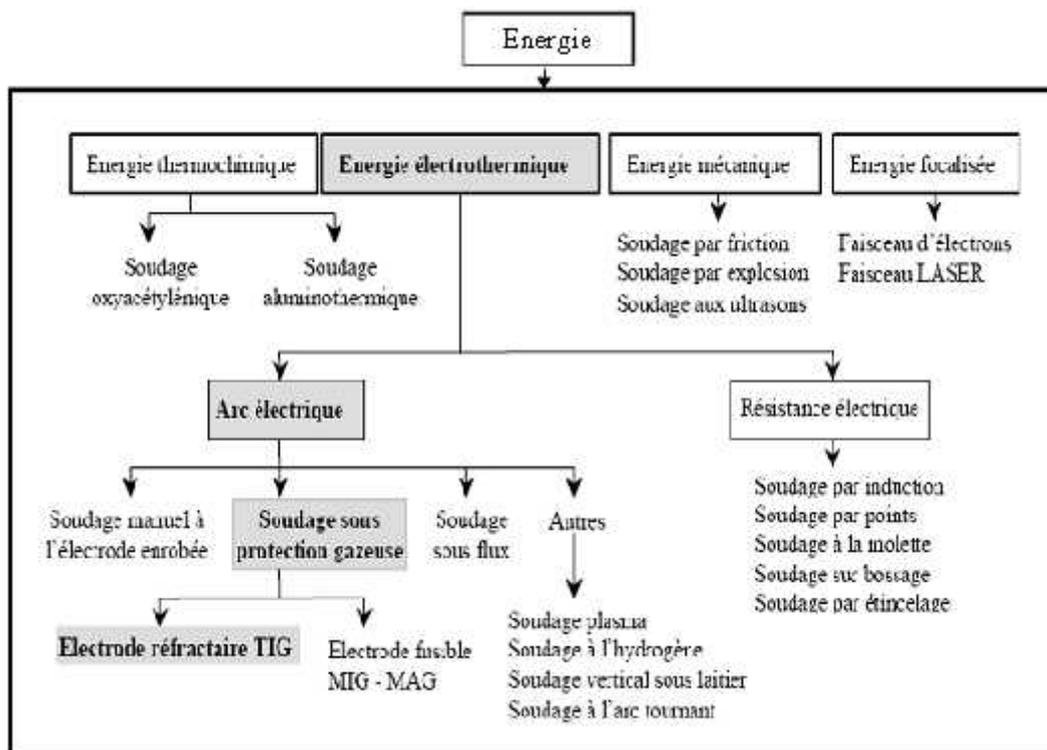


Figure (I.1) - les différents procédés du soudage.

Ce sont les procédés de soudage à l'arc qui sont les plus répandus dans l'industrie et tout particulièrement dans la construction métallique. Le choix du procédé le plus adapté dépend de très nombreux paramètres, à la fois techniques et économiques.

I.1.3.1 SOUDAGE A L'ARC :

A/ Définition :

Le soudage à l'arc est un terme générique au cours duquel un arc électrique est créé entre une électrode et les pièces à assembler afin de conduire à une fusion superficielle et à la formation d'un bain de métal fondu qui se solidifie sans action extérieure. [2]

B/ Les principaux procédés à l'arc :

Le choix d'un procédé, en vue de l'exécution d'un joint soudé, nécessite la connaissance des principaux procédés et leurs applications générales, ce choix doit répondre aux exigences d'ordre mécanique, métallurgique, économique,....etc. [2]

C/ Le soudage à l'électrode enrobée ou "S.A.E.E " :

Dans ce procédé, une électrode métallique est enrobée de fondant et reliée à un générateur alternatif ou continu. Le métal à souder est relié à l'autre borne de cette même source de courant. En plaçant la pointe de l'électrode sur le métal puis en retirant, un arc électrique se forme . [2]

D/ Le procédé M.I.G / M.A.G :

Découvert au cours de la Deuxième Guerre mondiale, de l'anglais MIG "Métal Inert Gas" et MAG "Métal Active Gas". Procédés de soudage à l'arc sous protection gazeuse avec fil continu fusible, dans lesquels le bain de fusion et le métal chaud sont protégés de l'air ambiant par une enveloppe de gaz inerte (MIG) ou actif (MAG), canalisée par une buse entourant le fil. Ce procédé est encore appelé "semi-automatique" par les soudeurs. [2]

E/ Le soudage avec une électrode réfractaire :

L'électrode non consommable est constituée d'une pointe de tungstène portée par une torche dotée d'une arrivée annulaire d'un gaz protecteur. On nomme aussi cette technique Tungstène Inert Gaz «**T.I.G**».

F/ Le soudage à arc submergé sous flux solide :

Un flux en poudre est versé en talus autour du fil de l'électrode. L'arc jaillissant à l'intérieur du flux solide en grains est ainsi protégé de l'oxydation et d'un refroidissement trop rapide.

I.2 ALUMINIUM :**I.2.1 Historique :**

- **En 1825** que le chimiste **Danois Hans Christian ØRSTED** isola l'aluminium pour la première fois, par une réaction chimique impliquant un amalgame au potassium.
- **Entre 1827 et 1845**, le chimiste **Allemand Friedrich WOHLER** améliora le procédé d'ØRSTED en utilisant le potassium métallique. Il fut le premier à mesurer la densité de l'aluminium et à montrer sa légèreté.
- **En 1854** en France, **Henri SAINTE-CLAIRE DEVILLE** obtint un métal (**CHLORURE DOUBLE D'ALUMINIUM ET DE SODIUM**) réduit par le sodium. Aidé par le soutien financier de Napoléon III, Deville créa une usine expérimentale et exposa l'aluminium pur à l'Exposition internationale de Paris en 1855.
- **En 1886**, **Paul HEROULT**, en France et, quelques mois plus tard **Charles MARTIN HALL**, aux États-Unis, découvrirent, indépendamment, que l'oxyde d'aluminium, ou alumine, se dissolvait dans la cryolite et pouvait ensuite être décomposé par électrolyse pour donner le métal brut en fusion.
En 1887 création de la Société Electrométallurgique Française, elle met en place un an plus tard , à Froges dans l'Isère, une usine équipée des premières cuves de fabrication industrielle d'aluminium électrolytique existant en France.

- **En 1887 Carl-Joseph BAYER**, chimiste Allemand, fait breveter un procédé de transformation du minerai de bauxite en alumine.
- **1887** créations de la Société Electrométallurgique Française, elle met en place un an plus tard, à Froges dans l'Isère, une usine équipée des premières cuves de fabrication industrielle d'aluminium électrolytique existant en France.
- Aujourd'hui, le procédé **Paul HEROULT** est toujours la méthode fondamentale utilisée dans la production d'aluminium.
- C'est en France, aux Baux de Provence que fut découverte la bauxite, matière première de l'aluminium, par **Pierre BERTHIER en 1821**. La France fut au début du siècle le premier producteur mondial de minerais, avant les grandes exploitations à ciel ouvert, notamment en Afrique, en Australie et en Jamaïque.
- **En 1860**, l'usine de Salindres, dans le Gard, fut pratiquement la seule au monde, pendant 30 ans à produire de l'aluminium selon le procédé de **SAINTE-CLAIRE DEVILLE**
- **En 1890** l'usine de Froges fabrique 30 tonnes d'aluminium, selon le procédé de **Paul HEROULT**, les cuves appelées "marmites" étaient traversées par un courant de 4 000 ampères.
- Afin d'obtenir l'énergie nécessaire pour alimenter les usines, l'industrie de l'aluminium s'installe en montagne à proximité des chutes d'eau.
En France, c'est dans les Alpes et dans les Pyrénées que les usines de production d'aluminium s'installent.
- **En 1907**, à **Saint-Jean de Maurienne**, démarre la construction d'une des plus importantes usines de transformation de l'aluminium, dotée de cuves de 10 00 ampères.

- **1992**, mise en service de l'usine de Dunkerque, mettant en œuvre la première application à grande échelle des cuves de 300 000 ampères, pouvant produire 215 000 tonnes d'aluminium
- L'aluminium coûtait cher à produire. Il fut d'abord un métal semi-précieux, son prix était comparable à celui de l'argent et on l'utilisait principalement pour l'orfèvrerie, l'horlogerie et pour les objets religieux.
- Grâce à sa densité, l'aluminium prit une part importante dès 1914, dans l'industrie aéronautique et aérospatiale. On utilisa l'aluminium dans la construction des avions, dirigeables...
- **En 1947**, l'aluminium fit son apparition sur les premières voitures de série, sur les chaînes de fabrication de la DYNA PANHARD, conçue par l'ingénieur J.A GREGOIRE. L'aluminium fut ensuite utilisé pour la fabrication des cycles, chemin de fer, l'aéronautique,...
- C'est avec les casseroles, que pénètre dès le début du siècle, l'aluminium dans les foyers, puis le papier aluminium et les emballages alimentaires.
- Aujourd'hui, l'aluminium est devenu indispensable dans la construction des avions et des engins spatiaux. Il est également utilisé par tous les constructeurs automobiles et ferroviaires.

L'utilisation de l'aluminium dans l'architecture est de forte croissance tant dans les maisons individuelles que dans les immeubles et les bâtiments industriels. L'aluminium est présent dans les édifices publics et les réalisations de prestige: Pyramide du Louvre, Arche de la Défense, Bâtiment des Droits de l'Homme, La Très Grande Bibliothèque,...

Les emballages d'aujourd'hui utilisent l'aluminium, 155 milliards de boîtes de boissons ont été consommées en 1994. Il est aussi utilisé pour les boîtes de conserves, les opercules, les tubes, les aérosols, les emballages souples,...

L'aluminium s'est imposé dans le domaine électrique où il remplace les métaux traditionnels.

La quasi-totalité des câbles de transport et de distribution d'énergie sont en aluminium ou en alliages d'aluminium.

I.2.2 Définition :

C'est un métal argenté et malléable. Il est remarquable pour sa résistance à l'oxydation et sa faible densité. En fait, il est très oxydable mais à l'air, il se forme une couche de quelques micromètres d'oxyde d'aluminium (Al_2O_3) imperméable qui protège le reste du métal et qui se reforme très rapidement.

L'aluminium est un élément abondant dans la croûte terrestre mais il se trouve rarement sous sa forme pure. C'est le troisième élément le plus abondant dans la croûte terrestre (8 % de la masse) après l'oxygène et le silicium. L'aluminium est très difficile à extraire des roches qui le contiennent et a donc été longtemps très rare et précieux. [4]

I.2.3 Principales caractéristiques de l'aluminium :

L'aluminium et ses alliages arrivent en seconde position pour l'utilisation des matériaux métalliques. L'aluminium doit cette place à un ensemble de propriétés qui en font un matériau remarquable. [4]

I.2.4 Masse volumique :

La masse volumique de l'aluminium est de 2700 kg/m^3 . L'utilisation de l'aluminium s'impose donc dans les domaines de la construction aéronautique et du transport.

I.2.5 Résistance à la corrosion :

Grâce à la couche d'oxyde qui se forme en surface, les alliages d'aluminium résistent à la corrosion. On peut rendre cette couche protectrice d'oxyde plus épaisse par anodisation. L'aluminium et ses alliages peuvent alors être utilisés sans protection supplémentaire comme revêtements extérieurs de bâtiments. Par contre, dans les milieux corrosifs, les alliages d'aluminium peuvent subir les effets de la corrosion. Des piqûres, de la corrosion sous

contrainte, de la fatigue corrosion, voire de la corrosion généralisée peuvent se développer. Pour des conditions données, la sévérité de l'attaque dépend de l'alliage utilisé et de son état. [

I.2.6 La conductibilité électrique :

La conductibilité électrique de l'aluminium commercialement pur atteint 62 % de celle du cuivre. Par ailleurs, la masse volumique du cuivre est plus élevée que celle de l'aluminium. Un conducteur en aluminium, dont la masse est inférieure à celle d'un conducteur en cuivre, s'échauffe moins.

I.2.7 Propriétés mécaniques :

L'aluminium commercialement pur possède, à l'état recuit, des propriétés mécaniques faibles. On peut toutefois améliorer considérablement ces propriétés par écrouissage, addition d'éléments d'alliage ou traitements thermiques, selon les cas. L'aluminium et ses alliages ont une structure cristalline cubique à faces centrées. Ils font donc preuve, à l'état recuit, d'une excellente ductilité à toute température.

I.2.8 Propriétés de mise en forme :

L'aluminium a une température de fusion relativement basse, d'environ 660°. Il en résulte une facilité de fusion qui présente un avantage certain pour les opérations de fonderie. L'aluminium est très ductile, on peut aisément le mettre en forme à l'état solide, par déformation plastique.

Les alliages peuvent être mis en forme selon deux techniques.

* Mise en forme par corroyage. Elle concerne les demi-produits et les produits finis. On travaille par déformation à chaud des lingots, des billettes ou des brames de coulée continue.

*Mise en forme par fonderie.

Pour les alliages corroyés, une distinction est faite entre les alliages non trempants et les alliages trempants, (Tableau I.1) :

Les méthodes d'amélioration des propriétés mécaniques.**Tableau (I.1)**

Catégorie d'alliages	Méthodes d'amélioration des propriétés mécaniques
non trempants	addition d'éléments en solution solide, présence de secondes phases dispersées, <u>écrouissage</u>
trempants	<u>durcissement structural</u>

I.2.9 Etats métallurgiques :

On peut obtenir des alliages d'aluminium en divers états: recuits, écrouis ou trempés et vieillis. On désigne le plus souvent ces différents états par des symboles, (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**)

Ces désignations s'appliquent aussi bien aux alliages corroyés qu'aux alliages de fonderie.

Normalisation des états métallurgiques**Tableau (I.2)**

Symbole	ETAT DE BASE
F	Brut de fabrication
O	Recuit
H	Ecroui
T	Traité thermiquement
W	Trempé et non stabilisé

Les états F et O n'ont pas de subdivisions, au contraire des états H et T.

Subdivisions de l'état H : elles sont décrites par au moins deux chiffres. Le 1^{er} indique le traitement post-écrouissage, le second l'état de dureté de l'alliage Tableau (I.2)

Subdivisions de l'état écroui.**Tableau (I.3)**

1^{er} chiffre
1 : Ecrouissage, autre traitement supplémentaire non indiqué
2 : écrouissage puis restauration
3 : écrouissage puis stabilisation
2^{ème} chiffre
Hx2 : état quart dur
Hx4 : état demi dur
Hx6 : état trois-quarts dur
Hx8 : état dur
Hx9 : extra dur

I.2.10 Alliages d'aluminium :

L'aluminium est en majeure partie utilisé sous forme d'alliages d'aluminium pur et d'autres éléments pour en améliorer les propriétés mécaniques, principalement sa dureté et sa résistance à la corrosion.

Eléments d'alliage pour améliorer certaines propriétés du produit final. Tableau(I.4)

ELEMENT D'ALLIAGE	ROLE
Fe	Renforce la dureté
Si	Plus grande robustesse en liaison avec le magnésium
Cu	améliore les propriétés mécaniques, réduit la résistance à la corrosion
Mn	Améliore les propriétés mécaniques, modifie la qualité d'emboutissage profond
Mg	Haute résistance après formage à froid
Cr	Plus grande résistance en liaison avec des éléments tels que le cuivre, le manganèse et le magnésium
Ti	Plus grande résistance
Zn	Réduit la résistance à la corrosion

A/ Alliages corroyés :**A-1/ Désignations des alliages :**

Nous désignerons les alliages d'aluminium corroyés suivant les normes de l'Aluminium Association des Etats-Unis. Ces normes affectent à chaque type d'alliage un nombre de quatre chiffres qui permet de les classer en séries. Nous traiterons des alliages non trempants des séries 1000, 3000 et 5000. Ensuite, les alliages à durcissement structural des séries 2000, 6000, 7000 et seront vus (Tableau I.5).

Familles d'alliages aluminium principales (Association Aluminium) Tableau (I.5)

Alliages avec leurs principaux éléments	Séries	Applications typiques
99,00% min aluminium	1XXX	feuilles, lithographie, tôles
Cuivre	2XXX	Aéronautique
Manganèse	3XXX	canettes, radiateurs de construction
Silicone	4XXX	échangeurs de chaleur et ingénierie
Magnésium	5XXX	canettes, automobile, façades, bâtiment, transport
Magnésium et silicone	6XXX	automobile, bâtiment, transport
Zinc	7XXX	aéronautique, radiateurs
Autres éléments	8XXX	feuilles (Fe), aéronautique (Li)

B/ Alliages de fonderie :**B-1/ Qualités recherchées :**

Les qualités qu'on recherche pour un alliage de fonderie sont différentes de celles d'un alliage corroyé. Les zones à usiner exceptées, les pièces de fonderie ont leur forme définitive

après démoulage. Par ailleurs, elles ne subissent aucune déformation plastique. Les propriétés de ces alliages découlent des opérations de fonderie, (Tableau I.6)

Dans de nombreux cas, on peut également effectuer la coulée dans des moules en sable ou en matériau réfractaire. On comprend que les microstructures dépendent de la vitesse de solidification. Ces microstructures influent les propriétés mécaniques. Ce temps de solidification est fonction du type de moule utilisé.

Dans les moules métalliques, la solidification se produit beaucoup plus rapidement que dans les moules en sable. Il en résulte une structure plus fine (distance inter dendritique, taille des composés intermétalliques) qui entraîne une amélioration des propriétés.

Les qualités des alliages de fonderie

Tableau (I.6)

Qualités	Observations
Coulabilité	Aptitude du métal liquide à bien remplir l'empreinte
Absence de formation de criques	Fissuration à chaud causée par le retrait du métal
Bonne répartition de la porosité	Due au retrait qui accompagne la solidification
Températures de fusion relativement basses	Permettent d'employer des moules métalliques réutilisables (des coquilles) dans lesquels on coule le métal soit par gravité, soit sous pression

Les alliages d'aluminium de fonderie ont en général des teneurs plus fortes en éléments d'alliages. Ceci permet, d'obtenir une proportion non négligeable d'eutectique. D'autres buts de ces teneurs fortes sont d'abaisser le point de fusion et diminuer l'intervalle de solidification.

B-2/ Désignation des alliages :

Cette normalisation selon les normes de l'Aluminium Association est donnée.

Dans ce système, les alliages d'aluminium de fonderie sont groupés par leurs éléments principaux d'addition. On utilise un nombre à quatre chiffres avec un point séparant les deux derniers.

I.3 SOUDAGE TIG :**I.3.1 Définition :**

Le terme "TIG" est l'abréviation de « Tungsten Inert Gas » et sert à désigner le procédé de soudage en atmosphère inerte avec électrode de tungstène aussi appelée "G.T.A.W." (gas tungsten arc welding).

Ce procédé utilise un arc électrique entre une électrode réfractaire de tungstène et la pièce à souder. Un gaz inerte protège la zone de métal en fusion contre l'air ambiant durant le soudage. (**figure I .2**).

Le métal d'apport peut être ou ne pas être utilisé. Lorsque l'on a besoin de métal complémentaire, on utilise une baguette d'apport qui vient alimenter le bain de fusion remplissant ainsi le joint à souder. La technique de soudage utilisée est la même que pour le procédé de soudage oxyacétylénique. Pendant qu'une main tient la torche pour amener le métal de base en fusion, l'autre tient la baguette et alimente le bain de fusion. [3]

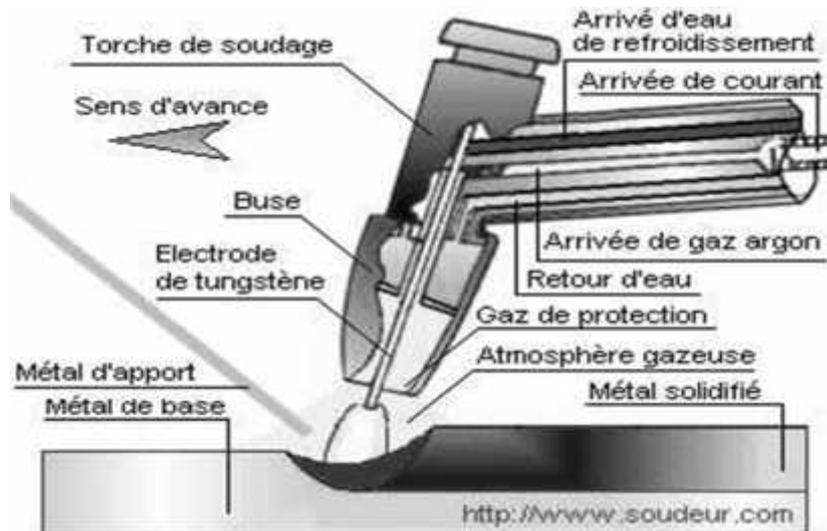


Figure (I.2) : Procédé T.I.G.

I.3.2 PRINCIPLE DE SOUDAGE TIG :

Le principe de soudage “TIG” est simple, puisque la torche électrique est conçue pour alimenter un jet de gaz inerte (argon, hélium ou un mélange argon- hélium) qui vient envelopper l’arc électrique à la pointe de l’électrode et créer un bouclier gazeux empêchant l’air ambiant de venir en contact avec l’opération de soudure. [3]

I.3.3 CARACTERISATION DE SOUDAGE TIG :

Le soudage TIG est le procédé qui permet de reconstituer la continuité métallique entre les surfaces des éléments à assembler. Pour activer les surfaces, la fusion est une méthode très efficace qui permet également le nettoyage des surfaces afin d'assurer l'installation de la liaison métallique. On obtient ainsi, après solidification, un joint homogène de même composition que le métal de base, ou un joint hétérogène dans le cas de métaux différents. Quelle que soit le procédé de soudage par fusion, la structure d'une soudure typique d'un alliage est composée de 6 zones principales (**Figure I.3**). [3]

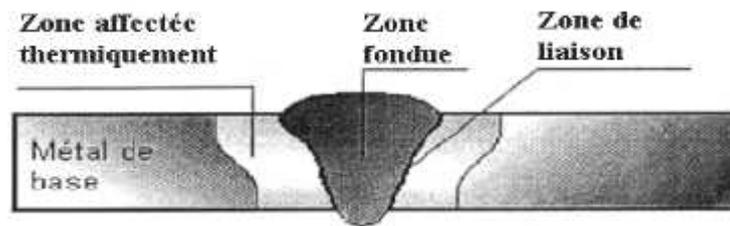


Figure (I.3): Variété de microstructures dans un cordon de soudure TIG.

A/ 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 distingue, au sein de cette zone, des gradients de concentration de la partie la plus fondue vers la moins fondue. Il est donc possible d'examiner la composition d'une soudure ainsi que les variations de dureté.

B/ La zone affectée thermiquement : (nommée ZAT) Zone se trouvant en bordure de la zone fondue sur une largeur plus ou moins large 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 la structure métallurgique.

