

Université de Blida

Département d'aéronautique

# MÉMOIRE

PRESENTEE EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME DE  
DE L'INGENIEUR D'ETAT EN AERONAUTIQUE

SPECIALITE : STRUCTURE

PRESENTE

PAR

BERKANI KRIMO

---

ETUDE COMPARATIVE ENTRE  
DEUX PROCEDES D'ASSEMBLAGE,  
LE SOUDAGE TIG ET LE RIVETAGE  
EN AERONAUTIQUE

---

Soutenu en juin 2011

Rapporteur  
M. temmar

*Membres du jury*

Examineurs

# Résumé

Notre travail consiste à étudier deux procédés d'assemblage différents à savoir le rivetage et le soudage TIG. Ceux sont les principaux procédés d'assemblages.

Pour mieux connaître leurs caractéristiques, nous allons procéder à un essai de traction pour le soudage et un effet de traction pour le rivetage. Le tout sera simulé grâce à un logiciel de simulation. Pour arriver à déterminer ces caractéristiques, nous devons faire une recherche biographique sur le procédé de soudage, le rivetage et sur les alliages d'aluminium 7075 T6. La partie expérimentale suivra cette démarche. Après étude, le rivetage présente des discontinuités physiques. Par contre, le procédé de soudage offre plus d'avantage et moins d'inconvénients du fait que les charges appliquées en soudage ne peuvent pas être supportées par les rivets. C'est dans ce cas que le procédé de soudage pourrait être une technique d'assemblage concurrente dans le domaine de l'aéronautique.

# Abstract

Our work consists in studying two different processes of assembly to knowing riveting and welding TIG. Those are the main processes of assemblies.

For better knowing their characteristics, we will proceed for a tensile test for welding and a purpose of traction for riveting. The whole will be simulated by software of simulation. To manage to determine these characteristics, we must make a biographical research on the process of welding, riveting and on aluminum alloys 7075 T6. The experimental part will follow this step. After study, riveting has physical discontinuities. On the other hand, the process of welding offers more advantage and less disadvantages owing to the fact that the loads applied in welding cannot be supported by the rivets. It is in this case that the process of welding could be a concurrent technique of assembly in the field of aeronautics.

# Remerciements

Il n'est meilleur remerciement que notre reconnaissance à DIEU qui nous a donné du courage et de la volonté pour pouvoir accomplir ce présent travail.

Le travail présenté dans ce mémoire a été effectué au sein du département d'aéronautique sous la direction de monsieur M. TEMMAR à qui je présente ma profonde gratitude et mes vifs et sincères remerciements pour avoir accepté de diriger ce travail et pour sa disponibilité et tous les conseils et les encouragements qu'il nous a prodigué pendant toute la durée de ce travail.

Je tiens à remercier tout particulièrement, ma femme, mon père, ma mère, mes frères et tous les membres de la famille BERKANI d'avoir m'aider chacun à ça façon durant mon travail

Je tiens à exprimer ma reconnaissance envers mes amis de la promotion en particulier monsieur MOHAMMED TAIFOUR ABDELOUAHAB pour son dynamisme et son ambiance.

Merci à tous nos amis de promotion **2011**

---

---

# Nomenclature

---

---

T	= température (°C)
t	= temps (s)
$\alpha$	diffusivité thermique du matériau ( $\text{m}^2/\text{s}$ )
$\lambda$	conductibilité thermique du matériau ( $\text{J}/\text{m}^3\text{Ks}$ )
$\rho c$	capacité calorifique volumique ( $\text{J}/\text{m}^3 \text{ k}$ )
$T_0$	température initiale (°C)
$q_0$	puissance absorbée (W)
v	vitesse de la soudure (m/s)
E	Tension de l'arc (V)
d	épaisseur du matériau (mm)
V	Vitesse d'avance de la torche (mm/s)
$f_1$	coefficient d'efficacité de transfert de chaleur
$\rho$	Masse volumique ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )
E	Module d'élasticité (MPa)
RP	Limité élastique (MPa)
Rm	Limité à la rupture (MPa)