C/ 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.

D/ 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 thermiquement.

E/ La zone de fusion partielle : (nommée ZFP) le cycle thermique de soudage s'opère dans cette zone à des températures comprises entre le liquide et le solide de l'alliage.

I.3.4 Applications :

Le procédé de soudage à l'arc au tungstène est surtout utilisé pour le soudage des tôles minces mais plus particulièrement pour tous les métaux difficiles à souder. Parmi ces métaux, mentionnons l'aluminium, le magnésium, l'acier inoxydable, le cuivre et leurs alliages, et les aciers au carbone de différentes épaisseurs.

On emploie le procédé dans la construction aéronautique, pour les ustensiles de cuisine, les blocs-moteur, les réservoirs, les citernes les carrosseries, les cabines de camions, les téléphériques, dans les industries alimentaires et chimiques pour les échangeurs de chaleur, les pièces décoratives et bien d'autres encore.

L'emploi de gaz onéreux, comme l'argon ou l'hélium, fait que ses applications sont réservées aux métaux et assemblages nobles : aciers inoxydables et réfractaires, alliages de nickel, alliages d'aluminium et de magnésium, de titane, de cuivre, etc.

I.3.5 PARAMETRES DE SOUDAGE POR L'ALUMINIUM PAR PROCEDE TIG :

Paramètres de soudage.

Tableau (I.7)

Epaisseur métal de base (mm)	Intensité à plat (A)	Courant hors vertical(A)	Plafond (A)	Diamètre (mm) tungstène (a)	Diamètre de là buse (mm)	Diamètr e de métal d'apport	Débit argon (l/m)	Nombr e de passe	Sorte de courant
1.6	60-90	60-90	60-90	1.6	6.4-8	1.6	7-9.5	1	CA-HF
3.2	125-160	115-135	120-155	2.4	9.6-11	2.4	8-9.5	1	CA-HF
5	190-240	190-220	180-205	3.2	11-12.7	3.2-4	9.5-10	2	CA-HF
6.4	220-340	220-260	205-245	5	12.5-16	3.2-5	12-14	2	CA-HF
9.5	330-400	250-300	245-295	5-6.4	16-19	5-6.4	14-16.5	2-3	CA-HF
12.4	400-470	290-350	250-370	5-6.4	19	5-6.4	14-16.5	3-4	CA-HF

(a) : Tungstène au zirconium

CA : courant alternatif

HF : haute fréquence continue

I.3.6 FORMATION DU BAIN DE FUSION :

La forme et la constitution du bain de fusion dépendent de multiples facteurs tels que la nature du matériau à souder, les caractéristiques de l'arc permettant la fusion du métal qui sont liées aux paramètres technologiques du procédé, et les mouvements du bain de fusion.

Les bains de fusion créés lors des opérations de soudage TIG sont le siège de processus thermo physiques très complexes mettant en jeu des phénomènes thermiques, convectifs, chimiques et électromagnétiques interdépendants.

Ces mouvements de convection du métal liquide ou gazeux influencent de façon importante la forme du cordon et les transferts de chaleur pouvant induire des hétérogénéités (ségrégations) ou la présence de défauts tels que les inclusions ou porosités.

D'une façon globale le bain de fusion est en équilibre sous l'action de forces aux effets variables. Ces forces d'origine différentes sont :

- les forces de gravité (ou flottabilité),
- les tensions superficielles (forces de Marangoni),
- la pression de l'arc en surface,
- les forces électromagnétiques (forces de Lorentz) pour les procédés de soudage à la **figure (I.4)** présente les forces agissant sur la forme du bain de fusion par procédé de soudage TIG. Une partie seulement de l'énergie calorifique produite par l'arc sert au soudage, le reste étant perdu par rayonnement, convection et conduction dans le métal adjacent .

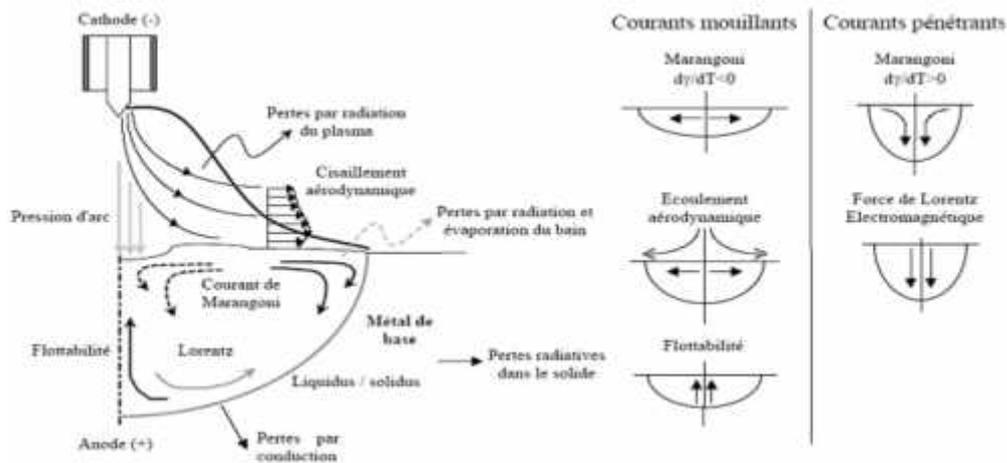


Figure (I.4): Forces et courants de convection dans le bain de fusion de soudage TIG

-La forme du bain de fusion dépend principalement de la vitesse de soudage qui influence la cinétique de solidification par le contrôle de la vitesse de croissance du front de solidification.

Cette vitesse est décrite sur la figure (1.4) et s'exprime par la relation suivante : $P=R \cos \alpha$

R : vitesse de croissance linéaire en tout point du front de solidification (cm/min)

Vs : vitesse de soudage (cm/min)

α : angle entre la direction de soudage et la direction de croissance des cristaux



Fig. (I .5): Représentation schématique de la vitesse de croissance en fonction de la vitesse de soudage

I.3.7 AUTOMATISATION DU SOUDAGE TIG :

Le procédé nécessite une bonne dextérité du soudeur (pour certains assemblages l'électrode est à 1 mm de la pièce). Néanmoins il existe des installations semi-automatiques où l'apport de métal est réalisé par un dispositif annexe. Le métal d'apport sous forme de bobine (bobine au même format que celles utilisées en soudage MIG / MAG) est amené à travers une gaine, puis une canne qui le présente devant l'électrode. Différents systèmes existent permettant de reproduire l'amenée du fil manuelle par un mouvement de cadencage.

Le TIG peut également être complètement automatisé au travers d'installation robotisée.

I.3.8 LES GAZES DE PROTECTION :

L'argon et l'hélium sont les gaz inertes les plus couramment employés dans le procédé TIG. Cependant, on recommande particulièrement l'argon car il convient à une grande variété de métaux et le débit nécessaire est très inférieur à celui de l'hélium pour un travail donné.

A/ L'argon (Ag) : est un gaz inerte qui ne s'allume pas, ne nourrit pas la combustion et ne réagit chimiquement à aucun autre élément. Il est sans couleur, sans odeur et il est présent à 0.93% dans l'atmosphère. On l'obtient à partir de la liquéfaction de l'air durant la production de l'oxygène par la distillation fractionnée de l'air liquide. Pour être efficace comme gaz de protection, la pureté de l'argon ne doit pas être inférieure à 99.95% mais on peut en trouver

sans trop de difficulté à 99.99%. Un tel degré de pureté impose de ne pas laisser se vider complètement un cylindre d'argon avant d'arrêter de s'en servir.

B/ L'hélium (He) : est un gaz sans couleur, inodore et sans goût. Chimiquement, il est presque entièrement inactif, et il ne brûlera ni n'explosera. L'hélium est le deuxième plus léger élément connu après l'hydrogène. Il peut aussi être le gaz le plus froid, liquéfié à -269°C.

L'hélium est fourni dans des bouteilles ordinaires qui contiennent 8 m³ à 18 200 kPa. Il possède un degré élevé de tension et fournit plus de chaleur que l'argon pur avec le même courant et la même longueur d'arc. C'est pourquoi, il est préféré pour le soudage de sections épaisses en acier et pour le métal à haute conductivité thermique, tels l'aluminium et le cuivre.

C/ Les gaz actifs :

L'oxygène, l'hydrogène ou l'azote sont parfois utilisés, en faible proportion, en combinaison avec l'argon ou l'hélium.

L'oxygène est choisi pour répondre à deux fonctions qui sont de stabiliser l'arc mais surtout de modifier les tensions de surface du métal fondu et ainsi éviter les défauts surfaciques comme les caniveaux initiateurs de concentrations de contraintes.

L'hydrogène, quant à lui, grâce à sa conductivité thermique élevée, donne une tension d'arc plus élevée, favorable à une meilleure pénétration (gain de 50% avec 5% d'H) et à une section fondue plus importante. Cependant, le ratio géométrique pénétration sur largeur de bain diminue très nettement par cet ajout. Par ailleurs, l'hydrogène, très réducteur, est utilisé pour éliminer la couche d'oxydes en surface du bain.

Pour ce qui est de l'azote, il sert, entre autre, à maîtriser les structures formées au cours de la solidification. Par exemple, l'ajout d'azote favorise la présence de ferrite dans le cas de soudure d'aciers duplex austéno-ferritiques. Le taux d'azote permet également d'affiner la taille de grains austénitiques des aciers austénitiques à haute limite élastique.

Cependant, il faut être extrêmement vigilant quant à l'utilisation de ces gaz à cause des phénomènes de pollution et de fragilisation. Une étude complète sur la sensibilité du matériau soudé est nécessaire avant tout ajout dans le gaz d'assistance.

I.3.9 PROBLEMATIQUE :

Le soudage TIG réalise des assemblages de qualité en réalisant un arc électrique entre une électrode réfractaire de tungstène et la pièce à souder dans une veine gazeuse. Ceci en fait un procédé de prédilection pour les industries chimiques et pétrochimiques, aéronautiques, agroalimentaires ou nucléaires.

Mais cette excellence se fait au détriment de cordons soudés pénétrants. Ceci conduit, dans de nombreux cas (épaisseurs soudées supérieures à 3mm), à usiner les bords à souder, puis à effectuer plusieurs passes avec métal d'apport pour réaliser l'assemblage souhaité. Les origines de ces limites sont de deux ordres :

- d'une part, l'absence de transfert de métal conduit à un arc diffus dont 60%), «l'énergie spécifique est faible, le rendement d'arc est donc médiocre
- d'autre part, le métal fondu a naturellement tendance à être mouillant, c'est-à-dire à générer des courants de convection thermo-capillaires, internes au volume fondu, orientés du centre vers les bords du bain.

Pour améliorer ce procédé, il faut intervenir à la fois sur les densités d'énergie, mais aussi sur les courants internes au bain de fusion.

I.3.10 Actif TIG :

Le soudage ATIG est une technique qui émerge en construction mécano-soudée de produits chaudronnés depuis le milieu des années 1990. Le matériel nécessaire est identique qu'en soudage TIG. Il utilise un dépôt alcalin de flux actif qui joue un double rôle au passage de l'arc :

- il modifie le comportement et l'équilibre électrochimique de la zone ionisée, conduisant à une constriction de l'arc électrique, réduisant ainsi la tache anodique; les densités de courant et d'énergie sont donc augmentées au sein de la source thermique .
- il inverse les courants de convection thermo-capillaires au sein du bain métallique, initiant alors des courants centrifuges qui sont favorables au transfert des calories dans la pièce ainsi qu'à la formation de profils de bords pénétrants plutôt que mouillants.

Il en résulte une forte modification de la morphologie des cordons soudés, doublant la gamme des épaisseurs soudables d'une seule passe.

Les flux alcalins sont des composés classiques dans la gamme des éléments rentrant dans la composition des flux de brasage, des enrobages d'électrodes ou de flux solides pour le soudage en arc submergé.

I.3.11 AVANTAGE ET INCONVEINIENS DE SOUDAGE T.I.G :

A/ Avantages :

- La grande qualité des soudures obtenues par le soudage à l'arc électrique avec électrode réfractaire sous protection gazeuse en fait un procédé idéal pour le soudage de presque tous les métaux.
- Il ne requiert que peu et même parfois aucun nettoyage après la soudure.
- Le soudage à l'arc électrique avec électrode réfractaire sous protection gazeuse s'exécute facilement dans toutes les positions sans aucune projection de métal.
- Les soudures se font sans l'emploi du laitier, éliminant ainsi les inclusions de laitier.
- Le chauffage des pièces s'effectue sur une petite surface, le bain de fusion est étroit et la vitesse de soudage, relativement élevée.
- En raison du gaz inerte, on peut dire que les émanations de vapeur et de fumée toxique sont éliminées dans la plupart des cas. le dépôt de soudure est très dense et le procédé permet d'exécuter les soudures sans porosité même sur des métaux difficilement soudables, tels les alliages de titane et le zirconium.
- Le procédé est idéal aussi pour effectuer des réparations et de petites séries de fabrication de pièces.

B/ Inconvénients :

- Procédé de soudage lent, il nécessite souvent les deux mains du soudeur.
- Il n'est pas vraiment avantageux pour le soudage sur tôles épaisses.
- Il exige un équipement plus considérable que certains autres procédés.
- Équipement coûteux.
- Prix élevé de la soudure à cause du gaz de protection et du coût de l'équipement.
- Déformations des pièces soudées.
- Les soudures TIG souffrent d'une faible pénétration de bain accessible en une seule passe.
- L'arc diffus, l'absence de transfert de métal entre l'électrode et la pièce, le comportement mouillant du métal fondu, conduisent à la formation de bains de fusion qui sont larges et peu pénétrés.
- Les assemblages d'épaisseurs supérieures à 3mm nécessitent, pour les aciers inoxydables, le zirconium, les alliages de titane et de nickel, des usinages des bords à souder (chanfreins)
- ainsi que la réalisation avec métal d'apport de passes successives pour venir combler le joint.

I.4 CONTROLE DES CORDONS DE SOUDURE (T.I.G) PAR C.N.D :

I.4.1 Introduction :

Le contrôle non destructif regroupe l'ensemble des techniques qui permettent d'inspecter une pièce et d'une rechercher éventuels défauts susceptibles d'avoir des conséquences néfastes sur la fonction qu'elle assure.

Les techniques sont multiples (procédés optiques, ressuage, flux de fuites magnétiques, rayonnement ionisant, vibrations mécaniques, contrôle d'étanchéité, procédés électromagnétiques) et les applications variées.

Le contrôle en ligne se distingue du contrôle sur site, le premier est un contrôle de fabrication qui a pour but de vérifier la qualité d'un produit industriel avant sa mise en service, le deuxième est une inspection en service réalisable au cours de la vie du produit dont le but est de s'assurer de la non dégradation de la pièce soumise à des contraintes mécaniques, chimiques, thermiques et autres, Dans ce premier chapitre nous passerons en revue la définition du contrôle non destructif, son intérêt, les différentes techniques utilisées et on terminera par les applications de ce type de contrôle.

I.4.2 Définition et intérêt du CND :

Le contrôle non destructif CND est un ensemble de méthodes qui permet de caractériser l'état d'intégrité de structures industrielles, sans les dégrader, soit au cours de la production (les pièces qui sortent des fonderies ne sont jamais exemptes de défaut), soit en cours d'utilisation (apparition de défaut).

Il faut donc déterminer quelle taille de défaut est acceptable de façon empirique à la casse (destruction) et ensuite pouvoir les détecter, sans détruire la pièce.

On parle aussi d'essais non destructifs ou d'examen non destructifs END, ce qui évoque plutôt les examens en laboratoire que la qualité industrielle.

En ce sens, le contrôle non destructif apparaît comme un élément majeur du contrôle de la qualité et de la santé des produits.

Il se différencie de l'instrumentation de laboratoire et industrielle puisque l'objet est la détection et la mise en évidence des hétérogénéités, anomalies et défauts susceptibles d'altérer la disponibilité, la sécurité d'emploi et, plus généralement, la conformité d'un produit à l'usage auquel il est destiné, plutôt que de mesurer des paramètres physiques tels que le poids ou les cotes d'une pièce, poids ou les cotes d'une pièce. [8]

I.4.3 Défauts et leurs sources (origines) :

Détecter un défaut c'est mettre en évidence une hétérogénéité de matière, une variation locale de propriétés physiques ou chimiques préjudiciable au bon emploi de celle-ci. Ça peut être des porosités, criques, rivets, soudures, fissures, délaminages, corrosion, collages, taux de fibre/matrice décohésion fibre-matrice, cotation, forme, ... On classe les défauts en deux grandes catégories liées à leur emplacement : les défauts internes, les défauts de surface. [8]

Défauts internes :

Il s'agit de tous les défauts localisés dans le volume du corps à contrôler qu'il s'agit des pièces moulées, forgées, laminées, soudées. Leur nomenclature est spécifique à chaque branche d'activité technologique et industrielle, dans l'industrie des métaux il peut s'agir de porosité, d'amas inclusionnaires endogènes ou exogènes, ou de fissures comme des flocons. Pour ce type de défauts le contrôle visuel est exclu d'office et on utilisera donc l'un ou l'autre des grands procédés du CND. [8]

Défauts de surface :

Accessible à l'observateur direct mais pas toujours visible à l'oeil nu, peuvent se classer en deux catégories distinctes :

Défauts ponctuels correspond aux défauts les plus nocifs sur le plan technologique puisqu'il s'agit des criques, piqûres, fissures, craquelures, généralement aptes à provoquer à terme la rupture de la pièce, en initiant par exemple des fissures de fatigue. Les méthodes de contrôle non destructif les plus sensibles sont les mieux adaptées pour ce type de défauts (ressuage, Magnétoscopie, courants de Foucault).

Défauts d'aspect, à des plages dans lesquels une variation de paramètre géométriques ou physiques attire le regard et rend le produit inutilisable (rugosité, surépaisseur, taches diverses). Pour ce type de défauts le contrôle visuel est possible mais on cherche à le remplacer par des contrôles optiques automatiques. [8]

Origines des défauts :

Les origines et les causes des défauts sont multiples. On peut citer sans être exhaustif les exemples suivants :

- Défauts de moulage.
- Défauts de soudage ou de brasage des pièces mécaniques.

- Détection de fissuration (interne ou débouchant).
- Endommagement (délaminage) de composites.
- Hétérogénéité dans les matériaux.
- Défauts de collage.
- Absence de colle.
- Défaut d'adhésion.
- Fissuration de colle.
- Défauts de fixation des composants électroniques.

Caractéristiques des défauts :

Un nombre quelconque de défauts peut être positionné dans tout le volume d'une pièce quelconque (géométrie complexe ou canonique, homogène ou hétérogène). Ces défauts sont de différents types :

Réflecteurs étalons : trou génératrice , trou à fond plat et trou à fond hémisphérique, sphère.

Défauts plans, de taille et d'orientation quelconque.

Défauts multi-facettes et défauts à contour.

Inclusions (de forme cylindrique ou elliptique) : défauts constitués d'un matériau solide.

Techniques du CND :

Les méthodes de contrôle non destructif utilisées couramment sont les procédés optiques , le ressuage, la radiologie, les ultrasons , l'émission acoustique, le procédé par courants de Foucault.

Procédés optiques

L'examen visuel est le premier des procédés de contrôle, le plus simple est le plus général puisque c'est aussi le point final de la majorité des autres procédés non destructifs.

L'examen visuel direct des pièces peut constituer un contrôle suffisant pour la détection des défauts débouchant en surface et surtout des hétérogénéités locales (taches de différentes natures) constituant des défauts d'aspect rédhitoires pour des produits plats du types tôles, tissus, verre, etc. toutefois l'examen purement visuel présente des limitations de différentes natures qui justifient l'éclosion de toute une gamme de procédés de contrôle optique (contrôle optique automatique ou assisté, techniques optiques particulières).

Ressuage :

C'est une méthode destinée à révéler la présence de discontinuités ouvertes en surface de la pièce métallique. Elle consiste à badigeonner la cible avec un liquide fluoresçant ou coloré en rouge, qui pénètre dans les discontinuités. Après nettoyage de la cible, un révélateur est appliqué et en faisant ressuer le liquide resté dans les fissures, celles-ci vont être révélées.

Radiologie :

Comme la plupart des autres techniques de contrôle non destructif, la radiographie par rayons X est connue depuis de nombreuses années, et elle a largement fait ses preuves dans l'industrie. Son principe est simple.

La pièce à contrôler est irradiée et traversée par des rayons X. Derrière elle, on place un récepteur, le plus souvent un film radiographique, afin de récupérer le rayonnement transmis.

Une fois développé, le film permet d'obtenir une image de l'intérieur de la pièce et de localiser les éventuels défauts internes.

Ultrasons :

Le contrôle par ultrasons classique est basé sur la transmission, la réflexion et l'absorption d'une onde ultrasonore se propageant dans la pièce à contrôler.

Le transducteur émet un faisceau ultrasonore au travers de l'objet suivant un angle fixé. Le train d'onde émis se réfléchit dans le fond de la pièce et sur les défauts puis revient vers le transducteur qui joue souvent le rôle d'émetteur et de récepteur.

L'interprétation des signaux permet de positionner le défaut.

Emission acoustique :

L'émission acoustique est le phénomène de libération d'énergie sous forme d'ondes élastiques transitoires résultant des micro déplacements locaux internes au sein d'un matériau soumis à sollicitation.

La méthode de contrôle par émission acoustique s'appuie sur une grande connaissance des matériaux (propriétés physiques, mécaniques, etc) et sur l'expérience en émission acoustique acquise à travers de nombreux travaux de recherche en laboratoire et en partenariat avec l'industrie.

Méthodes couplées :

Les méthodes non destructives considérées isolément ne fournissent pas nécessairement l'ensemble des réponses aux questions posées : les réponses peuvent être partielles ou insuffisamment précises.

L'association de différentes techniques peut compléter et améliorer le diagnostic.

Récemment, des méthodes couplées ont vu le jour, et pour certaines sont encore dans le domaine de la recherche :

Les méthodes électromagnétiques acoustiques, électromagnétiques ultrasonores ou Magnéto-optiques.

L'association des techniques non destructives peut également permettre la diminution du nombre de contrôles, certaines techniques, en effet, sont rapides et permettent de localiser les zones particulières qui méritent une auscultation plus précise ou un contrôle destructif ultérieur.

Chapitre II

**Réalisation d'un cordon de soudure et
différents essais**

II.1 GENERALITE SUR L'ALUMINIUM :

II.1.1 Historique et fabrication de l'aluminium :

L'aluminium est le métal le plus récemment découvert puisqu'il n'est utilisé industriellement que depuis la fin du XIX^e siècle.

Pourtant l'alun, sulfate double d'aluminium et de potassium, le composé d'aluminium le plus anciennement connu, était déjà décrit par Plin l'ancien et utilisé à Rome comme mordant pour les couleurs.

Il a fallu attendre 1825 pour que Hans Christian Oersted obtienne l'aluminium à l'état de corps simple sous forme d'une poudre grise contenant encore une très grande quantité d'impuretés. En 1827, Friedrich Wöhler obtint cette même poudre grise d'aluminium contenant cependant moins d'impuretés.

Ce n'est qu'en 1854 qu'Henri Sainte-Claire-Deville présente le premier lingot d'aluminium obtenu à l'état fondu, par un procédé mis en application en 1859 de façon industrielle par Henry Merle dans son usine de Salindres (Gard), berceau de la société Pechiney.

Mais ce procédé était compliqué ce qui donnait un métal très cher, réservé à des utilisations dans le luxe et l'orfèvrerie.

En 1886, Paul Louis Toussaint Héroult en France et Charles Martin Hall aux Etats Unis déposent indépendamment leurs brevets sur la production d'aluminium par électrolyse à chaud de l'alumine, oxyde déshydraté de l'aluminium, dissoute dans de la cryolithe fondue (fluorure double de sodium et d'aluminium).

L'invention de la dynamo, qui remplaça la pile comme source d'électricité, et l'utilisation des chutes hydrauliques : la " houille blanche ", rendit possible la production économique du métal.

P.L.T. Héroult monte sa première usine en 1887 à Neuhausen en Suisse, sur une chute du Rhin, berceau de la société l'Aluminium Suisse. Il monte une usine en 1889 à Froges (Isère), berceau de l'hydroélectricité française développée par Aristide Bergès, puis une autre à La Praz dans la vallée de l'Arc (Savoie).

C.M. Hall monte en 1888 une usine pour la Pittsburgh Reduction Co qui deviendra en 1907 l'Aluminum Company of America.

L'aluminium est entré dans sa phase industrielle ; sa production a connu en 100 ans une croissance prodigieuse, le mettant au premier rang des métaux non ferreux et au deuxième de tous les métaux derrière le fer, ainsi que l'illustrent les chiffres suivants : [7]

Production d'Aluminium.**Tableau (II.1)**

Année	Production mondiale (tones)
1886	13
1890	200
1900	5 700
1910	44 350
1920	121 000
1930	269 000
1940	810 000
1950	1 507 000
1960	4 624 000
1970	10 307 000
1980	16 000 000
1999	28 000 000

L'aluminium est d'abord employé à l'état pur pour sa légèreté et son inaltérabilité, mais la mise au point d'alliages d'une plus grande résistance mécanique va être déterminante.

Conrad Claessen trouve en **1905** la possibilité de durcir certains alliages par traitement thermique.

Alfred Wilm met au point le " Duralumin " (aluminium de Düren), alliage d'aluminium et de cuivre, qui durcit par trempe.

Aladar Pacz imagine en **1920** l'alliage aluminium silicium affiné au sodium, " l'Alpax ".

L'extraction de l'alumine s'effectue par attaque de la bauxite à température et pression élevées au moyen d'une solution de soude caustique (procédé Bayer).

Les impuretés insolubles sont séparées de la solution par décantation et filtration et portent le nom de " boues rouges " en raison de leur couleur due à la présence d'oxyde de fer.

De la solution épurée, refroidie et diluée, on peut tirer l'hydroxyde d'aluminium : $\text{Al}(\text{OH})_3$; celui-ci est calciné à 1200°C pour donner l'alumine : Al_2O_3 , qui se présente sous la forme d'une poudre de couleur blanche.

L'alumine est mélangée à de la cryolithe et ce mélange est liquide à 1000°C ; l'électrolyse de l'alumine se fait dans une grande cuve peu profonde, dont le fond est garni de graphite qui sert de cathode (pôle -). Les anodes (pôle +) sont faites avec de la pâte de coke et de brai précuite et plongent dans le bain.

Le passage du courant continu décompose l'alumine : l'aluminium liquide à 1000°C se dépose à la cathode, au fond de la cuve, et l'oxygène se dégage aux anodes en les brûlant ; celles-ci sont donc consommées et changées régulièrement. L'aluminium est récupéré par siphonage dans une poche de coulée.

La tension continue appliquée aux électrodes est de 4,5 à 6 V ; l'intensité du courant passant dans la cuve n'a cessé de progresser au fil des ans avec les améliorations technologiques apportées aux cuves : la toute première cuve d'Hérault avait 4000 A ; en 1914, les cuves avaient 20.000 A, 100.000 A en 1944, 175.000 A en 1980 et elles atteignent aujourd'hui 300.000 A.

La consommation électrique de l'électrolyse de l'aluminium est importante, de l'ordre de 13.000 kWh par tonne d'aluminium produite.

Pour fabriquer 1 tonne d'aluminium, il faut 2 tonnes d'alumine et 4 tonnes de bauxite.

II.1.2 Avantages techniques et économiques :

Les emplois de l'aluminium et de ses alliages se sont développés dans des proportions surprenantes pour des raisons techniques et économiques.

Les raisons techniques sont nombreuses :

- l'aluminium est un métal dont la densité est faible, ce qui vaut à ses alliages la dénomination d'alliages légers. L'aluminium est le métal le plus léger après le lithium et le magnésium

L'aluminium est donc 3,3 fois plus " léger " que le cuivre et 2,9 fois plus léger que le fer ; il " pèse " grossièrement 3 fois moins que les métaux industriels usuels.

C'est cette caractéristique qui a valu aux alliages d'aluminium leur développement dans les moyens de transport et en particulier dans l'aéronautique.

- l'aluminium conduit bien l'électricité et la chaleur :

Sa résistivité électrique est de $2,74 \cdot 10^{-8} \text{ W.m}$; convertie en conductivité électrique comparée à celle du standard cuivre IACS, cela représente 63 %. Les alliages d'aluminium ont une conductivité plus faible que celle de l'aluminium pur, variant de 30 % à 50 % IACS. A poids égal de cuivre, l'aluminium a une conductivité électrique 2 fois supérieure, d'où les applications de l'aluminium dans le transport d'électricité haute tension sur grande distance.

- l'aluminium n'est pas magnétique :

Sa perméabilité magnétique relative est de 1,004 soit 50 fois plus faible que celle des aciers. Cette qualité s'ajoute à ses propriétés de conduction électrique et milite en faveur de son utilisation dans les blindages de câbles, dans les circuits électroniques et dans la réalisation de bon nombre d'appareils de mesure.

- l'aluminium a une bonne résistance à la corrosion :

L'aluminium a une grande affinité pour l'oxygène, et très vite une couche d'alumine recouvre sa surface ; cette couche est parfaitement couvrante et protège le métal sous-jacent. De plus, il est possible d'accroître cette protection par les traitements d'oxydation anodique (anodisation).

- l'aluminium est un métal robuste :

Si les caractéristiques de l'aluminium pur sont faibles, comme pratiquement celles de tous les métaux purs, la gamme d'alliage très étendue permet de trouver celui qui correspond aux contraintes d'utilisation envisagée.

En effet, les alliages les plus résistants peuvent avoir une charge de rupture supérieure à 700 MPa, donc largement équivalente à celles des aciers trempés.

- l'aluminium peut être utilisé dans une large plage de températures :

Contrairement à d'autres métaux, tel que l'acier, l'aluminium ne se fragilise pas aux basses températures et ses caractéristiques mécaniques augmentent même aux températures des gaz liquéfiés, d'où son utilisation en cryogénie.

Sa température de fusion est basse : 658°C , nettement inférieure à celle du cuivre (1083°C) et à celle du fer (1536°C) ; cela ne lui permet pas de résister aux très hautes températures. Il existe cependant des

alliages qui résistent bien à des températures de l'ordre de 200°C souvent atteintes en aéronautique et en astronautique.

La charge de rupture de l'aluminium de pureté commerciale en fonction de la température est la suivante :

La charge de rupture en fonction de la température.

Tableau(II.2)

-196 C°	160 MPa
-80 C°	95 MPa
-30 C°	85 MPa
20 C°	80 MPa
100 C°	60 MPa
200 C°	30 MPa

La comparaison de l'aluminium avec les autres métaux utilisés industriellement montre qu'il est souvent plus intéressant pour des raisons techniques et économiques :

- A poids égal, un fil en aluminium conduit 2,1 fois plus d'électricité qu'un fil en cuivre et 18 fois plus qu'un fil en acier. A conduction électrique égale, le prix d'un conducteur en aluminium est égal à 40 % du prix d'un conducteur en cuivre.
- A poids égal, la résistance mécanique d'un produit en alliage d'aluminium 7075 est 2,3 fois plus forte que celle d'un bronze CuSn6 et 1,5 fois plus forte que celle d'un acier trempé. A résistance mécanique égale, le prix d'un produit en 7075 est égal à 35% de celui d'un produit en bronze CuSn6.
- A poids égal, l'absorption électromagnétique (aptitude au blindage Électromagnétique) d'une tôle en aluminium est 2,6 fois plus forte que celle d'une tôle en cuivre. A absorption électromagnétique égale, le prix d'un blindage en tôle d'aluminium est égal à 30 % de celui d'une tôle en cuivre.

II.1.3 Influence des éléments d'alliage :

La résistance mécanique de l'aluminium pur est relativement faible et interdit son emploi pour certaines applications. Cette résistance mécanique peut être notablement augmentée par l'addition d'autres métaux, formant ainsi des alliages. Ceux-ci peuvent être classés en deux catégories :

- les alliages sans durcissement structural (alliages non trempant),
- les alliages à durcissement structural (alliages trempant).

Cette différence entre alliages est due à l'élément d'addition principal, quelle que soit sa teneur. Il n'y a rarement qu'un seul élément ajouté (élément principal). Des additions d'autres éléments secondaires vont aussi influencer sur les caractéristiques de l'alliage.

Il y a enfin des éléments présents dans l'alliage sans qu'ils aient été ajoutés volontairement ; ce sont les impuretés dont les plus importantes sont le fer et le silicium, et dont il faut contrôler précisément la teneur pour certaines utilisations car leur influence peut être défavorable.

Tous les éléments jouent, par leur nature et leur teneur, sur plusieurs propriétés de l'alliage comme :

- les caractéristiques mécaniques (charge de rupture R_m , limite élastique $R_{p0.2}$, l'allongement à la rupture $A\%$, la dureté HB).
- la masse volumique.
- les conductivités électrique et thermique.
- la résistance à la corrosion.
- l'aptitude au soudage.
- l'usinabilité.
- l'aptitude à la déformation.
- l'aptitude à l'anodisation.

L'aluminium est capable de se " marier " avec grand nombre d'autres éléments donnant ainsi naissance à beaucoup d'alliages différents ayant un faisceau de propriétés très larges et permettant de satisfaire un grand nombre d'applications.

Les alliages d'aluminium sont classés en sept familles selon l'élément principal d'addition. Dans chaque famille, les différents alliages ont des caractères " génétiques " communs mais ont aussi chacun leur propre personnalité. Les alliages sont communément désignés par un numéro à 4 chiffres dont le premier désigne la famille : [7]

Les déférentes séries d'aluminium**Tableau (II. 3)**

SERIE	FAMILLE
1000	aluminium sans élément d'addition
2000	aluminium + cuivre
3000	aluminium + manganèse
4000	aluminium + silicium (alliages de moulage)
5000	aluminium + magnésium
6000	aluminium + magnésium + silicium
700	aluminium + zinc + magnésium

II.1.4 Influence des conditions de fabrication - Etats métallurgiques :

Il est possible d'augmenter la résistance mécanique de l'aluminium et de tous ses alliages par déformation à froid appelée écrouissage. Cette déformation diminue simultanément l'aptitude des alliages à la déformation à froid (qu'il est possible de lui faire recouvrer par un traitement thermique de recuit qui confère au métal sa résistance mécanique minimum).

L'écrouissage a des effets sur plusieurs propriétés de l'alliage :

- la charge de rupture, la limite élastique et la dureté augmentent, alors que l'allongement à la rupture et la capacité de déformation à froid diminuent,
- la conductivité électrique diminue,
- la résistance à la corrosion diminue.

Le traitement thermique de recuit a les effets inverses.

L'écrouissage est la seule façon de durcir les alliages sans durcissement structural(alliages non trempants).

Ces alliages appartiennent aux 3 familles suivantes : [7]

Alliages non trempant**Tableau (II. 4)**

SERIE	FAMILLE
1000	aluminium sans élément d'addition
3000	aluminium + manganèse
5000	aluminium + magnésium

Les autres familles peuvent être durcies en plus par traitements thermiques de durcissement structural.

Entre l'état recuit et l'état le plus dur normalement produit, il est défini plusieurs états intermédiaires.

ces états, dont les niveaux de dureté atteints sont croissants, peuvent être obtenus de deux façons : soit en partant d'un alliage complètement recuit et en l'écrouissant partiellement, soit en partant d'un alliage complètement écroui et en le recuisant partiellement (états partiellement recuits ou restaurés) ; l'écrouissage introduisant des contraintes internes au métal, il est nécessaire pour certaines applications de les supprimer par un traitement de stabilisation qui ne modifie que très peu les caractéristiques mécaniques de l'alliage.

Le tableau ci-dessous donne les désignations normalisées des états écrouis :

Les caractéristiques mécaniques de l'alliage.**Tableau (II. 5)**

Niveaux de dureté	Etats écrouis	Etas restaurés	Etats stabilisés
Recuit	O		
1/8 dur	H11		
1/4 dur	H12 H13	H22	H32
1/2 dur	H14 H15	H24	H34
3/4 dur	H16 H17	H26	H36
4/4 dur	H18	H28	H38
Extra dur	H19		

Il existe de plus d'autres états écrouis :

H111 : recuit et légèrement écroui (moins que H11) par exemple par traction ou planage,

H116 : s'applique aux alliages 5000 dont la teneur en magnésium est supérieure à 4 % et pour lesquels des limites de caractéristiques mécaniques et une résistance à la corrosion exfoliante sont spécifiées.

Les alliages des familles 2000, 6000 et 7000 peuvent être durcis par traitement thermique de mise en solution et trempe, suivi d'un durcissement structural qui s'effectue :

- soit à la température ambiante (maturation ou vieillissement naturel),
- soit par chauffage (revenu ou maturation accélérée ou vieillissement artificiel).

C'est par ces traitements qu'ils atteignent leurs caractéristiques maximales ; de plus, il est possible de combiner durcissement par écrouissage et durcissement par traitement thermique de mise en solution, trempe et maturation ou revenu.

La mise en solution, traitement thermique à haute température peut être faite dans un four mais pour certains alliages, en particulier ceux de la famille 6000, elle peut être faite au cours d'une opération de déformation à chaud.

Le tableau ci-dessous donne la désignation normalisée des états ainsi obtenus valables en France et en Europe :

Tableau (II. 6)

Opération	Traitement au four	Déformation a chaud
Trempe+maturation	T4	T1
Trempe+écrouissage+maturation	T3	T2
Trempe+revenu	T6	T5
Trempe+sous-revenu	T61	T51
Trempe+sur-revenu	T66	T56
Trempe+sur-revenu désensibilisant a la corrosion sous contrainte	T73	-
Trempe+ sur-revenu désensibilisant a la corrosion exfoliante	T76	-
Trempe+écrouissage+revenu	T8	T10
Trempe+revenu+écrouissage	T9	-

T51, T56 : état normalisé uniquement dans la norme européenne NF EN 515 (Octobre 1993).

T10 : état normalisé uniquement dans la norme française NF A 02-006 (Novembre 1985) qui est annulée et remplacée par la norme européenne.

La trempe qui suit le traitement thermique de mise en solution introduit dans beaucoup de produits des contraintes internes qui les déforment, et qui peuvent nuire à certaines applications .

Les produits sont alors détention nés par traction, par compression ou par ces deux opérations combinées la désignation des états correspondants est obtenue en ajoutant derrière les chiffres, qui suivent la lettre T, donnés

Ci-dessus, les chiffres suivants :

Tableau (II. 7)

La norme	Désignation
Txx51 ou Txx510	Détentionnement par traction sans aucun dressage complémentaire après la traction.
Txx511	Détentionnement par traction suivi d'un dressage
Txx52	Détentionnement par compression.
Txx54	Détentionnement par traction et compression combinées.

II.1.5 Caractéristiques typiques des alliages et des états de livraison :

Le tableau ci-dessous donne des valeurs typiques de la composition et d'un certain nombre de propriétés physiques des alliages usuellement utilisés.

Les caractéristiques typiques des alliages et des états de livraison

Tableau (II. 8)

Alliage	Composition en %								Masse volumique kg.dm ⁻³	Conductivité électrique %IACS	Conductivité thermique W.m-1.K-1
	Fe	Si	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Pb			
1050A	0,20	0,15	/	/	/	/	/	/	2,70	62	231
2017A		0,50	4,0	0,7	0,7				2,79	34	134
2024			4,3	0,6	1,5				2,77	30	120
2030			3,9	0,6	0,9			1,1	2,82	34	135
5083				0,7	4,4	0,15			2,66	29	120
5086				0,4	4,0	0,15			2,66	31	126
5754				0,3	3,1	0,3			2,67	33	132
6060	0,20	0,45			0,48				2,70	52	200
6082		1,00		0,7	0,9				2,71	41	174
7075			1,6		2,5	0,23	5,6		2,80	33	130

Le tableau ci-dessous donne des valeurs typiques des caractéristiques mécaniques, des propriétés de mise en œuvre et des applications types de ces alliages. [7]

Les caractéristiques mécaniques

Tableau (II. 9)

Alliage	Etat	Caractéristiques mécaniques			Résist. corrosion	Aptitu. soudage	Usina.	Aptitu. déform.	Aptitu. anodis.	Applications
		Rm MPa	Rp02 MPa	A%						
1050A	O	80	30	42	A	A	C	A	A	Bâtiment, Cuisine
	H24	115	80	25	A	A	B	B	A	
2017A	T4	420	280	18	C	D	A	C	C	Méca.Géné
2024	T3	465	320	18	C	D	B	D	C	Aéro.
2030	T3	450	390	10	C	D	A	C	C	Décolletage
5083	O	305	160	23	A	A	C	B	A	Chimie, cryo transport
	H116	335	230	20	A	A	B	B	A	
5086	O	278	135	25	A	A	C	B	A	Chimie, cryo C. navale
	H22	310	225	18	A	A	B	D	A	
5754	O	220	100	23	A	A	C	B	A	Chaudron., marine
	H24	270	215	10	A	A	B	D	A	
6060	T5	220	190	16	A	B	C	C	A	Bâtiment
6082	T6	315	280	12	A	B	C	C	A	Transport
7075	T6	565	495	11	C	D	B	D	B	Aéro

A : très bon - **B** : bon - **C** : moyen - **D** : mauvais, à déconseiller

II.1.6 PROPRIETES D'ALUMINIUM :

II.1.6.1 Propriétés physique :

L'aluminium est un métal mou, léger, mais résistant avec un aspect argent-gris mat, dû à une mince couche d'oxydation de cinq à dix nanomètres qui se forme rapidement quand on l'expose à l'air et qui empêche la corrosion de progresser dans des conditions normales d'exposition chimiques.

Ce film composé d'alumine se forme spontanément très rapidement quand l'aluminium est mis en contact avec un milieu oxydant comme l'oxygène de l'air.

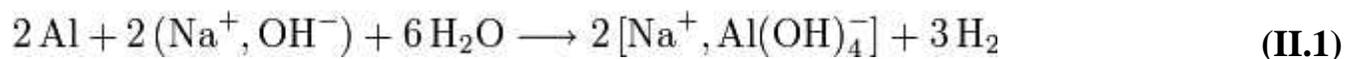
À la différence de la plupart des métaux, il est utilisable même s'il est oxydé en surface. On peut même dire que sans cette couche d'oxyde, il serait impropre à la plupart de ses applications. Il est possible d'augmenter artificiellement l'épaisseur de cette couche d'oxydation par anodisation, ce qui permet d'augmenter la protection et de décorer les pièces en colorant la couche d'oxyde. Contrairement à l'aluminium qui est un très bon conducteur, l'oxyde d'aluminium est un excellent isolant.

L'aluminium a une densité (2,7) environ trois fois plus faible que celle de l'acier ou du cuivre ; il est malléable, ductile et facilement usiné et moulé. Il possède une excellente résistance à la corrosion et une grande longévité. Il est également paramagnétique et ne provoque pas d'étincelles. C'est le deuxième métal le plus malléable et le sixième le plus ductile.

II.1.6.2 Propriétés chimiques :

En solution, l'aluminium se trouve le plus généralement sous la forme d'ions Al^{3+} . Il s'oxyde lentement à froid et rapidement à chaud pour former l'alumine Al_2O_3 . L'action des acides sur l'aluminium produit l'ion cité plus haut.

La réaction de l'aluminium avec une solution aqueuse d'hydroxyde de sodium (soude) produit de l'aluminate de sodium et du dihydrogène gazeux, selon une réaction exothermique d'équation :



Les hydroxydes d'aluminium s'obtiennent en général en précipitant une solution contenant des cations Al^{3+} à l'aide d'une base. Cette méthode permet de former selon les conditions de précipitation différentes phases cristallographiques tel que la bayerite, la boehmite, la gibbsite.

L'aluminium est aussi utilisé en tant que réducteur fort, notamment pour l'aluminothermie et en pyrotechnie dans les feux d'artifice, où il joue un rôle similaire au magnésium, à moindre coût et avec une puissance plus grande.

II.1.7 Classement des alliages suivant leur utilisation :

a) Usinage :

L'aluminium et ses alliages s'usinent avec facilité à condition de prendre quelques précautions aux grandes vitesses de coupe et d'utiliser des outils adaptés. Les alliages d'aluminium s'usinent mieux que l'aluminium pur ; c'est en particulier le cas des alliages à durcissement structural. D'une manière générale, les alliages à hautes caractéristiques mécaniques, et donc à capacité de déformation à froid faible, s'usinent bien.

Les alliages - états les plus adaptés à l'usinage dans le tableau suivants :

Tableau (II. 10)

2017A T4
2024 T3
2618A T851
5083 H111
6082 T6
7075 T651

b) Soudage :

Si de façon générale tous les alliages d'aluminium sont soudables, ils ne se comportent pas tous de manière identique ; il faut distinguer trois classes d'alliages :

- les alliages sans durcissement structural (familles 1000, 3000 et 5000)

Ils ont une bonne soudabilité ; lorsqu'ils sont utilisés à l'état recuit, ils ne subissent pas de perte sensible de caractéristiques mécaniques au niveau de la soudure.

Par contre lorsqu'ils sont à l'état écroui, le durcissement dû à l'écrouissage disparaît au voisinage de la soudure.

Les alliages - états typiques sont les : 1050A O ,3003 O ,5083 H111, 5086 O ; l'addition de chrome dans ces deux derniers alliages améliore encore leur soudabilité.

- les alliages à durcissement structural exempts de cuivre (famille 6000 et certains alliages de la famille 7000). Le cycle thermique de soudage affecte les caractéristiques mécaniques du métal de base qui est généralement à l'état trempé-revenu ; cette perte est définitive pour les alliages de la famille 6000 sauf s'il est possible d'effectuer un nouveau traitement de revenu sur la structure soudée ; les alliages de la famille 7000 retrouvent une partie notable de leurs caractéristiques initiales par maturation à la température ordinaire.

Les alliages - états typiques sont les : 6060 T5, 6082 T6 ,7020 T5.

- les alliages à durcissement structural contenant du cuivre (famille 2000 et certains alliages de la famille 7000)

Ces alliages sont dans l'ensemble difficilement soudables parce que, d'une part, ils sont sujets aux criques lors de la solidification de la soudure et que, d'autre part, leurs caractéristiques mécaniques après soudage sont fortement diminuées. Toutefois ces alliages sont plus ou moins sensibles à ces phénomènes : le 2618A T851 est peu sensible aux criques. L'utilisation du procédé TIG à grande concentration d'énergie et à protection gazeuse accrue permet une amélioration notable des résultats.

c) Utilisations structurales :

Les alliages d'aluminium sont très utilisés pour des applications structurales faisant concurrence aux aciers.

Le module élastique des alliages d'aluminium, de l'ordre du tiers de celui des aciers, conduit, pour éviter des fléchissements trop importants, à augmenter les épaisseurs des sections par rapport à celles des aciers ; de ce fait, l'allégement résultant du remplacement de l'acier par un alliage d'aluminium n'est pas dans le rapport des densités mais est compris entre 40 % et 60 %. Cependant, la possibilité d'obtenir avec les alliages d'aluminium des profils complexes permet de compenser le faible module élastique du métal par une forme des profils qui conduit à un moment d'inertie élevé.

Les alliages - états les plus utilisés dans le tableau suivant :

Tableau (II. 11)

5083 H22
5086 H24
5754 H24
6005A T5
6061 T6
6082 T6
7020 T5

d) Contraintes mécaniques élevées :

Lorsque les constructions sont soumises à des contraintes importantes, l'emploi des alliages ci-dessus conduirait à des épaisseurs ou à des sections incompatibles avec l'allégement recherché. Il est nécessaire alors d'utiliser des alliages à très hautes caractéristiques mécaniques ; ces alliages ont en contrepartie une faible résistance à la corrosion, une faible capacité de déformation à froid et des difficultés à être soudés ce qui limite leur emploi à des applications bien particulières.

Les alliages - états utilisés dans le tableau suivant :

\

Tableau (II. 12)

2014 T6
2017A T4
2024 T3
7075 T6

Résistance à la corrosion :

Les alliages d'aluminium sont réputés comme résistant relativement bien à la corrosion. Cependant, dans certaines conditions d'exposition, ils peuvent subir un endommagement. Celui-ci peut se manifester sous différentes formes qui dépendent de la composition de l'alliage et de son état métallurgique.

f) Composition :

- Plus la teneur en impuretés fer et silicium est faible, plus l'aluminium et ses alliages résistent à la corrosion.
- Les alliages de la famille 3000 résistent aussi bien à la corrosion que l'aluminium de pureté commerciale.
- Les alliages contenant du cuivre (famille 2000 et certains alliages de la famille 7000) résistent mal à la corrosion.
- Les alliages de la famille 5000 résistent bien à la corrosion si la teneur en magnésium ne dépasse pas 4 %. Au delà de cette teneur, il est nécessaire de traiter thermiquement le métal (état H116).
- Les alliages de la famille 6000 ont un bon comportement et ceci d'autant plus qu'ils ont une très bonne aptitude à l'anodisation qui forme une couche d'alumine épaisse et protectrice.
- Les alliages de la famille 7000 sans cuivre résistent bien à la corrosion. Certains alliages à basse teneur en zinc sont utilisés comme placage de protection des tôles en alliage 7000 au cuivre destinées à l'aéronautique.

g) Etat métallurgique :

- Les états écrouis résistent globalement moins bien que les états recuits.
- Les états trempés revenus (T5 et T6), qui confèrent à l'alliage ses caractéristiques maximales, résistent moins bien que les états sur-revenus (T7).

Milieu en contact duquel est placé l'alliage d'aluminium a aussi son importance.

Si le pH de ce milieu est compris entre 4 et 9, la couche d'alumine n'est pas dissoute et le métal résiste bien.

Dans des milieux acides (pH<4), les comportements sont très variables. L'aluminium par exemple résiste bien à l'acide acétique et à l'acide nitrique concentré et froid.

Dans les milieux alcalins ($\text{pH} > 9$), l'aluminium est généralement vigoureusement attaqué. Il résiste cependant bien à l'ammoniac et à de nombreuses bases organiques.

Lorsque l'aluminium est en contact avec des matériaux comme le graphite, l'acier doux ou un alliage cuivreux, dans un milieu très conducteur d'électricité comme l'eau de mer, il subit une attaque importante qui peut aller jusqu'à sa destruction complète.

h) Oxydation anodique :

L'oxydation anodique ou anodisation permet d'édifier une couche d'oxyde beaucoup plus épaisse que la pellicule d'alumine naturelle, cette couche confère ainsi au métal :

- une bonne protection contre la corrosion,
- une amélioration de l'aspect de surface, qui va durer dans le temps ; de plus la couche anodique peut être colorée,
- une modification de plusieurs propriétés de la surface comme par exemple : isolation électrique, pouvoir réflecteur, dureté superficielle, coefficient de frottement.

Les alliages d'aluminium ne se prêtent pas de façon identique au traitement d'anodisation. Les alliages les plus aptes appartiennent aux familles 1000, 5000 et 6000.

Les alliages contenant du cuivre sont plus difficilement anodisables.

Tableau (II. 13)

Famille	Désignation
1000	la couche est d'autant plus transparente que les teneurs en fer et silicium sont faibles.
2000	la couche a une épaisseur limitée et est poreuse, ce qui diminue son pouvoir protecteur.
3000	la couche a une teinte plus ou moins grise.
5000	la couche est grisâtre et dépend des autres éléments d'addition (chrome et manganèse).
6000	le procédé d'anodisation est largement utilisé dans la menuiserie métallique.
7000	les conditions d'anodisation doivent être ajustées à la composition et au type de protection recherchée.

Conducteurs électriques :

La conductivité des alliages d'aluminium varie de 63 % pour l'aluminium pur à moins de 30 % pour certains alliages des familles 2000, 5000 et 7000.

Les conducteurs électriques sont fabriqués avec des alliages de deux familles :

1000 lorsque la résistance mécanique de l'aluminium est suffisante,

6000 lorsque le conducteur doit avoir une résistance mécanique supérieure.

j) Résistance à haute et basse température :

L'alliage dont la résistance mécanique ne diminue pratiquement pas jusqu'à une température de 150°C est le 2618A

Tableau (II. 14)

Températures	20°C	150°C	200°C
Charges de rupture	440 MPa	390 MPa	320 MPa

Pour les basses températures, atteintes dans des applications cryogéniques comme le stockage et le transport des gaz liquéfiés, on utilise le 5086 dont la charge de rupture augmente à basse température :

Tableau (II. 15)

Températures	20°C	80°C	195°C
Charges de rupture	278 MPa	295 MPa	390 MPa

II 1.7.1 Exemples d'utilisations et principaux alliages utilisés : [4]**l) Mécanique générale :****Tableau (II. 16)**

Alliages	Domaine Utilisation
2017	Pièces de machines diverses
7075 - 5754	Visserie, boulonnerie, rivets (rivets Pop)
7075	Semelles d'outillage de découpe
2219 - 4043	Baguettes de soudure

m) Aéronautique et armement :

Tableau (II. 17)

Alliages	Domaine Utilisation
2024 -7020 -7049	Munitions, tourelles de char, blindages
2024 – 2014 – 7075 - 2618	Structures d'avions, tôles de fuselage :

n) Chimie, produits alimentaires :

Tableau (II. 18)

Alliages	Domaine Utilisation
3003 – 4006	Ustensiles de cuisine (casseroles, poêles)
3105 - 1050	Capsules, boîtes de conserve, emballages, aérosols
1200 - 3003	Cuves, d'acides nitriques échangeurs
3003	Tubes d'irrigation

o) Electricité :

Tableau (II. 19)

Alliages	Domaine Utilisation
1370	Câbles haute tension
6101	Méplats conducteurs
6060	Ossature d'armoires électriques
6106	Culots de lampes, pylônes

p) Transport :**Tableau (II. 20)**

Alliages	Domaine Utilisation
5086	Ridelles, bennes, citernes
6005	Voitures de chemin de fer
3003	Caravanes, habillage de camions et d'autocars
1200, 3003, 5086	Echangeurs, radiateurs, cryogénie
6060	Panneaux de signalisation

r) Sport :**Tableau (II. 21)**

Alliages	Domaine Utilisation
7020 - 7075	Cannes de ski, inserts dans les semelles de ski
7075 - 7010	Mousquetons d'alpinisme
1050 - 3003	Articles de camping
3003	Meubles de jardin

II.1.8 Technologies de mise en œuvre :**a) Usinage :**

L'aluminium et ses alliages possèdent une bonne aptitude au travail par outils coupants, mais il y a lieu de tenir compte d'un certain nombre de particularités propres à ces matériaux.

- Les alliages légers ont une faible densité qui diminue les effets d'inertie et permet des vitesses de rotation et de translation élevées.
- La conductivité thermique élevée favorise le refroidissement, la chaleur étant évacuée presque totalement par les copeaux.
- Le faible module d'élasticité peut entraîner des déformations en cas de porte à faux.
- Les alliages contenant plus de 1 % de silicium (famille 4000, 2014A, 6081, 6181, 6082, 6351A) usent plus rapidement les outils, ce qui oblige à réduire la vitesse de coupe.

b) Traitements de surface :

Plusieurs objectifs sont dévolus aux traitements de surface :

- préparer la surface pour un assemblage ou un traitement de surface ultérieur,
- améliorer l'aspect et le rendre durable,
- protéger la surface contre la corrosion.

II.1.8.1 Traitements laissant la surface nue :

1. traitements mécaniques :

- polissage : bufflage à l'émeri, tamponnage à la pâte à polir, avivage à la pâte à aviver.
- satinage mécanique ou brossage pour obtenir un aspect mat.
- sablage, grenailage pour recouvrement métallique ou peinture ; le grenailage améliore la résistance à la fatigue de la pièce.

2. traitements chimiques :

- dégraissage en solvants, en vapeur de solvants ou en bain acide.
- décapage en bain de soude (3 à 10 % dans de l'eau à 40-70°C) suivi d'une neutralisation en bain d'acide nitrique (tous alliages sauf famille 2000) ou d'acide sulfochromique (famille 2000) et rinçage.
- brillantage en bain phosphorique-nitrique.

II.1.9 Traitements thermiques :

Le tableau ci-dessous donne les plages de températures à utiliser selon les familles d'alliages pour les différents types de traitement thermique.

La précision des températures atteintes pour les traitements de mise en solution et de revenu est importante : elle doit être au plus de $\pm 5^{\circ}\text{C}$. [8]

Tableau (II. 22)

Famille d'alliage	Recuit	Restauration	Mise en solution	Revenu
1000	325-360°C	225-280°C	-	-
2000	375-410°C refroidissement lent (40°C/h)	-	475-530°C	160-190°C
3000	345-400°C	250-300°C	-	-
5000	345-380°C	240-280°C	-	-
6000	365-410°C refroidissement lent (40°C/h)	-	530-535°C	165-185°C
7000	375-410°C refroidissement lent (40°C/h)	-	450-465°C	100-177°C

II.1.10 Precedes d'assemblage:**a) Soudage:**

L'aluminium se recouvre spontanément à l'air d'une pellicule protectrice continue d'oxyde dont le point de fusion est très élevé (2020°C). Très stable, cette couche d'alumine est un obstacle qu'il convient d'éliminer au moment du soudage.

Le soudage oxyacétylénique est utilisé généralement pour des épaisseurs jusqu'à 3 mm. Il nécessite l'emploi d'un produit chimique décapant, le flux de soudage, pour éliminer la couche d'alumine ; le flux est porté par la baguette d'apport et doit fondre à une température légèrement inférieure à celle de la baguette ; il doit être éliminé après soudage car il entraîne une corrosion de l'aluminium.

Le soudage à l'arc sous gaz inerte a l'avantage de ne pas nécessiter l'emploi de flux de soudage. Le procédé TIG (Tungsten Inert Gas) utilise une électrode réfractaire en tungstène thorié ; le soudage est fait généralement en courant alternatif sous argon. Le procédé MIG (Metal Inert Gas) utilise le métal d'apport comme électrode ; il est pratiqué en courant continu en polarité inverse (pôle négatif à la pièce) sous argon, ce qui permet une bonne élimination de la pellicule d'oxyde.

Les alliages d'aluminium peuvent aussi être soudés électriquement par point ou à la molette, par bombardement électronique qui permet de souder en une passe des épaisseurs atteignant 150 mm, par frottement et pression, par induction haute fréquence ou par ultrasons. [4]

b) Brasage :

Dans le cas du brasage fort, le métal d'apport est un alliage d'aluminium dont la température de fusion est supérieure à 450°C et inférieure à celle des pièces à assembler. Les familles d'alliages brasables sont : 1000, 3000, 5000 dont la teneur en magnésium est inférieure à 3 %, 6000 et 7000 exempts de cuivre. Dans le cas du brasage tendre, le métal d'apport a une température de fusion inférieure à 450°C ; ce sont des alliages d'étain (température de fusion entre 180°C et 260°C), des alliages de zinc (température de fusion entre 350°C et 420°C), ou des alliages de cadmium (température de fusion entre 280°C et 320°C). Dans tous les cas il est nécessaire d'utiliser un flux de décapage avant brasage qu'il faut éliminer après brasage. [4]

c) Rivetage :

Cette vieille technique est utilisée dans le cas d'assemblage sollicités mécaniquement, les efforts étant exercés dans le plan de joint des tôles ou des pièces.

Les alliages utilisés pour les rivets doivent être des alliages d'aluminium, compatibles avec les alliages des pièces à assembler pour éviter les risques de corrosion galvanique.

Les rivets sont généralement fabriqués dans les alliages 1050A et 3003 recuits ou écrouis, 5754 et 5086 recuits, 6061 et 6181 trempés et 2017A posés sur trempé fraîche. [4]

II.2 PREPARATION DES ECHANTILLION POUR SOUDAGE :

II.2.1 Choix de matériaux :

Le choix de matériaux était précisé pour obtenir des résultats fiable et riche et des réalités come suite :

- Utilisation de l'alliage 2024 dans le domaine aéronautique.
- Le manque d'expérience de soudage d'aluminium dans les ateliers commerciaux.
- Amélioration de ce genre de soudage à partir de choix de cet alliage.

II.2.2 Préparation des éprouvettes :

II.2.2.1 Etape de coupe la tôle :

La préparation des éprouvettes se fait de découpé la tôle de aluminium par un appareil industriel (**Guioutine**) en deux plaque de forme rectangulaires de dimension (15x30) cm de chaque épaisseur (20/10) mm et (30/10) mm.



Figure(II.1) : Guioutine

II.2.2.2 Etape de nettoyage :

-Le nettoyage se fait à la main avec un papier vert pour élève la pellicule d'oxyde recouvrant les tôles avant le soudage.

-Pence la tôle sur l'endroit qu'il en faire le cordon de soudure plusieurs fois jusqu'à en vois la vrais couche du métal.

II.2.2.3 Etape de chanfrein :

-Cette étape se fait avec un appareil en appelle la meule

-En fais un angle de 45° sur la longueur de la tôle pou crier un chanfrein de forme V, c'est adire en élève la matière de métal de base en vois le type de chanfrein (forme V) c'est en maître les deux tôle bout about selon la longueur des éprouvettes :



Figure(II.2) : Préparation Chanfrein de Forme V

II.3 OPERATION DE SOUDAGE :

II.3.1 Matérielle utilisé :

a) Générateur de courant :

Les installations sont dites «composites». Elles deviennent «monobloc» ou «compact» lorsque tous ces matériels se retrouvent groupés sous un même capot. Maintenant on trouve des postes compacts avec une bonne stabilité d'arc grâce à des cartes électroniques.

Les générateurs de courant utilisés en soudage TIG sont les mêmes que ceux utilisés en soudage arc avec électrodes enrobées et leur rôle est identique. Mais ces derniers ne sont utilisables en soudage TIG qu'à condition de leur adjoindre un certain nombre d'organes de commande et de stabilisation de l'arc. Ces générateurs doivent comme en soudage électrique à l'arc avec électrodes enrobées, posséder une caractéristique plongeante.

Il faut noter que les tensions à l'arc sous argon (15 à 20V) sont beaucoup plus faibles que celles utilisées en soudage à l'arc avec électrodes enrobées (20 à 40 V). En conséquence, dans le cas d'un appareil conçu pour le soudage à l'arc avec électrodes enrobées, les graduations ou repères du réglage de l'intensité ne sont absolument plus valables pour le soudage TIG.



Figure(II.3) : Poste de Soudage TIG

b) Coffret de commande:

Il regroupe des organes ayant pour rôle:

- D'établir et couper le courant de soudage
- D'admettre et d'interrompre la circulation du gaz inerte. L'interruption du débit du gaz doit être effectuée avec un temps de retard sur la rupture du courant de soudage (temporisation).
- De stabiliser l'arc par l'intermédiaire d'une platine stabilisatrice en courant continu.

c) Gaz utilisé :

On utilise des gaz inertes en soudage pour protéger le métal en fusion contre les agents oxydants de l'atmosphère ambiante.

Ainsi, on emploie l'argon pour la protection de l'endroit du bain de fusion et de l'électrode.

On peut également utiliser un mélange argon hydrogène, bénéficiant ainsi des propriétés réductrices de ce dernier.

Pour la protection de l'envers des cordons de soudure, il est possible d'employer de l'argon pur, de l'azote sec ou des mélanges argon-hydrogène ou azote-hydrogène.

Pour ce qui concerne l'azote, précisons que ce gaz ne peut être utilisé dans l'arc électrique pour assurer la protection du bain de fusion.

Ces gaz étant livrés sous diverses formes (comprimés, liquéfiés) non utilisables directement, il est nécessaire d'interposer entre la source de gaz et l'utilisateur un certain nombre d'organes. Ces organes sont principalement des détendeurs et des débitmètres qui, souvent se retrouve sous la forme d'un seul appareil combiné.

- **Les détendeurs** : leur rôle est de ramener à une pression d'utilisation (2 à 3 bars) les gaz de protection livrés à des pressions de l'ordre de 150 à 200 bars.
- **Les débitmètres** : sont destinés à mesurer, à des fins de réglage, le volume de gaz s'écoulant

Par unités de temps. La graduation de ces appareils est généralement en l/mn.

d) **Torche** :

Selon l'importance des courants utilisés, on peut employer des torches à refroidissement naturel ou à refroidissement par eau.

Elles peuvent supporter des intensités de 200 à 300 ampères.



Figure(II.4) : Torche Utilisé pour Soudage TIG

e) **Les Électrodes et les buses** :

Les électrodes utilisées en soudage TIG sont en tungstène, métal réfractaire, dont le point de fusion se situe à $3410^{\circ}\text{C} \pm 20^{\circ}\text{C}$.

On en distingue 3 types:

- **Electrodes tungstène pur** utilisées pour le soudage des métaux légers.

•**Electrodes de tungstène thorié** (1à3 %d'oxyde de thorium) utilisées plus particulièrement pour le soudage des métaux lourds.ces électrodes sont plus émissives et supportent des densités de courant plus élevées que les électrodes en tungstène pur diam. 1 -1,6 -2 -2,5 -3 -4 -5 -6.

•**Electrodes pour tous métaux** non radioactifs.

➤ **Choix des electrodes tungsten:**

Tableau (II. 23)

Diam. Electrodes (mm)	I Ampere Courant alternative
1	10-50
1.6	40-80
2.	60-110
2.4	70-140
3	90-180
4	160-240
5	300-340
6	300-450

➤ **Choix des buses :**

Les buses utilisées sont métalliques ou réfractaires; elles peuvent être opaques ou transparentes; pour facilité la vision du soudeur et du bain de fusion.

Le diamètre est choisi en fonction de l'intensité du courant de soudage.

Tableau (II. 24)

Courant de Soudage	Diamètre de Buse
< 70A	6 ou 9 mm
70-150 A	9 ou 11 mm
150-250 A	11 ou 13 mm
250-300 A	13 ou15 mm
300-500 A	15 u 18 mm

f) Metal d'apport:

Lorsque l'on doit obtenir une très haute qualité de soudage (appareils à pression, tuyauteries, récipients pour applications alimentaires, etc. ...).

Le métal d'apport doit être parfaitement nettoyé

Un métal d'apport additionnel peut être mis en œuvre:

- Manuellement (baguette).
- Sous forme de fil alimenté par un dévidoir séparé dans le cadre d'un procédé automatique.

II.3.2 Paramètre de Soudage :

Soudage TIG sous argon bout about Cu-Al avec électrode de tungstène thorie.

Courant alternatif et préchauffage à 150c°

Tableau (II. 25)

Epaisseur de métal de base (mm)	Diamètre de métal d'apport (mm)	Diamètre de tungstène (mm)	Diamètre de la buse (mm)	Débit d'argon pour soudage (l/Mn)	Débit d'argon pour protection (l/Mn)	Courant (A)	Voltage (V)	Temps de soudage (Mn)	Longueur de cordant de soudure (Cm)
20/10	1	1	5	8	6	70	16	2 :31	14
30/10	1.6	1.6	5	8	6	94	14	3 :41	21.5



**Figure(II.5) : Préparation
de Soudure avec Protection
ep 2 mm**



**Figure(II.6) : Opération de
Soudage TIG ep 2mm**



**Figure (II.7) Fixation de deux
tôle entre eux par des point de
Soudure ep 2mm**



**Figure (II.8) Cordon de Soudure
tole ep 2 mm**



**Figure (II.9) Pénétration de
Cordon de Soudure ep 2 mm**

II .4 OPERATION DE LA MECROGRAPHIQUE :

II.4.1 Enrobage :

- Avant de faire enrobage en prépare les échantillons de cordant de soudure.
- Découpé deux morceaux de cordant de soudure se forme rectangulaire de dimension de (2 x 1) cm a la main avec lame de Cie.
- En prend chacun de ces échantillons dans un moule.
- En mettre une matière qui appelé la résine.
- Le rôle de la résine ces pour protège l'échantillon.
- l'enrobage se fait avec une machine (**ENROBEUSE**)



Figure(II.10) : ENROBEUSE



**Figure(II.11) : Talons de Soudure
Enrobe par la Résine ep2 mm**

II.4.2 Polissage :

Après l'enrobage, les échantillons ont subi un polissage mécanique avec un appareil (**POULISSEUSE**) comportant trois stades :



Figure(II.12) : POLISSEUSE

- Un polissage grossier à l'aide des disques de papiers abrasifs en carbure de silicium (SiC). Ce polissage se fait selon une granulométrie décroissante des grains de SiC qui varie de 142 μ m correspondant au grade 120P à 12.5 μ m correspondant au grade 1200P selon la norme européenne F.E.P.A.



Figure(II.13) : 1^{er} Etape de Polissage

- Un polissage fin avec des abrasifs libres qui sont des pâtes en composés de diamant ayant une granulométrie de 6 μ m puis de 1 μ m, en suspension sur un tissu de polissage imbibé d'un diluant.



Figure(II.14) : 2^{ème} Etape de Polissage

- Un polissage de finition très fin avec une poudre d'alumine Al_2O_3 ayant une granulométrie de $0.05\mu m$, en suspension sur un tissu en soie imbibée d'eau distillée.



Figure(II.15) : 3^{ème} Etape de Polissage (FINITION)



**Figure(II.16) : Après Polissage
Cordant de Soudure Enrobe
par la Résine ep2 mm**

II.4.3 Attaque chimique :

-Après le polissage, l'échantillon subi un attaques chimique avec un produit (**KILER**).

-Le rôle de l'attaque chimique ces pour donné une bonne visibilité de l'échantillon devant le micrographique.

II.4.4 Analyse micrographique :

-L'examen micrographique a pour but principal la mise en évidence de la structure de l'échantillon et des inclusions qui s'y trouvent lors de l'observation au microscope optique.



Figure(II.17) : MICROSCOPE

II.4.5 Résultat de L'analyse :

D'après l'attaque chimique en mettre les' échantillons sur le microscope et en agrandie l'image à 500 x et en prend des photos avec un appareil numérique relire au microscope et en obtient les images suivant :

a) Les images de microscope de la tôle épaisseur 2 mm :



Figure(II.18) : Photo Microscope de Tôle

ep (20/10) mm 500x

a) Les images de microscope de cordon de soudure épaisseur 2 mm :



**Figure(II.19) : Photo Microscope
de Cordon de Soudure ep 2 mm 500x**

b) Les images de microscope de la zone affectée thermique épaisseur 2 mm :



**Figure(II.20) : Photo Microscope
de la Zone Affecte Thermique
ep 2 mm 500x**

II.5 OPERATION D'ESSAI DE TRACTION :

II.5.1 Généralité sur Traction :

a) Définition :

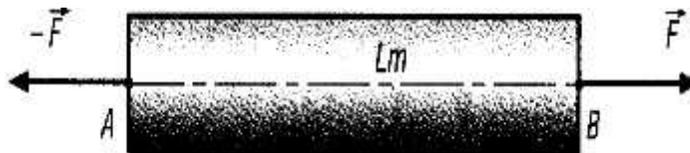
- **But :**

- Définir l'effort normal N , la contrainte normale σ , les allongements AL et ϵ .
- Décrire l'essai de traction et indiquer la loi de Hooke.

Traiter les cas particuliers: concentration de contrainte, contraintes d'origine thermique, systèmes hyperstatiques et contrainte dans une section inclinée.

- Une poutre droite est sollicitée en traction chaque fois que les actions aux extrémités (A et B) se réduisent à deux forces égales et opposées (F et $-F$) de direction la ligne moyenne (Lm).

Exemple :



b) Effort normal N :

Pour la poutre du paragraphe, faisons une coupure fictive (section droite S située à x de A) entre les deux extrémités A et B pour faire apparaître les efforts intérieurs dans la poutre. Utilisons la convention La coupure S divise la poutre en deux tronçons

. Quelle que soit la position de la coupure (ou de la valeur de x), chaque tronçon est soumis à deux forces égales et opposé.

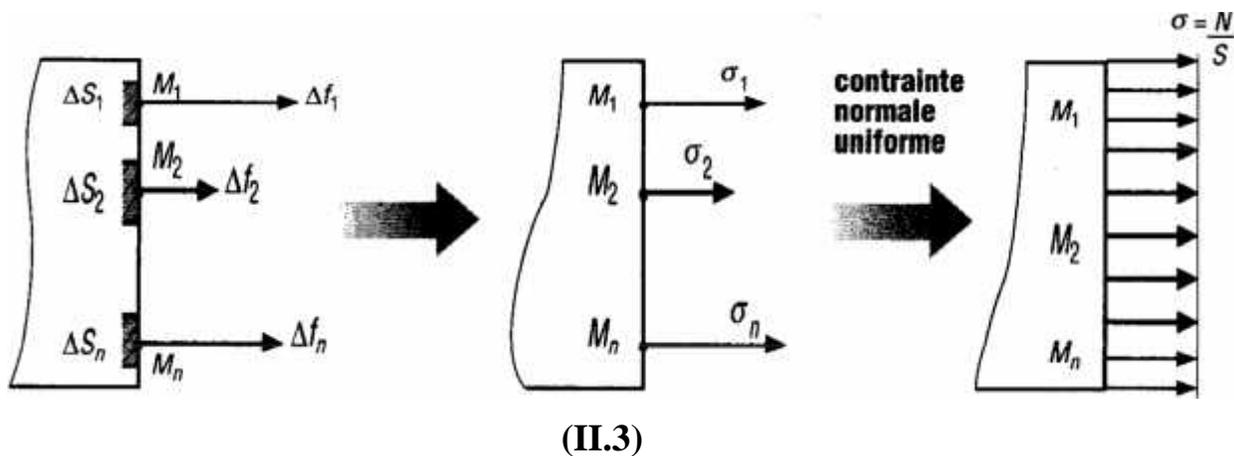
c) Contrainte normale :

Divisons la coupure S précédente en n petites surfaces élémentaires. AS_1, AS_2, \dots, AS_n ,

telle que $AS = AS_1 + AS_2 + \dots + AS_n$

(II.2)

Chaque élément de surface (AS) supporte un effort de traction f_1, f_2, \dots, f_n , parallèle à la ligne moyenne. [9]



Si M_1, M_2, \dots, M_n , sont les centres des petites surfaces ΔS , en chaque point, la contrainte est définie comme la limite du rapport f sur ΔS lorsque ΔS tend vers zéro (devient très petit).

On dit qu'il y a répartition uniforme des contraintes dans la coupure ou section droite S . Il en résulte que :

: contrainte normale en MPa ou N.mm

N : effort normal en N $\sigma = N/S$ **(II.4)**

S : aire de la section droite en mm

d) Etudes des construction:

▪ **Conditions de résistance :**

Pour des questions de sécurité liées à l'usage de l'appareil, la contrainte σ précédente doit rester inférieure à une contrainte limite admissible, appelée résistance pratique à l'extension R_{pe} . Il en sera ainsi pour toutes les constructions de ce type.

La résistance pratique R_{pe} est fixée par des normes ou par le constructeur. Dans le cas général, R_e est définie à partir de la limite élastique R_e du matériau. R_e est une donné

S : est le coefficient de sécurité adopté pour la construction de l'appareil. Sauf pour les cas où la rupture est recherchée, le coefficient de sécurité est choisi de façon à ce qu'en cours de fonctionnement normal, les contraintes normales maximales ne dépassent pas la limite élastique R_e du matériau. [9]

$$\sigma_{max} = N/S \leq R_{pe} = R_e/S \tag{II.5}$$

e) Deformations:

- Allongements:

L'expérimentation montre que les allongements sont proportionnels aux longueurs initiales.

L'allongement relatif ϵ traduit cette propriété :

$$\epsilon = (L/L_0) = (X/X_0) \text{ allongement relatif (sans unité) ou } \Delta L = L - L_0 \tag{II.6}$$

ϵ : caractérise l'allongement d'une poutre de longueur 1 (égale à l'unité).

ϵ : ne doit pas être confondu avec $A\%$

- Contraction latérale - Coefficient de Poisson :

Le coefficient de Poisson caractérise le rapport entre la contraction latérale ν , et l'allongement relatif de la poutre ϵ .

$$\nu = (d/d_0) / \epsilon = \nu \tag{II.7}$$

ν : Déformation latérale

ϵ : Déformation axiale

ν : coefficient de poisson

f) Relation entre contrainte et déformation :

- Loi de Hooke :

Pour un grand nombre de matériaux l'essai de traction montre qu'il existe une zone élastique pour la quelle l'effort F de traction est proportionnel à l'allongement L

Autrement dit la rapporte F/L est constante, analogie avec un ressort ($F= kx$)

Cette propriété est énoncée par la loi de Hooke :

En déformation élastique la contrainte nominale σ est proportionnelle à l'allongement relatif

$$\sigma = E \epsilon \tag{II.8}$$

σ : contrainte nominale MPa ou

ϵ : allongement relatif (sans unite)

E : module élasticité longitudinale MPa (est une constante caractérise du matériau)

II.5.2 ESSAI DE TRACTION :

a) Introduction :

-L'essai de traction à exercer sur une éprouvette de forme cylindrique ou parallélépipédique (plate) des force croissante, qui vont la déformé progressivement puis la rompe.

-La machine utilisé c'est 'une machine à commande numérique relié à un microordinateur exécuté les résultats directement qui contient un logiciel de calcule (**MERLIN**).

-la machine utilisé pour la traction elle contienne deux mandrin l'une elle appelle la partie fixe de la machine et l'autre elle appelle partie mobile.

-Le logiciel **MERLIN** il a besoin comme des donnes pour les résultats les caractéristiques de l'éprouvette (longueur, largeur, épaisseur, est la vitesse du mandrin mobile), est il donne les résultats suivant :

- la charge maximale : KN
- la contrainte maximale : MPa
- le pourcentage a la rupture : %
- Graphe la contrainte en fonction de pourcentage de déformation.



Figure(II.21) : MACHINE DE TRACTION

b) Préparations des éprouvettes :

-En découpe selon la largeur les éprouvettes précédente (éprouvettes soude) deux échantillons de chaque épaisseur (20/10,30/10) mm de forme rectangulaire de dimension (15x3) cm.



**Figure(II.22) : Eprouvettes pour
Essai de Traction ep (20/10) mm**

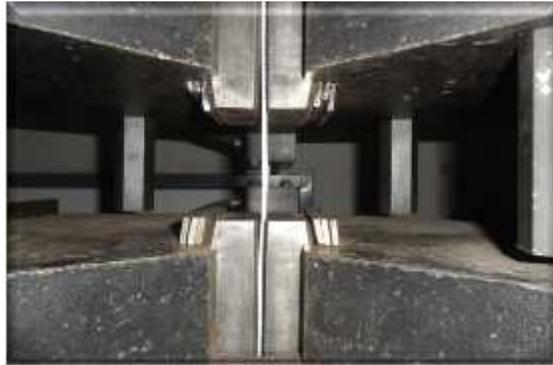
c) La manipulation :

-En mètre l'éprouvette dans la machine et fixé par les deux mandrins (mandrin fixe et mandrin mobile)

- **Paramètre de l'essai de traction :**

Tableau (II. 26)

Numéro de la manipulation	Epaisseur de l'éprouvette mm	Longueur de l'éprouvette mm	Largeur de l'éprouvette mm	Vitesse Appliqué sur l'éprouvette mm/Mn
1	20/10	128	30	3
2		134	30	2



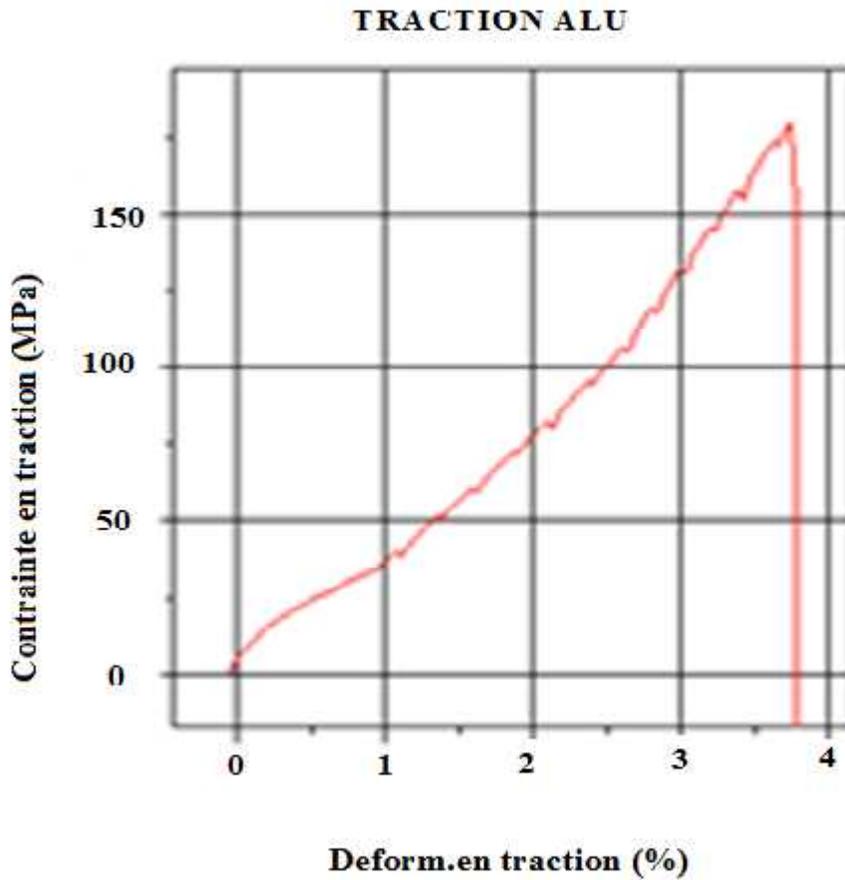
**Figure(II.23) : Eprouvette dans la
Machine Traction ep 2 mm**



**Figure(II.24) : Eprouvette au cours
l'essai de Traction ep 2 mm**

c) Résultat obtenu

- 1^{er} manipulation ep 2 mm V=3 mm/Mn

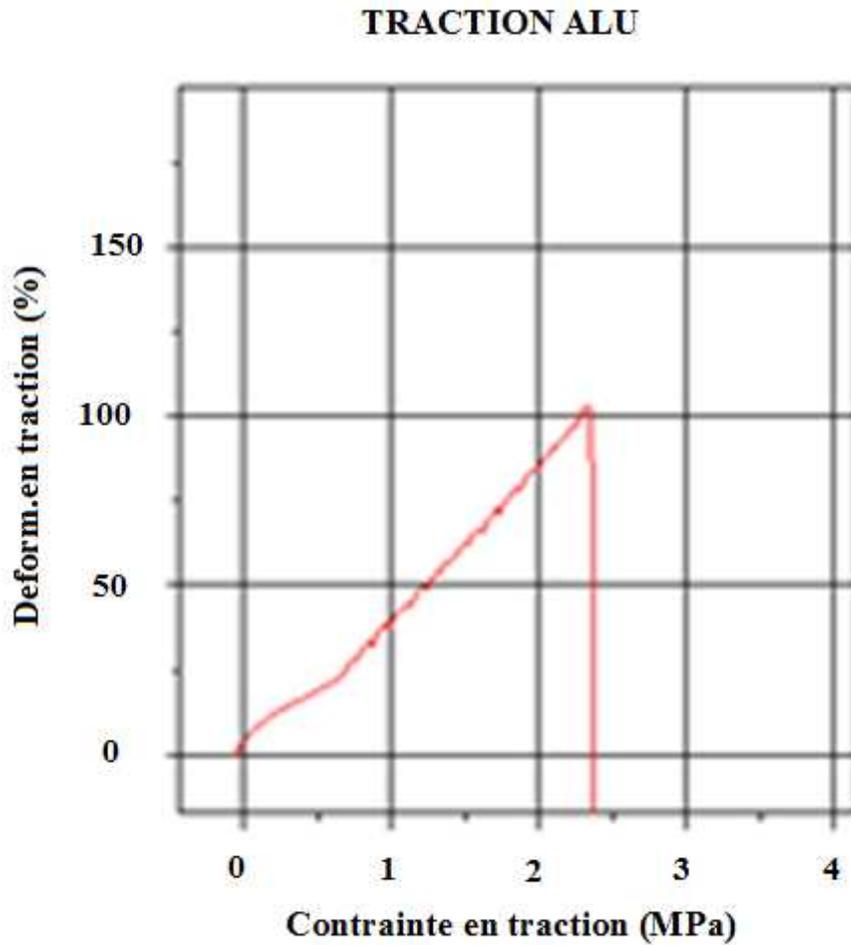


- Tableaux du résultat obtenu pour la 1^{ère} manipulation

Tableau (II. 27)

Numéro de la manipulation	Epaisseur de l'éprouvette (mm)	Charge Max (KN)	Contrainte Max (MPa)	Déformation a la rupture (%)
1	20/10	10.78	179.724	3.90

- 2^{eme} manipulation ep 2 mm V= 2 mm/Mn



- Tableaux du résultat obtenu pour la 2^{eme} manipulation

Tableau (II. 28)

Numéro de la manipulation	Epaisseur de l'éprouvette (mm)	Charge Max (KN)	Contrainte Max (MPa)	Déformation a la rupture (%)
2	20/10	6.14	102.346	2.50

II.6 OPERATION DE MICROSCOPE APRES L'ESSAI DE TRACTION :**II.6.1 Etape de microscope :****a) Préparation des échantillons pour microscope :**

-Même procédure précédant

- 1) ENROBAGE.
- 2) POULISSAGE.
- 3) ETAPE DE FINITION (par pate d'alumine).
- 4) ATTAQUE CHIMIQUE
- 5) PRENDRE DES PHOTOS AU NIVEAUX DE MICROSCOPE



Figure(II.25) :L'échantillon sur microscope

b) Les photos de microscope

**Figure(II.26) : Photo Microscope
de la Zone Affecté Thermique
ep 2 mm 500x**



**Figure(II.27) : Photo Microscope
de Cordant de Soudure
ep 2 mm 500x**

Chapitre III

Simulation numérique

III Introduction :

L'intérêt de la simulation numérique pour le soudage **TIG** est multiple.

Elle permet en effet de pouvoir s'assurer que la physique du procédé a bien été comprise, puis d'améliorer la compréhension du soudage en comparant les résultats expérimentaux à ceux de la simulation.

La simulation des déformations et la contrainte max lors qu'en pratique l'essai de traction au soudage **TIG** cette essai à été réalisé à l'aide du logiciel **MERLIN**.

Le logiciel **MERLIN** à été fait des teste au la charge maximale, contrainte max et pourcentage de déformation de l'essai de traction et compression.

III.1 LES METHODES DE DISCRETISATIONS :

Il y a deux grandes familles de méthodes de discrétisation :

- Les méthodes d'approximation des équations. Selon ces méthodes, on cherche une solution exacte des équations approchées car les opérateurs différentiels sont discrétisés sur un maillage (la méthode des différences finies et la méthode des volumes finis) .
- Les méthodes d'approximation des solutions. Selon ces méthodes on cherche une solution approchée à partir des équations exactes. Les solutions sont écrites comme des séries de fonctions tronquées aux ordres de précisions désirées (les méthodes spectrales et la méthode des éléments finis).

III.1.2 PREMIERE FAMILLE :**III.1.2.1 METHODE DES VOLUMES FINIE (M.V.F) :****A/Principe :**

La méthode des volumes finis est une technique de discrétisation qui convertit les équations de conservation aux dérivées partielles en équations algébriques qui peuvent être résolues numériquement. La technique des volumes de contrôle consiste dans l'intégration des équations aux dérivées partielles sur chaque volume de contrôle pour obtenir les équations discrétisées qui conservent toutes les grandeurs physiques sur un volume de contrôle (VC).

Le principe de discrétisation peut être illustré en considérant l'équation de transport pour une grandeur scalaire Φ , valable pour toutes les équations d'écoulement, en régime stationnaire :

$$\oint_A (\rho \Phi \vec{v}) \cdot d\vec{A} = \oint_A (\Gamma_\Phi \text{grad}\Phi) \cdot d\vec{A} + \int_{VC} S_\Phi dV \quad (\text{III-1})$$

Où : ρ La densité du fluide .

\vec{v} Le vecteur vitesse ($\vec{v} = v_x \vec{i} + v_y \vec{j}$) .

\vec{A} Le vecteur l'aire de la surface.

Γ_Φ Le coefficient de diffusion de la grandeur Φ .

grad Le gradient de Φ ($\text{grad}\Phi = \vec{\nabla}\Phi = \frac{\partial\Phi}{\partial x} \vec{i} + \frac{\partial\Phi}{\partial y} \vec{j}$) en 2D.

S_Φ Le terme source (la source de Φ par unité de volume).

L'équation (III-1) est appliquée sur chaque volume de contrôle du domaine de calcul .La discrétisation de cette équation donne : [6]

$$\sum_f^{N_{faces}} \rho_f v_f \Phi_f A_f = \sum_f^{N_{faces}} \Gamma_\Phi (\nabla\Phi)_n A_f + S_\Phi V \quad (\text{III-2})$$

Où : N_{faces} Le nombre de faces (interfaces) du volume de contrôle.

$\rho_f v_f \Phi_f A_f$ La valeur de Φ transférée par convection à travers l'interface f .

- v_f Le flux de masse a travers l'interface f .
- A_f L'aire de l'interface f $\left(\left| \vec{A} \right| = \left| A_x \vec{i} + A_y \vec{j} \right| \right)$ en 2D.
- $(\vec{\nabla}\Phi)_n$ La valeur de $\vec{\nabla}\Phi$ normal (perpendiculaire) à l'interface f .
- V Le volume du volume de contrôle (VC).

Les différentes étapes de la mise en œuvre sont :

- Le domaine de calcul est discrétisé en un nombre fini de points (les nœuds du maillage), autour desquels on définit des volumes élémentaires (appelés volumes de contrôle) contigus, non juxtaposés et sans discontinuités aux interfaces.
- Les équations modèles, sous forme conservative, sont intégrées sur chaque volume de contrôle (VC).
- Les intégrales sur un volume de contrôle en un nœud donné sont évaluées en approchant la variation de Φ par des profils ou des lois d'interpolation entre les nœuds voisins du point considéré .
- Écriture des équations algébriques en fonction des valeurs de Φ aux nœuds du maillage (Φ_i).
- Résolution du système algébrique linéaire obtenu.

B/Avantages :

- Préservation du caractère conservatif des équations sur chaque volume de contrôle (continuité des flux aux interfaces), valable pour n'importe quelle finesse du maillage .
- Mise en œuvre relativement facile .
- Applicable aux géométries complexes .
- Temps de calcul et stockage mémoire raisonnable (matrice de type bande).

C/Inconvénient:

- Moins précis que les méthodes spectrales.

III.1.2.2 METHODE DES DIFFERENCES FINIES (M.D.F) :**A/Principe :**

Le domaine de calcul est discrétisé en un nombre fini de points sur lesquels on approche les opérateurs de dérivation des équations modèles par des développements en séries de Taylor tronquées à l'ordre de précision choisie.

B/Exemple :

Soit le maillage régulier 1D :



FIG (III.1) - Maillage 1D.

Où $x = x_i - x_{i-1} = x_{i+1} - x_i$

Le développement en série de **Taylor**, autour du point « i » du maillage, de la variable inconnue, est donné par les relations :

$$\Phi_{i-1} = \Phi_i - \frac{1}{1!} \Delta x \left(\frac{d\Phi}{dx} \right)_i + \frac{1}{2!} (\Delta x)^2 \left(\frac{d^2\Phi}{dx^2} \right)_i - \frac{1}{3!} (\Delta x)^3 \left(\frac{d^3\Phi}{dx^3} \right)_i + O((\Delta x)^4) \quad \text{(III-3)}$$

$$\Phi_{i+1} = \Phi_i + \frac{1}{1!} \Delta x \left(\frac{d\Phi}{dx} \right)_i + \frac{1}{2!} (\Delta x)^2 \left(\frac{d^2\Phi}{dx^2} \right)_i + \frac{1}{3!} (\Delta x)^3 \left(\frac{d^3\Phi}{dx^3} \right)_i + O((\Delta x)^4) \quad \text{(III-4)}$$

En retenant les premiers deux termes du développement des de relation on obtient :

$$\left(\frac{d\Phi}{dx} \right)_i = \frac{\Phi_i - \Phi_{i-1}}{\Delta x} \quad \text{(III-5)}$$

Ceci signifie que la dérivée d'ordre 1, au point « i », est approchée par différence finie régressive d'ordre 1. En retenant les premiers deux termes du développement de la relation

(III-5) on obtient :

$$\left(\frac{d\Phi}{dx} \right)_i = \frac{\Phi_{i+1} - \Phi_i}{\Delta x} \quad \text{(III-6)}$$

Ce qui signifie que la dérivée d'ordre 1, au point « i », est approché par différence finie progressive d'ordre 1.

En soustrayant la relation (I-11) de la relation (I-12) on obtient l'approximation par différences finies centrales d'ordre 2 :

$$\left(\frac{d\Phi}{dx} \right)_i = \frac{\Phi_{i+1} - \Phi_{i-1}}{2\Delta x} \quad \text{(III-7)}$$

En additionnant les relations (III-4) et (III-5) on obtient l'approximation de la dérivée de deuxième ordre par différence finie centrées d'ordre 2 :

$$\left(\frac{d^2\Phi}{dx^2} \right)_i = \frac{\Phi_{i-1} - 2\Phi_i + \Phi_{i+1}}{(\Delta x)^2} \quad \text{(III-8)}$$

C/ Avantages de la méthode :

- simplicité de mise en œuvre.
- mémoire raisonnable (matrice de type bande) et temps de calcul raisonnable.

D/Inconvénients de la méthode:

- le principe de conservation n'est pas assuré après la discrétisation.
- l'apparition d'instabilités numériques .
- difficulté pour traiter les géométries plus complexes.

III.1.3 2^{em} FAMILLE :**III.1.3.1 METHODE SPECTRALE (MS):****A/Principe:**

On remplace, dans les équations modèles l'inconnue par des développements tronqués sur des bases de fonctions orthogonales (polynômes Chebychev, Legendre, Fourier) et en utilisant leur propriété d'orthogonalité on se ramène à des systèmes d'équations différentielles ordinaires plus simples à résoudre. [6]

B/ Avantage:

- Permet d'obtenir des solutions d'une très grande précision.

C/Inconvénients:

- Formulation mathématique plus complexe et mise en œuvre très délicate.
- Difficultés majeures pour traiter les géométries complexes et des conditions aux limites non académiques.

III.1.3.2 METHODE DES ELEMENTS FINIES (MEF) :**A/Principe mathématique:**

Le principe mathématique est basé sur les méthodes suivantes :

- Méthodes variationnelles (minimisation d'une fonctionnelle) ;
- Méthodes des résidus pondérés.

Le principe fondamental de la méthode des éléments finis réside dans le découpage du domaine d'étude en domaines élémentaires de dimension finie. Sur chacun de ces domaines, appelés éléments finis, la fonction inconnue est approchée par un polynôme dont le degré peut varier d'une application à l'autre mais reste en général faible.

Ces éléments, triangles ou quadrilatères, rectilignes ou curvilignes, doivent réaliser une partition du domaine d'étude (ils sont disjoints et leur union recouvre le domaine tout entier). Cette partition qui est généralement appelée découpage ou

discrétisation du domaine doit respecter un certain nombre de règles qui permettent d'assurer un bon déroulement du calcul.

B/Etapes de la mise en œuvre:

- Discrétisation du domaine en un nombre fini d'éléments.
- Choix d'un modèle d'interpolation (variation de la variable inconnue sur l'élément).
- Intégration et génération des équations modèles sous forme algébrique au niveau local (dans un élément) et détermination des vecteurs et matrices caractéristiques élémentaires.
- Elaboration de la technique d'assemblage des vecteurs et matrices locaux dans un vecteur global B et une matrice globale A.
- Choix et adaptation de la méthode numérique de résolution du système algébrique $AX=B$.

C/ Avantages:

- Apte à résoudre tout type d'équation différentielle (linéaire ou non linéaire, dépendant ou indépendant du temps et 1D ou 2D ou 3D).
- Bien adapté aux géométries complexes.

D/Inconvénients:

- Formulation mathématique plus compliquée et difficile à mettre en œuvre.
- Coûteux en stockage mémoire (matrices pleines) et en temps de calcul.
- Lourd en programmation.

III.2 Les avantages et les étapes de la simulation numérique :

1. Les avantages d'une simulation numérique :

la simulation numérique donne l'occasion :

- De simuler des phénomènes physiques complexes.
- D'étudier les interactions de plusieurs disciplines (thermodynamique, aéroélasticité).
- D'améliorer les modèles théoriques en passant des fluides parfaits (équations d'Euler) aux fluides réels (équations de Navier-Stokes).
- De mieux optimiser l'appareil en tenant compte d'un plus grand nombre de paramètres, donc en se rapprochant de plus en plus de l'écoulement réel.
- De raccourcir la durée de mise au point du prototype final.

2. Les étapes d'une simulation numérique :

- a) **Pré processing** : Préparation des données du problème (géométrie, génération du maillage de discrétisation, détermination des propriétés de matériaux), phénomènes physiques de la contrainte pourcentage de déformation
- b) **Simulation proprement dite** : Différences finis, Eléments finis, volumes finis, méthodes spectrales.
- c) **Post processing** : Visualisation du domaine de calcul et du maillage, tracé des vecteurs de force et les appuis, contours, extractions de surfaces bien définis, manipulation des graphes (contrainte, déplacement, déformation). [10]

III.3 Le SolidWorks :

a) Présentation :

Le secteur des produits de consommation se trouve confronté à des défis particuliers, puisqu'il doit rapidement lancer de nouveaux produits sur le marché avec un design ultramoderne, des fonctionnalités d'avant-garde et des coûts de fabrication concurrentiels. L'un de ces défis, et non des moindres, est la gestion du passage de la conception à l'ingénierie. En effet, les concepteurs de produits de consommation utilisent actuellement des outils spécialisés pour définir les surfaces harmonieuses qui caractérisent les conceptions industrielles de pointe. et parmi ces outils le SolidWorks.

SolidWorks est un logiciel de conception assistée par ordinateur 3D fonctionnant sous Microsoft Windows. Créé en 1993 par l'éditeur américain éponyme, SolidWorks a été acheté le 24 juin 1997 par la société Dassault Systèmes1. [10]

b) Fonctionnalités et avantages :

1) Puissance inégalée :

- Gains en vitesse et en souplesse dans la gestion des assemblages complexes.
- Soyez productifs en quelques heures et devenez un expert en quelques jours seulement.
- Améliorez vos conceptions à l'aide de formes avancées et de surfaces complexes.
- Soyez efficace à tous les niveaux de la conception.

2) Innovations synonymes de gains de temps :

- Visualisez plus facilement les conceptions à l'aide de l'interface de type « visée haute ».
- Automatisez les tâches répétitives.
- Créez plusieurs versions de la conception grâce à la gestion des configurations.
- Créez des conceptions de meilleure qualité en simulant les mouvements des assemblages.

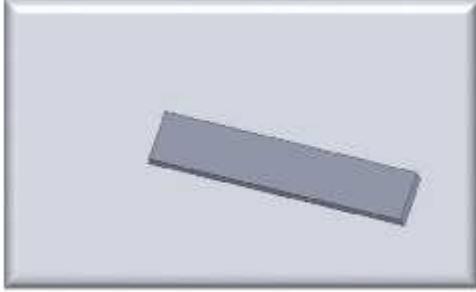
III.4 Etapes de création de la géométrie avec Solidworks :

- La conception en 3D est indispensable pour notre travail et l'une des étapes les plus importantes, pour cela nous avons choisi le logiciel SolidWorks pour les raisons qu'on a citées dans la première partie.

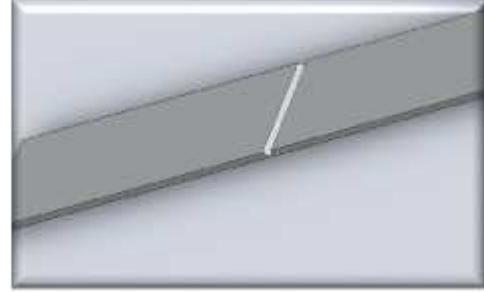
-Pour commencer notre travail, nous avons noté toutes les dimensions de la pièce « dans les mesures disponibles ».

-Après la récolte des dimensions en commençant le travail dans le logiciel dans la partie « PIÈCE », et pour faciliter le travail, et pour plus de précision nous avons divisé la pièce en deux parties.

-A la fin en fait l'assemblage des pièces avec un cordon de soudure de forme V.



**Figure (III.2) : Demi-pièce chanfreinée
avec un angle de 30 degré.**



**Figure (III.3) : Assemblage les deux
pièces sont cordon de soudure
Crée chanfrein de forme V.**

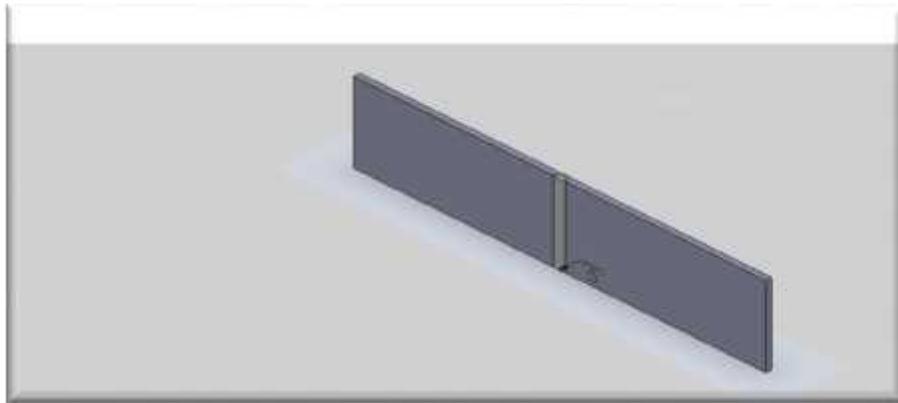


Figure (III.4) : Assemblage des deux pièces avec cordon de soudure de forme V.

III.5 Génération du maillage :

-Dans cette étape on réalise le maillage du model et du domaine de calcul et pour cela nous avons utilisé un maillage tétraédrique.

-Nous pouvant choisir la taille de chaque élément de maillage pour chaque surface du model et du domaine de calcul.

-L'analyse de la qualité du maillage ainsi que son influence sur les résultats est un point fondamental qui mérite une attention particulière.

-Théoriquement, les erreurs liées au maillage doivent disparaître pour des mailles de plus en plus fines tout en respectant les moyens de calcul disponibles, jusqu'à atteindre asymptotiquement des valeurs indépendantes de la taille des mailles.

- Ainsi, pour analyser la qualité du maillage et son influence sur la solution.

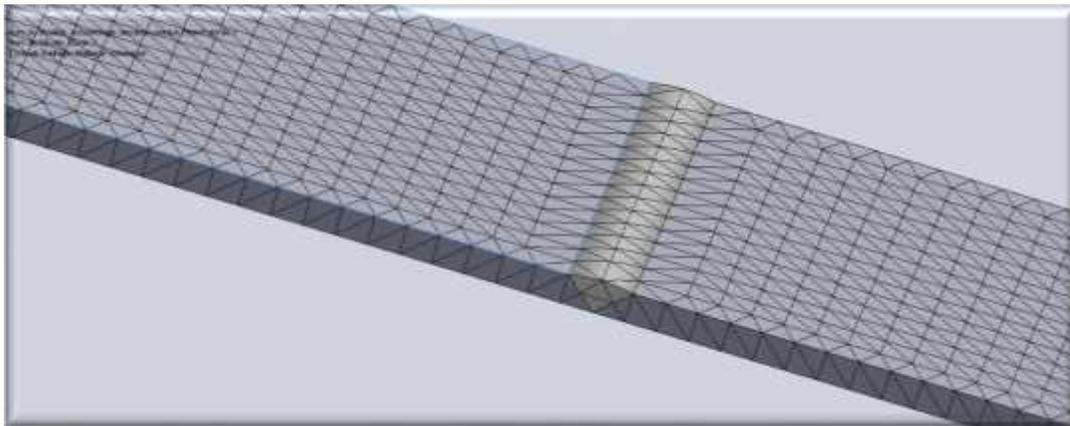


Figure (III.5) : Maillage de la pièce.

III.6 Simulation des pièces :

- Cette étape est faite par le logiciel SolidWorks.

- En faire la simulation des deux pièces, la différence entre eux est la longueur et la charge maximum appliquée.

- En fixe la pièce à un côté un appuis et en applique la charge à l'autre côté.

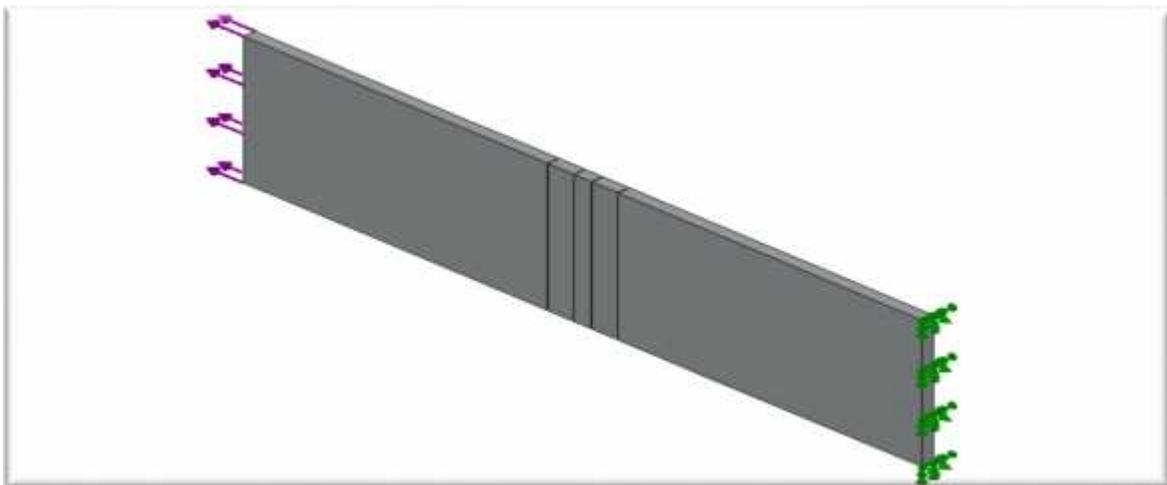


Figure (III.6) Préparation à la simulation.

III.7 Etude de simulation :

III.7.1 Analyse statique d'Assemblage1 :

Sommaire

Sommaire	98
Description	99
Informations sur le modèle	99
Propriétés de l'étude	100
Unités	100
Propriétés du matériau	101
Actions extérieures.....	102
Contact	103
Informations sur le maillage	104
Forces de réaction	106
Forces externes.....	106
Résultats de l'étude.....	107

Liste de chiffres :

Assemblage1-Etude 1-Contraintes-Contraintes1	109
Assemblage1-Etude 1-Déformations-Déformations1	109
Assemblage1-Etude 1-Déplacements-Déplacements1	110
Assemblage1-Etude 1-Coefficient de sécurité-Coefficient de sécurité1	110

Description :

Résumer l'analyse FEM sur Assemblage1 :

Informations sur le modèle :**Tableau (III.1)**

Nom du document	Configuration	Chemin d'accès du document	Date de modification
Assemblage1	-	C:\Users\CHIKH BELHADJ MOHAME\Desktop\Assemblage1.SLDAS	Sun Jun 26 11:21:35 2011
P1	-	C:\Users\CHIKH BELHADJ MOHAME\Desktop\P1.SLDPRT	Sun Jun 26 11:21:35 2011
P2	-	C:\Users\CHIKH BELHADJ MOHAME\Desktop\P2.SLDPRT	Sun Jun 26 11:21:35 2011
Cordon	-	C:\Users\CHIKH BELHADJ MOHAME\Desktop\cordon .SLDPRT	Sun Jun 26 10:19:45 2011
Zat1	-	C:\Users\CHIKH BELHADJ MOHAME\Desktop\zat.SLDPRT	Sun Jun 26 10:19:45 2011
Zat2	-	C:\Users\CHIKH BELHADJ MOHAME\Desktop\zat.SLDPRT	Sun Jun 26 10:19:45 2011

Propriétés de l'étude :**Tableau (III.2)**

Nom de l'étude	Etude 1
Type d'analyse	Statique
Type de maillage:	Maillage volumique
Effets thermiques:	Température sur le modèle
Température de déformation nulle	298.000000
Unités	Kelvin

Unités :**Tableau (III.3)**

Système d'unités:	SI
Longueur/Déplacement	Mm
Température	Kelvin
Vitesse angulaire	rad/s
Contrainte/Pression	N/m ²

Propriétés du matériau :**Tableau (III.4)**

No.	Nom du corps	Matériaux	Masse	volumique
P1	Corps volumique 1(Boss.-Extru.1)	Alliage 2024-T3	0.0101748 kg	3.66e-006 m ³
P2	Corps volumique 1(Boss.-Extru.1)	Alliage 2024-T3	0.0101748 kg	3.66e-006 m ³
Cordon	Corps volumique 1(Boss.-Extru.1)	Alliage 2024	0.000504 kg	1.8e-007 m ³
Zat1	Corps volumique 1(Boss.-Extru.1)	Alliage 2024	0.000756 kg	0.000756 kg
Zat2	Corps volumique 1(Boss.-Extru.1)	Alliage 2024	0.000756 kg	2.7e-007 m ³

Tableau (III.5)

Nom du matériau:	Alliage d'aluminium 2024-T3
Description:	P1-P2
Source Matériau:	Fuselage d'un avion
Type de modèle de matériau:	Linéaire élastique isotropique
Données d'application:	

Nom de la propriété	Valeur	Unités	Type de valeur
Module d'élasticité	7.24e+010	N/m ²	Constante
Coefficient de Poisson	0.33	NA	Constante
Module de cisaillement	2.8e+010	N/m ²	Constante
Masse volumique	2780	kg/m ³	Constante
Limite de traction	4.85e+008	N/m ²	Constante
Limite d'élasticité	3.45e+008	N/m ²	Constante
Coefficient de dilatation thermique	2.3e-005	/Kelvin	Constante
Conductivité thermique	120	W/(m.K)	Constante
Chaleur spécifique	875	J/(kg.K)	Constante

Tableau (III.6)

Nom du matériau:	Alliage d'aluminium 2024-T3
Description:	Cordon
Source Matériau:	Fuselage d'un avion
Type de modèle de matériau:	Linéaire élastique isotropique
Données d'application:	

Nom de la propriété	Valeur	Unités	Type de valeur
Module d'élasticité	7.20e+010	N/m ²	Constante
Coefficient de Poisson	0.35	NA	Constante
Module de cisaillement	2.8e+010	N/m ²	Constante
Masse volumique	2780	kg/m ³	Constante
Limite de traction	4.85e+008	N/m ²	Constante
Limite d'élasticité	3.45e+008	N/m ²	Constante
Coefficient de dilatation thermique	2.3e-005	/Kelvin	Constante
Conductivité thermique	120	W/(m.K)	Constante
Chaleur spécifique	875	J/(kg.K)	Constante

Tableau (III.7)

Nom du matériau:	Alliage d'aluminium 2024-T3
Description:	Zat1-Zat2
Source Matériau:	Fuselage d'un avion
Type de modèle de matériau:	Linéaire élastique isotropique
Données d'application:	

Nom de la propriété	Valeur	Unités	Type de valeur
Module d'élasticité	7.20e+010	N/m ²	Constante
Coefficient de Poisson	0.33	NA	Constante
Module de cisaillement	2.8e+010	N/m ²	Constante
Masse volumique	2780	kg/m ³	Constante
Limite de traction	4.85e+008	N/m ²	Constante
Limite d'élasticité	3.45e+008	N/m ²	Constante
Coefficient de dilatation thermique	2.3e-005	/Kelvin	Constante
Conductivité thermique	120	W/(m.K)	Constante
Chaleur spécifique	875	J/(kg.K)	Constante

Actions extérieures :

- **Déplacement imposé :**

Tableau (III.8)

Nom du déplacement imposé	Ensemble de sélections	Description
Appui plan-1 <P1-3>	sur 1 Face(s)Appui plan	Soudage bout à bout

- **Chargements :**

Tableau (III.9)

Nom du chargement	Ensemble de sélections	Type de chargement	Description
Force-1 <P1-1>	sur 1 Face(s) appliquer une force normale -10780 N avec une distribution uniforme	Chargement séquentiel	Soudage bout à bout

Contact :

Etat du contact: faces en contact – Libres :

Tableau (III.10)

Contact global	Contact de composant: Solidaires sur Assemblage1
Description:	Soudage bout à bout

Informations sur le maillage :**Tableau (III.11)**

Type de maillage:	Maillage volumique
Mailleur utilisé:	Maillage standard
Maillage lissé:	Activé(e)
Vérif. du Jacobien:	4 Points
Taille de l'élément:	1.0021 mm
Tolérance:	0.050103 mm
Qualité:	Haute
Nombre d'éléments:	59975
Nombre de noeuds:	97106
Durée de création du maillage (hh:mm:ss):	00:00:37

Forces de réaction :**Tableau (III.12)**

Ensemble de sélections	Unités	Somme X	Somme Y	Somme Z	Résultante
Corps entier	N	10780.1	-0.0114384	0.0238018	10780.01

Forces externes :**Tableau (III.13)**

Ensemble de sélections	Unités	Somme X	Somme Y	Somme Z	Résultante
Corps entier	N	0.00425671	4.48152e-006	4.82914e-006	0.00425672

Moments externes :**Tableau (III.14)**

Ensemble de sélections	Unités	Somme X	Somme Y	Somme Z	Résultante
Corps entier	N-m	0	0	0	1e-033

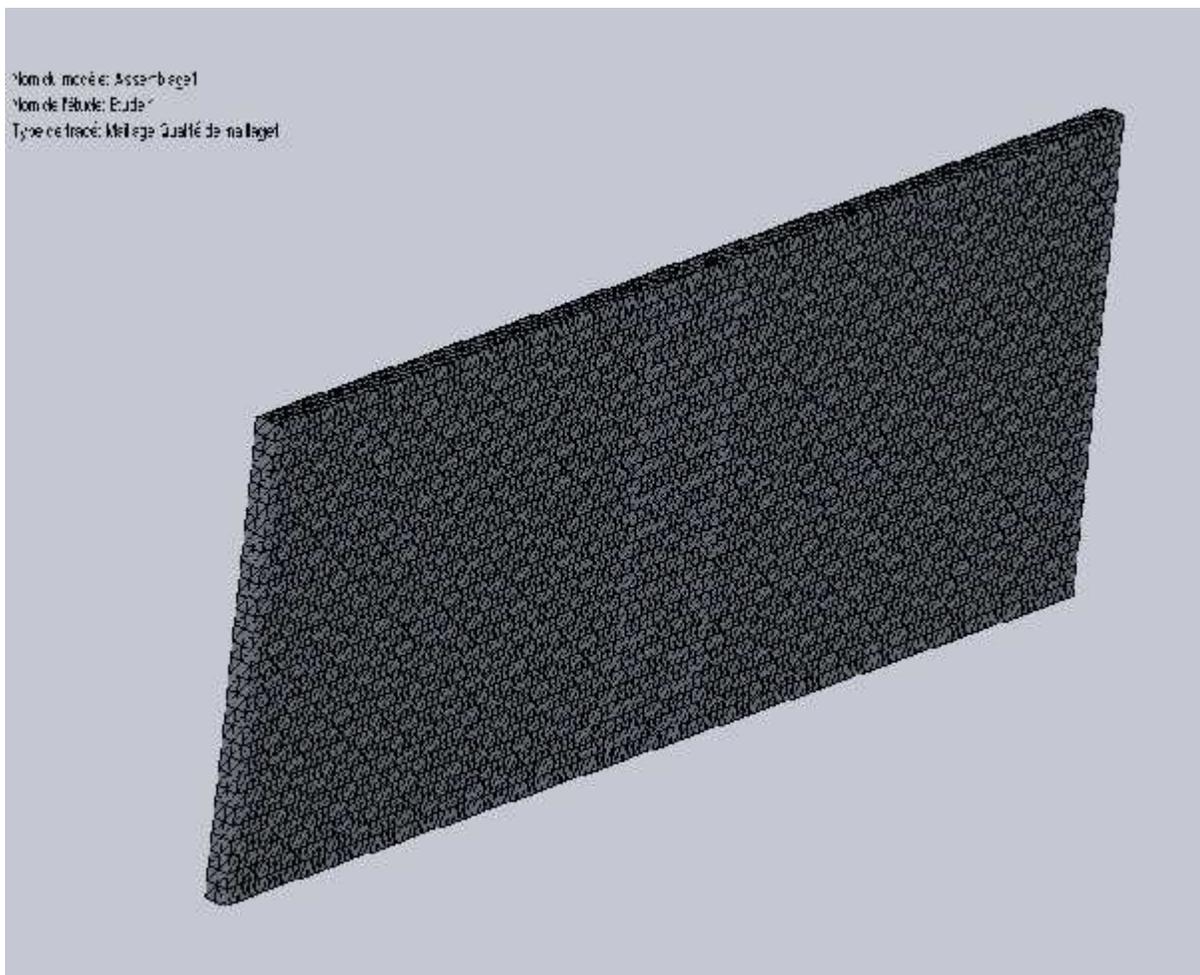
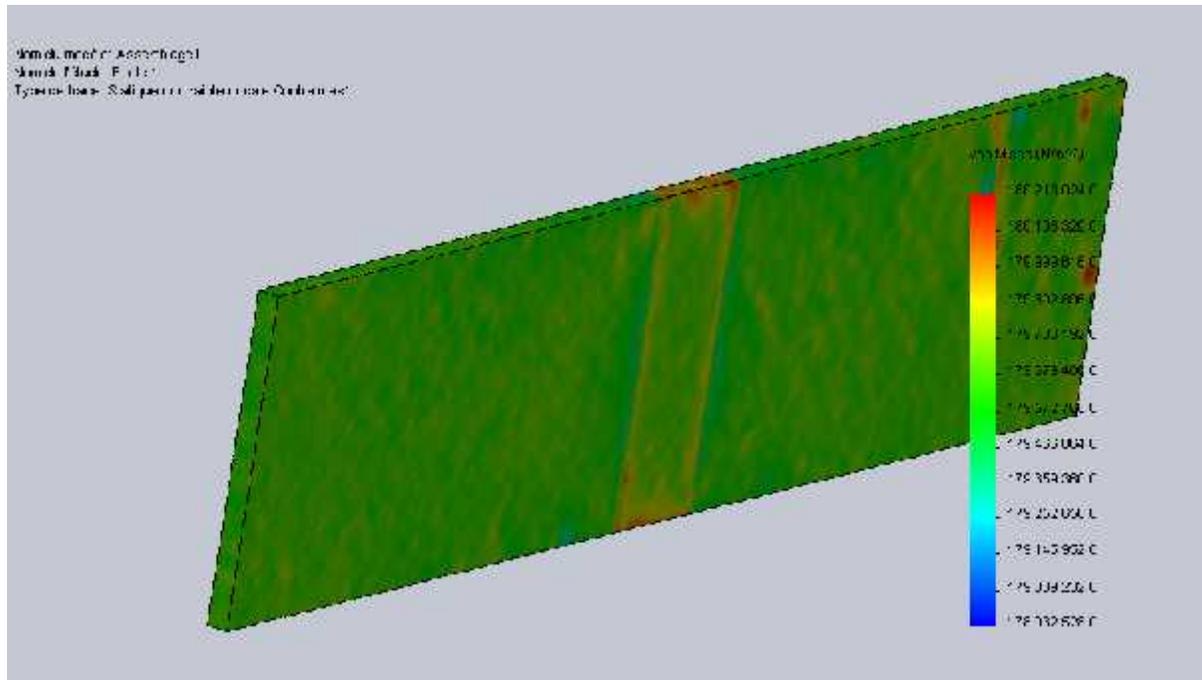
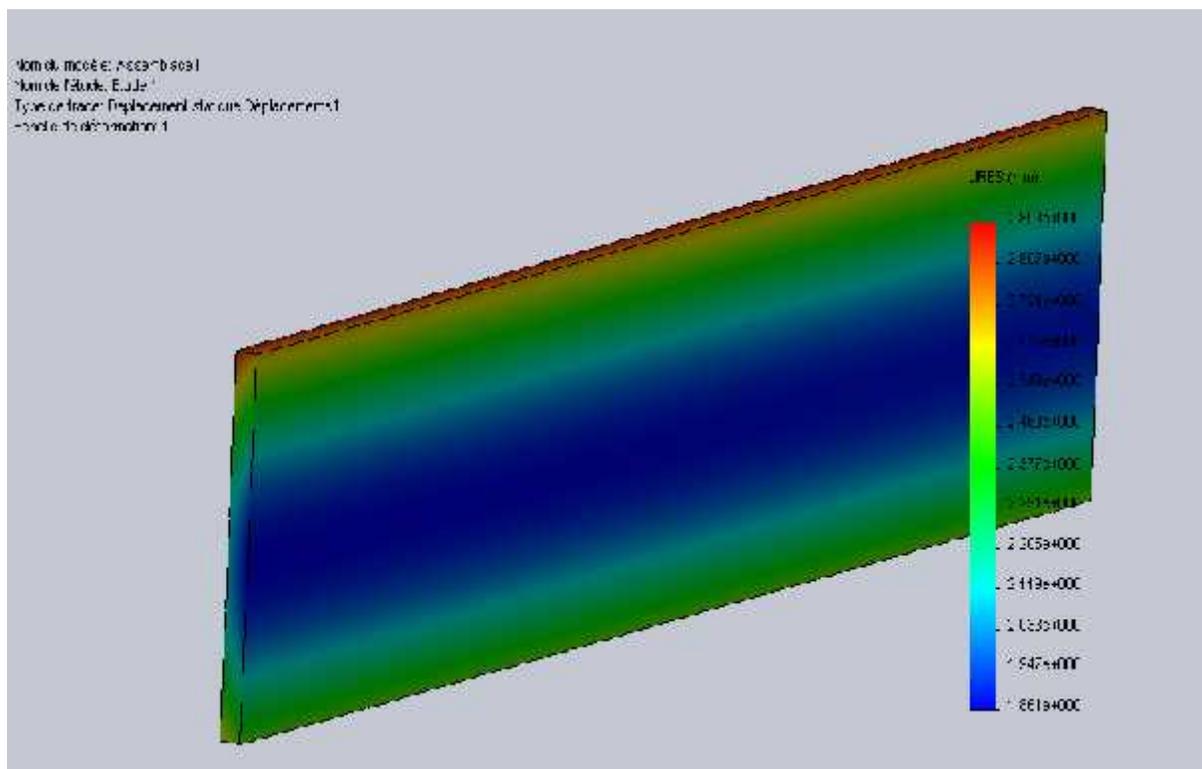
Résultats de l'étud :**Figure (III.7) : Assemblage1-Etude 1-Qualité de maillage-Qualité de maillage1.**

Tableau (III.15)

Nom	Type	Min	Emplacement	Max	Emplacement
Contraintes1	VON: contrainte de von Mises	1.78933e+008 N/m ² Noeud: 3949	(74.3662 mm, -4.92768 mm, -1 mm)	1.80213e+008 N/m ² Noeud: 93886	(13.5162 mm, 13.0723 mm, 1 mm)
Déplacements1	URES: Déplacement résultant	1.86149 mm Noeud: 88326	(-58.1338 mm, -5.28883 mm, 1.0356 mm)	2.89272 mm Noeud: 305	(76.1984 mm, 10.9575 mm, -2.94551 mm)
Déformations1	ESTRN: Déformation équivalente	0.00218116 Elément: 54768	(10.1009 mm, -8.90831 mm, 0.403971 mm)	0.00220508 Elément: 23669	(75.2575 mm, -6.1915 mm, 0.975853 mm)



Figure(III.8) : Contraintes nodale-Contraintes1.



Figure(III.9) : Déplacements statique-Déplacements1.

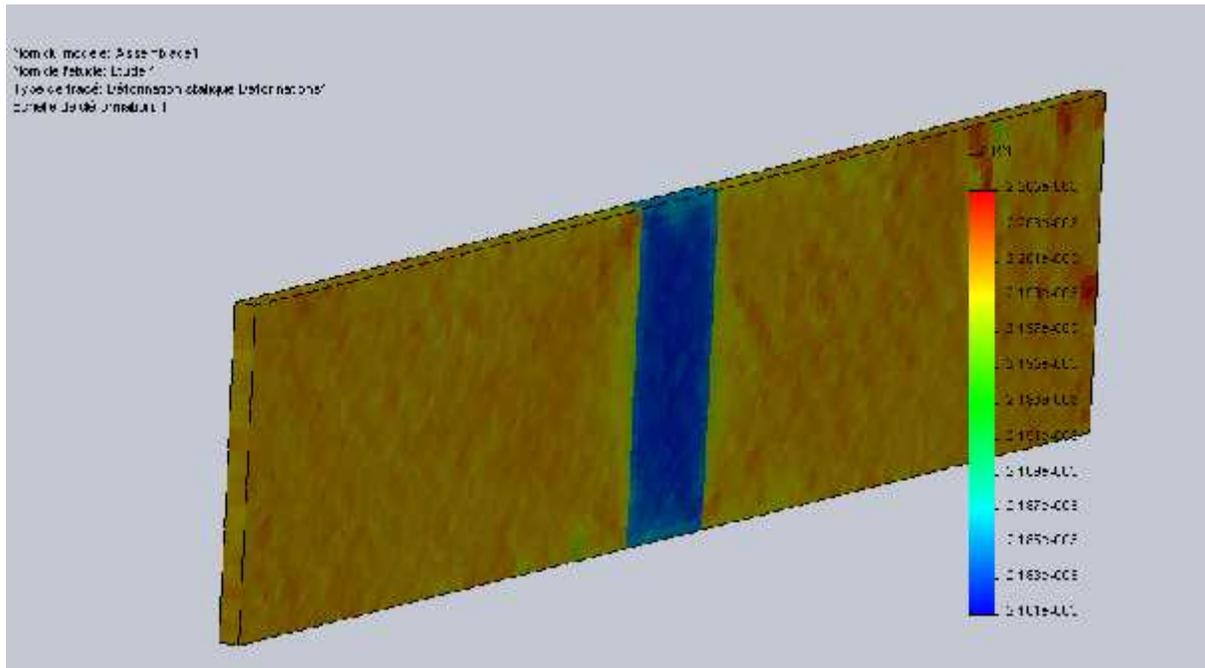


Figure (III.10) : Déformations statique -Déformations1.

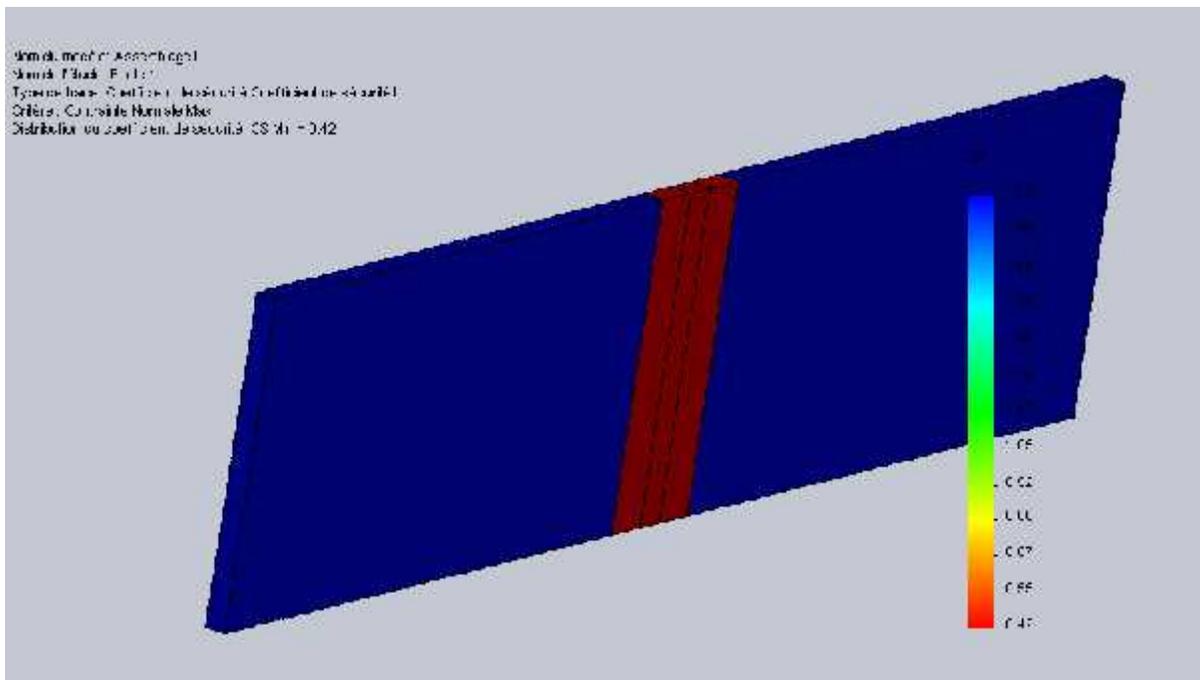


Figure (III.11) : Coefficient de sécurité-Coefficient de sécurité1.

III.7.2 Analyse statique d'Assemblage2 :**Sommaire:**

Sommaire	111
Description	112
Informations sur le modèle	112
Propriétés de l'étude	113
Unités	113
Propriétés du matériau	114
Actions extérieures.....	118
Contact	118
Informations sur le maillage	119
Forces de réaction	119
Forces externes.....	119
Résultats de l'étude.....	120

Liste de chiffres :

Assemblage1-Etude 2-Contraintes-Contraintes1	121
Assemblage1-Etude 2-Déformations-Déformations1	122
Assemblage1-Etude 2-Déplacements-Déplacements1{1}.....	122
Assemblage1-Etude 2-Coefficient de sécurité-Coefficient de sécurité1	123

Description :

Résumer l'analyse FEM sur Assemblage1 :

Informations sur le modèle :

Tableau (III.16)

Nom du document	Configuration	Chemin d'accès du document	Date de modification
Assemblage1	-	C:\Users\CHIKH BELHADJ MOHAME\Desktop\Assemblage1.SLDASM	Sun Jun 26 11:21:35 2011
P1	-	C:\Users\CHIKH BELHADJ MOHAME\Desktop\P1.SLDPRT	Sun Jun 26 11:21:35 2011
P2	-	C:\Users\CHIKH BELHADJ MOHAME\Desktop\P2.SLDPRT	Sun Jun 26 11:21:35 2011
Cordon	-	C:\Users\CHIKH BELHADJ MOHAME\Desktop\cordon .SLDPRT	Sun Jun 26 10:19:45 2011
Zat1	-	C:\Users\CHIKH BELHADJ MOHAME\Desktop\zat.SLDPRT	Sun Jun 26 10:19:45 2011
Zat2	-	C:\Users\CHIKH BELHADJ MOHAME\Desktop\zat.SLDPRT	Sun Jun 26 10:19:45 2011

Propriétés de l'étude :**Tableau (III.17)**

Nom de l'étude	Etude 2
Type d'analyse	Statique
Type de maillage:	Maillage volumique
Effets thermiques:	Température sur le modèle
Température de déformation	298.000000
Unités	Kelvin

Unités :**Tableau (III.18)**

Système d'unités:	SI
Longueur/Déplacement	Mm
Température	Kelvin
Vitesse angulaire	rad/s
Contrainte/Pression	N/m ²

Propriétés du matériau :**Tableau (III.19)**

No.	Nom du corps	Matériaux	Masse	volumique
P1	Corps volumique 1(Boss.-Extru.1)	Alliage 2024-T3	0.0096744 kg	3.48e-006 m ³
P2	Corps volumique 1(Boss.-Extru.1)	Alliage 2024-T3	0.0096744 kg	3.48e-006 m ³
Cordon	Corps volumique 1(Boss.-Extru.1)	Alliage 2024	0.000504 kg	1.8e-007 m ³
Zat1	Corps volumique 1(Boss.-Extru.1)	Alliage 2024	0.000756 kg	2.7e-007 m ³
Zat2	Corps volumique 1(Boss.-Extru.1)	Alliage 2024	0.000756 kg	2.7e-007 m ³

Tableau (III.20)

Nom du matériau:	Alliage d'aluminium 2024-T3
Description:	P1-P2
Source Matériau:	Fuselage d'un avion
Type de modèle de matériau:	Linéaire élastique isotropique
Données d'application: SOLIDWORKS	Etude de simulation(charges.....)

Nom de la propriété	Valeur	Unités	Type de valeur
Module d'élasticité	7.24e+010	N/m ²	Constante
Coefficient de Poisson	0.33	NA	Constante
Module de cisaillement	2.8e+010	N/m ²	Constante
Masse volumique	2780	kg/m ³	Constante
Limite de traction	4.85e+008	N/m ²	Constante
Limite d'élasticité	3.45e+008	N/m ²	Constante
Coefficient de dilatation thermique	2.3e-005	/Kelvin	Constante
Conductivité thermique	120	W/(m.K)	Constante
Chaleur spécifique	875	J/(kg.K)	Constante

Tableau (III.21)

Nom du matériau:	Alliage d'aluminium 2024-T3
Description:	Cordon
Source Matériau:	Air Algérie
Type de modèle de matériau:	Linéaire élastique isotropique
Données d'application:	

Nom de la propriété	Valeur	Unités	Type de valeur
Module d'élasticité	7.20e+010	N/m ²	Constante
Coefficient de Poisson	0.35	NA	Constante
Module de cisaillement	2.8e+010	N/m ²	Constante
Masse volumique	2780	kg/m ³	Constante
Limite de traction	4.85e+008	N/m ²	Constante
Limite d'élasticité	3.45e+008	N/m ²	Constante
Coefficient de dilatation thermique	2.3e-005	/Kelvin	Constante
Conductivité thermique	120	W/(m.K)	Constante
Chaleur spécifique	875	J/(kg.K)	Constante

Tableau (III.22)

Nom du matériau:	Alliage 2024-T3
Description:	Zat1-Zat2
Source Matériau:	Air Algérie
Type de modèle de matériau:	Linéaire élastique isotropique
Données d'application:	

Nom de la propriété	Valeur	Unités	Type de valeur
Module d'élasticité	7.20e+010	N/m ²	Constante
Coefficient de Poisson	0.33	NA	Constante
Module de cisaillement	2.8e+010	N/m ²	Constante
Masse volumique	2780	kg/m ³	Constante
Limite de traction	4.85e+008	N/m ²	Constante
Limite d'élasticité	3.45e+008	N/m ²	Constante
Coefficient de dilatation thermique	2.3e-005	/Kelvin	Constante
Conductivité thermique	120	W/(m.K)	Constante
Chaleur spécifique	875	J/(kg.K)	Constante

Actions extérieures :

- **Déplacement imposé :**

Tableau (III.23)

Nom du déplacement imposé	Ensemble de sélections	Description
Appui plan-3 <P1-1>	sur 1 Face(s)Appui plan	Soudage d'un bout à bout

- **Chargements :**

Tableau (III.24)

Nom du chargement	Ensemble de sélections	Type de chargement	Description
Force-1 <P1-3>	sur 1 Face(s) appliquer une force normale -6400 N avec une distribution uniforme	Chargement séquentiel	Soudage d'un bout à bout

Contact :

Etat du contact: faces en contact - Libres

Tableau (III.25)

Contact global	Contact de composant: Solidaires sur Assemblage1
Description:	Soudage d'un bout à bout

Informations sur le maillage :**Tableau (III.26)**

Type de maillage:	Maillage volumique
Mailleur utilisé:	Maillage standard
Transition automatique:	Désactivé(e)
Maillage lissé:	Activé(e)
Vérif. du Jacobien:	4 Points
Taille de l'élément:	0.98687 mm
Tolérance:	0.0098687 mm
Qualité:	Haute
Nombre d'éléments:	59251
Nombre de noeuds:	95926
Durée de création du maillage (hh:mm:ss):	00:00:27

Forces de réaction :**Tableau (III.27)**

Ensemble de sélections	Unités	Somme X	Somme Y	Somme Z	Résultante
Corps entier	N	6400.04	-0.0663948	0.0430557	6400.04

Forces externes :**Tableau (III.28)**

Ensemble de sélections	Unités	Somme X	Somme Y	Somme Z	Résultante
Corps entier	N	-0.0517407	-9.48086e-007	9.28994e-007	0.0517407

Moments externes :**Tableau (IV.29)**

Ensemble de sélections	Unités	Somme X	Somme Y	Somme Z	Résultante
Corps entier	N-m	0	0	0	1e-033

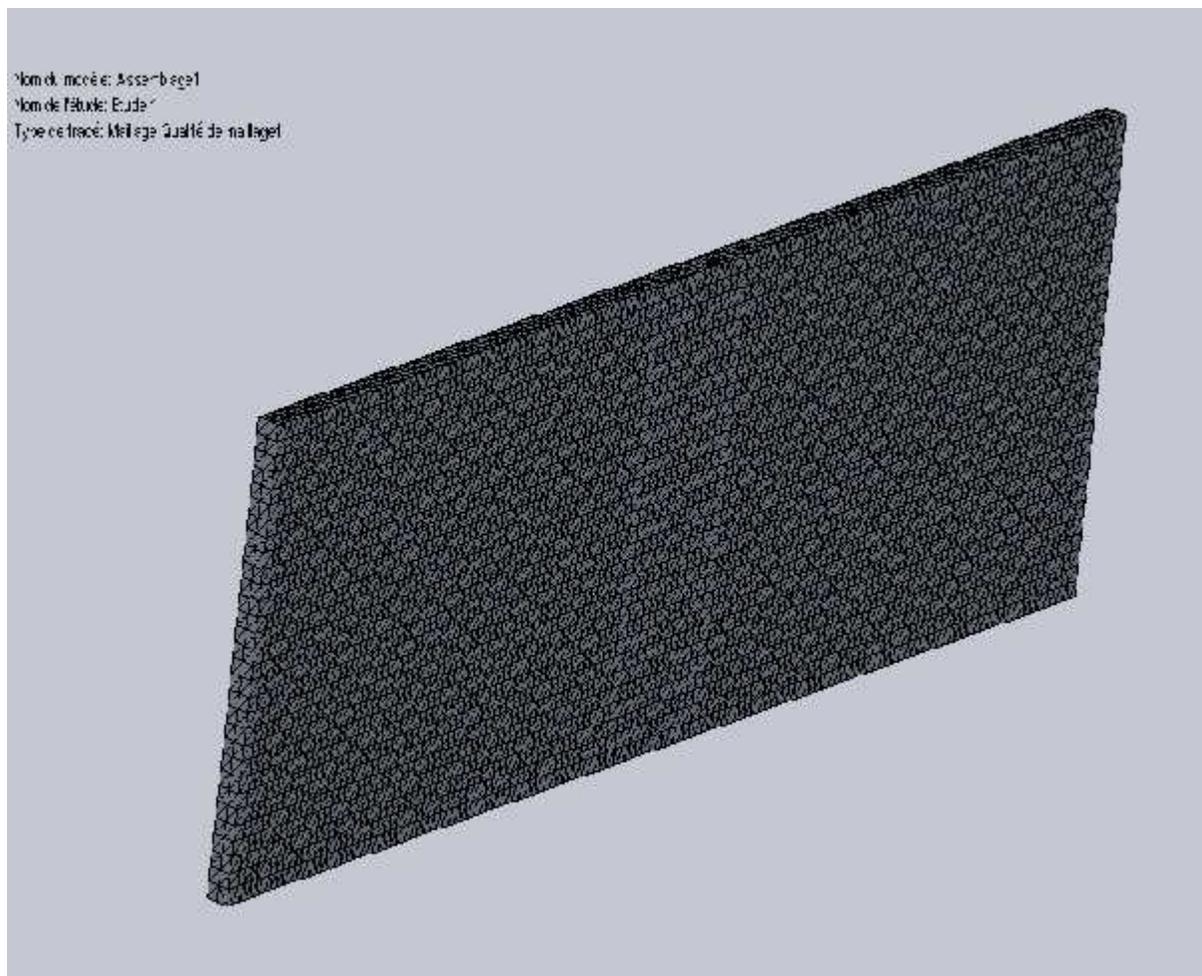
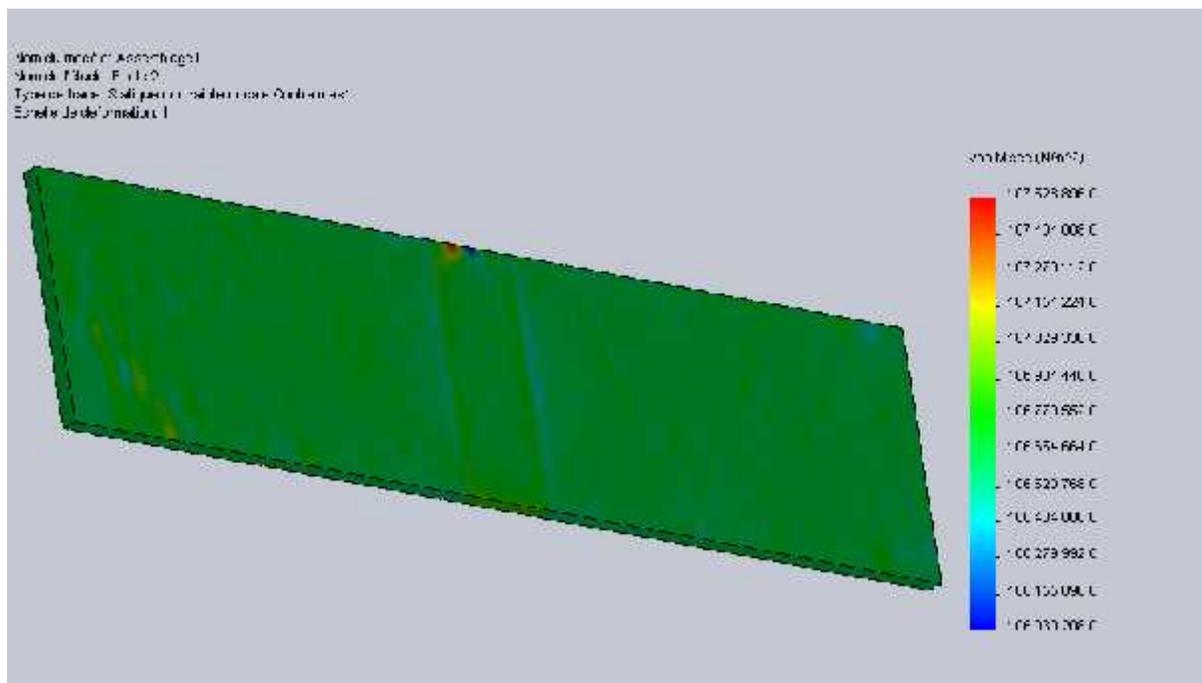
Résultats de l'étude :**Figure (III.12) : maillage-Qualité de maillage1.**

Tableau (III.30)

Nom	Type	Min	Emplacement	Max	Emplacement
Contraintes1	VON: contrainte de von Mises	1.0603e+008 N/m ² Noeud: 88785	(11.7719 mm, 12.2157 mm, 0.666776 mm)	1.07529e+008 N/m ² Noeud: 92298	(14.6261 mm, 12.2157 mm, 0.666679 mm)
Déplacements1	URES: Déplacement résultant	0.848442 mm Noeud: 41728	(75.8662 mm, -4.71156 mm, -1.00888 mm)	1.9812 mm Noeud: 43481	(-52.3222 mm, 12.0179 mm, 2.66667 mm)
Déformations1	ESTRN: Déformation équivalente	0.00129168 Elément: 56353	(13.8907 mm, 11.2544 mm, 2.34126 mm)	0.00131019 Elément: 10111	(64.876 mm, -11.4176 mm, -1.5299 mm)



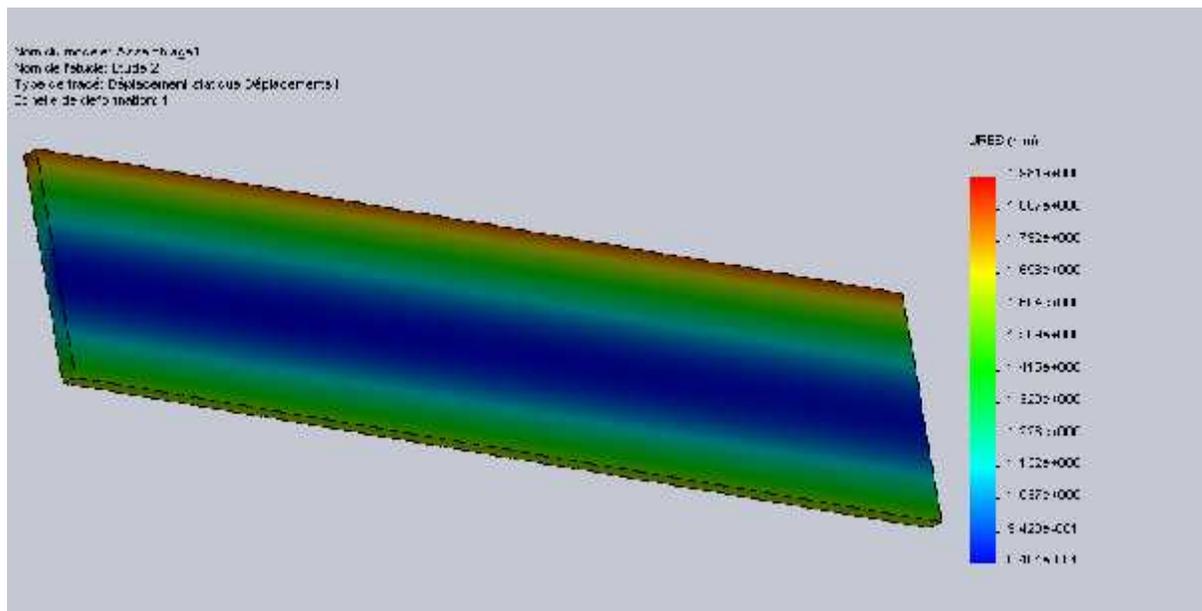


Figure (III.14) : Déplacements statique-Déplacements1.

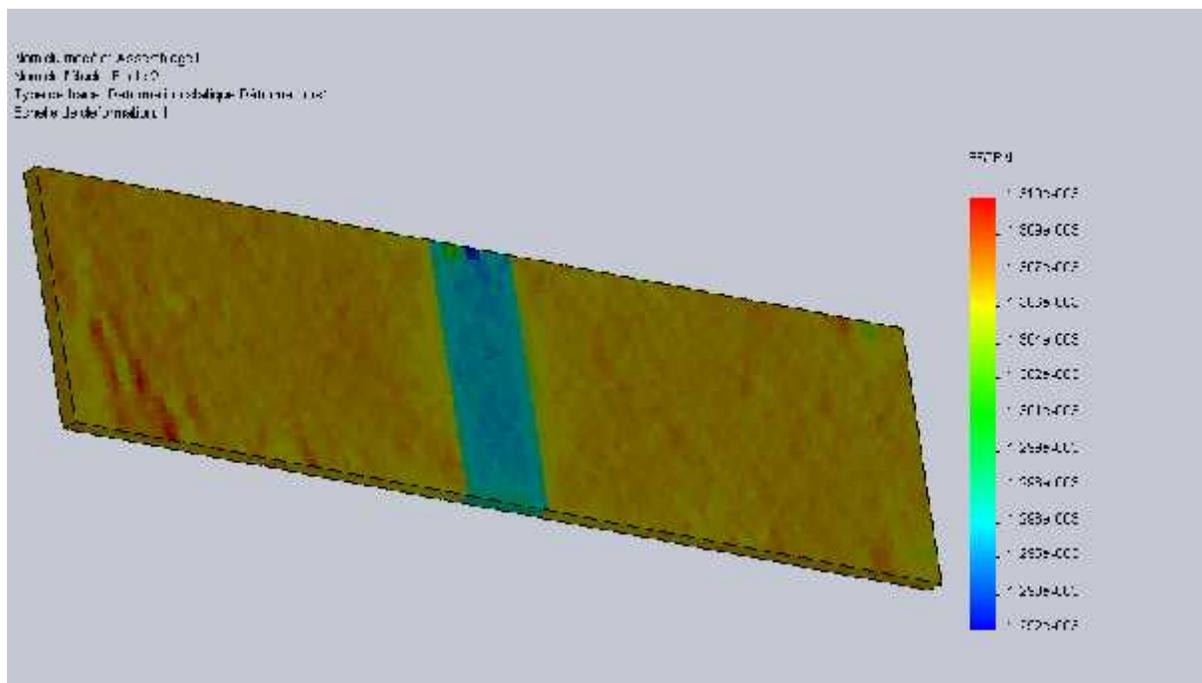


Figure (III.15) : Déformations statique-Déformations1.

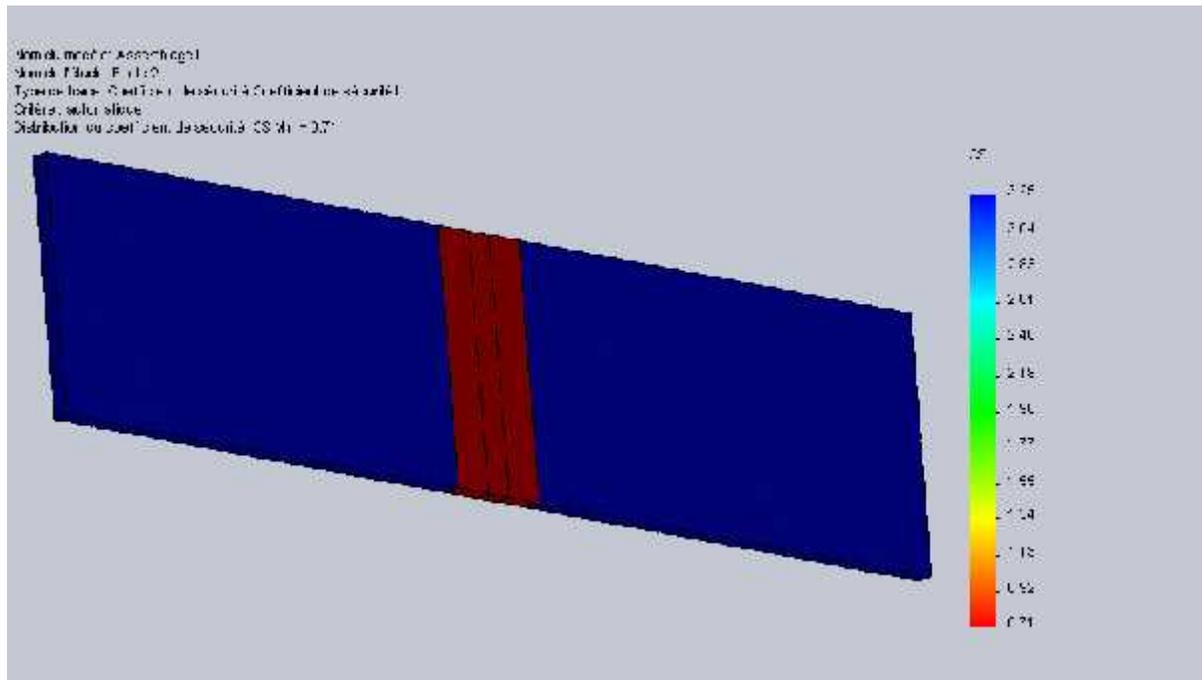


Figure (III.16) : Coefficient de sécurité-Coefficient de sécurité1.

Chapitre IV

Interprétations des résultats

IV.1 INTRODUCTION :

Dans cette d'étude on à fait des expériences de traction sur le cordon de soudure.

On obtient des résultats réalisé par pratique (Chapitre II) et des résultats par simulation numérique (Chapitre III) est on va faire l'interprétation et la comparaison des ces résultats.

IV.2 INTERPRETATION :

IV.2.1 Interprétation des résultats pour l'étude 1 :

1 / Dans la **figure (III.7)** nous avons remarqué que les résultats de simulation déduits que la contrainte de traction admissible (tolérable) varie entre

1.79892 e + 008 (N/m²) jusqu' à **1.79466 e + 008 (N/m²)**.

et que la zone dangereuse de cette contrainte est de l'ordre de

1.80213 e + 008 (N/m²), elle est situé au bout de la plaque de soudure (sure les deux bords).

2 / Dans la **figure (III.8)** nous avons déduit que le déplacement du cordons de soudures varie entre **1.86149 mm** jusqu' à **2.89272 mm**.

et que la zone dangereuse de cette déplacement est de l'ordre de **2.89300 mm**.

3/ Dans la figure(**III.9**), nous avons déduit que la déformation statique est située entre les deux pourcentages **0.218116 %** et **0.220508 %**.

et la déformation maximale est de l'ordre **0.2205 %** comme première étude de simulation nous avons constate que le cordon de soudure et la partie

(Z.A.T) possèdent t la valeur r minimale de déformation et qui est de l'ordre **0.2181 %**. 4/ Dans la figure (**III. 10**) il est clair que le coefficient sécurité admissible est

situé aux niveau du cordon de soudure et est de l'ordre **C s=0.42**.

IV.2.2 Interprétation des résultats pour l'étude 2 :

1 / Dans la **figure (III.12)** nous avons remarqué que les résultats de simulation déduits que la contrainte de traction admissible (tolérable) varie entre

1.06030 e + 008 (N/m²) jusqu' à **1.07529 e + 008 (N/m²)**.

et que la zone dangereuse de cette contrainte est de l'ordre de

1.07404 e + 008 (N/m²), elle est situé au bout de la plaque de soudure (sure les deux bords).

2 / Dans la **figure (III.13)** nous avons déduit que le déplacement du cordons de soudures varie entre **0.848442 mm** jusqu' à **1.98120 mm**.

et que la zone dangereuse de cette déplacement est de l'ordre de **1.88700 mm**.

3/ Dans la **figure(III.14)**, nous avons déduit que la déformation statique est située entre les deux pourcentages **0.129168 %** et **0.131019 %**.

et la déformation maximale est de l'ordre **0.1310%** comme première étude de simulation nous avons constate que le cordon de soudure et la partie (Z.A.T) possèdent t la valeur r minimale de déformation et qui est de l'ordre **0.1298 %**

4/ Dans la **figure (III. 15)** il est clair que le coefficient sécurité admissible est

Situé au niveau du cordon de soudure et est de l'ordre **C s=0.71**.

IV.3 Comparaissent entre l'étude pratique et l'étude théorique.

1/Dans le **tableau (II.27)**, nous remarquons que le résultat expérimentalement obtenu que la contrainte maximale est de l'ordre **1.79724 e + 008 (N/m²)**.

elle très proche des résultats de la simulation effectuée (**Etude 1**).

et mémé pour la déformation expérimentale qui a l'ordre **3.9%**

Nous ne constatons qu'une déférence par rapport aux résultats de simulation.

2/Dans le **tableau (II.28)**, nous remarquons que le résultat expérimentalement obtenu que la contrainte maximale est de l'ordre **1.02346 e + 008 (N/m²)**.

elle très proche des résultats de la simulation effectuée (**Etude 2**).

et mémé pour la déformation expérimentale qui a l'ordre **2.5%**

Nous ne constatons qu'une déférence par rapport aux résultats de simulation.

IV.4 Conclusion

Après l'interprétation et la comparaison entre les résultats de l'étude pratique et la simulation numérique on dit :

Au cours de la réalisation des cordons de soudure on 'à subit un problème de protection avec l'argon.

CONCLUSION GENERALE :

L'importance de l'étude d'un cordon de soudure en TIG apparaît dans les objectifs suivants :

- 1-Sécurité matérielle (Un objet obtenait d'un cordant de soudure en aluminium).
- 2-amélioration ce type de soudure(TIG).
- 3-apparaître les défauts de ce type de soudure.
- 4- Détermination les performances et les limites conseillées des soudures en TIG pour la sécurité d'un objet mécanique délicat, c'est à dire les valeurs critiques pour les caractéristique de soudure (la vitesse de soudure, la quantité de gaz utilise et son nature etc.)
- 5-Donner une base théorique de la soudure en TIG.

Ce travaille a passe par étapes pour être réalise. Les grandes étapes utilisées sont :

- 1-Soudage.
- 2-Micrographie.
- 3-Essai de traction.
- 4-Simulation numérique par SolidWorks.

Grâce à cette étude, on a pu connaître les différentes étapes d'une simulation (Géométrie, Assemblage, Génération du maillage, Simulation, Validation des résultats,). Elle nous a aussi permis une assez bonne familiarisation avec le logiciel utilisé SolidWorks, ainsi qu'une connaissance plus approfondie des problèmes de la répture d'un cordon de soudure.

Pour conclure, espérons que ce projet sera bénéfique, utile et de bonne référence pour les constructeurs et les futurs ingénieurs qui vont utiliser les outils soit numériques ou expérimentale présents dans ce mémoire.

-Bibliographie

- [1] : R.Varizllag “Soudage : élément de conception et de réalisation“ 2^{ème} édition DUNOD 1987.
- [2] : ROLAND. CASES Soudage a l’arc, “Technique d’ingénieur 2000“ partie B7730.
- [3] : PIERRE DAIGLE Le procédé T.I.G, Centre de formation professionnelle de l’outawais.
- [4] : <http://fr.wikipedia.org/wiki/Aluminium>.
- [5] : R.BAUS, W.Chapeau “Application du soudage à la construction”.éditeur Eyrolles N°3343, 3^{ème} trimestre 1979.
- [6] : ROSENTHAL .D: “Mathematical theory of heat distribution during welding and cutting”, Welding Journal (1947), 20May, PP.220_s to 234_s.
- [7] : ROGER DEVELAY “Données numériques sur l’aluminium”, Technique d’ingénieur - partie M443.
- [8] : S BENAZZOUZ, R OUCHEBER “ Etude de l'effet de l'inclinaison d'une soudure par TIG sur la répartition du champ thermique d'un assemblage en matériaux aéronautique“ Mémoire de fin d’étude, Département d’aéronautique, université de Blida (juin 2006).
- [9] : GUIDE DE MECANIQUE « JEAN-LOISFRANCHON » Resistance des matériaux chapitre 21 page 277.
- [10] : SITE WEB « Google » www.simulationnumeriquedescordonsdesoudure.com