---

# Liste des figures

---

Figure I.1: utilisation d'alliages d'aluminium en aeronautique .....	3
Figure II.1: systeme vis/ecrou utilise pour les fixations des structures d'avions lorsque les contraintes sont en cisaillement .....	9
Figure II.2: schema simplifie du gain de masse rivet et soudure .....	10
Figure II.3 : les differents procedes de soudage .....	12
Figure II.4 : sources thermiques et densites d'energie .....	13
Figure II.5 schema representant la definition du systeme de coordonnees .....	15
Figure II.6 exemple de manque de penetration .....	16
Figure II.7 : exemple de fissure a froid .....	17
Figure II.8 : un poste de procede de soudage tig .....	18
Figure II.9 : application du procede de soudage tig .....	18
Figure II.10 : principe de l'application de la torche du procede de soudage .....	19
Figure II.11: forme des electrodes pour soudage tig .....	20
Figure II.12 : apparition d'une fissure lors du soudage tig d'un alliage d'aluminium 7075 t6 (epaisseur = 2 mm) .....	22
Figure III.1 assemblage rivete .....	24
Figure III.2 riveteuse .....	25
Figure III.3 exemple de rivets .....	25
Figure III.4 : torseur de cohesion .....	26
Figure III.5 comportement d'un assemblage rivete .....	27
Figure III.6 rivet en double cisaillement .....	28
Figure III.7 rivet en simple cisaillement .....	28
Figure III.8 la repartition des efforts induits par f dans chaque liaison rivete est ...	29
Figure III.9 pression de contact .....	29
Figure IV.1 eprouvette de l'essai de traction normalisee .....	35
Figure IV.2 les differentes etapes de realisation d'une eprouvette lors de L'essai de traction .....	35
Figure IV.3 eprouvette preparee .....	36
Figure IV.4 essai de traction sur une eprouvette d'epaisseur de 2 mm .....	36
Figure IV.5. les déplacements, .....	39
Figure IV.6. contours des deformations .....	39
Figure IV.7 contours des repartitions des contraintes .....	40
Figure IV.8 comportement du cordon de soudure .....	40
Figure IV.9. contours des repartitions des contraintes .....	41
Figure IV.10. contours des déplacements .....	41
Figure IV.11 contours des deformations .....	42
Figure IV.12 comportement du rivet .....	42
Figure IV.13.les contraintes .....	43
Figure IV.14. repartition des contraintes le long de l'eprouvette .....	44
Figure IV.15. : deformations atteintes le max (0.0135e) a la surface du .....	45
Figure IV.16. : deformations .....	45
Figure IV.17 déplacements de rivet.....	46
Figure IV.18 déplacements de l'eprouvette .....	46

---

# Liste des tableaux

---

---

Tableau I.1 le classement en series de l'aluminium association7000 .....	5
Tableau I.2 caracteristiques physiques des alliages de la serie .....	6
Tableau IV.1 : caracteristiques physiques du materiau.....	34
Tableau IV.2 caracteristiques de l'essai de traction (epaisseur = 2mm) .....	37

# Table des matières

---

---

INTRODUCTION .....	1
CHAPITRE 1 .....	2-7
I.1 introduction .....	3
I.2 l'aluminium et ses alliages .....	4
I.2.1 principales caracteristiques de l'aluminium .....	4
I.2.1.1 masse volumique .....	4
I.2.1.2 resistance a la corrosion .....	4
I.2.1.3 la conductibilite electrique .....	4
I.2.1.4 proprietes mecaniques .....	4
I.2.1.5 proprietes de mise en forme .....	5
I.3 designations des alliages .....	5
I.4 serie 7000 (aluminium zinc) .....	6
CHAPITRE 2 .....	9-21
II.1 introduction .....	9
II.2 generalites .....	10
II.3 description du procede de soudage .....	10
II.3.1 definition .....	10
II.3.1.1consequences metallurgiques .....	11
II.3.1.2consequences geometriques et mecaniques. ....	11
II.3.2 caracteristiques de la soudure .....	13
II.3.3 aspects thermiques lies au soudage .....	14
II.3.4les principaux defauts de soudage .....	16
II.3.5controle des soudures .....	17
II.4. Principaux procedes de soudage .....	17
II.5. Procede de soudage tig .....	18
II.5.1. Principe du procede de soudage tig .....	19
II.5.2. Caracteristiques du procede de soudage tig .....	20
II.6. Soudage des alliages d'aluminium .....	21
II.6.1. Technique de soudage .....	21
CHAPITRE III .....	24-31
III.1generalites .....	24
III.2 definition .....	24
III.3type de rivet .....	25
III.4 mode de calcul .....	27

---

---

<b>CHAPITRE IV</b> .....	32-48
IV.1 généralités .....	32
IV.2 notions de conception .....	32
IV.3 role des essais mécaniques .....	33
IV .3.2 les essais mécaniques .....	33
IV.3.2.1 essai de traction .....	33
IV.4 partie expérimentale .....	34
IV.4.1 essai de traction .....	35
IV.5 simulation des résultats .....	37
IV.5.1 introduction .....	37
IV.5.2 application d'un logiciel de simulation.....	38
IV.5.2.1 pour l'essai de traction et du rivetage .....	38
IV.5.2.1 présentations des résultats .....	39
a- les résultats correspond a la soudure .....	39
b- les résultats correspondent au rivet .....	41
IV.5. 2.2 présentation des graphes .....	43
a - les contraintes .....	43
b- les déformations .....	45
c- les déplacements .....	46
IV.6 discussions .....	47
IV.6.1 les contraintes .....	47
IV.6.1.1 la limite d'élasticité .....	47
IV.6.2 les déformations .....	47
IV.6.2.1 la déformation .....	47
IV.6.2.2 la ductilité .....	47
 Conclusion .....	 48
Bibliographie .....	48

# Introduction générale

---

---

Les pièces mécaniques (appareils, machines,...) sont obtenues par plusieurs procédés : moulage, **assemblage**, formage (laminage, forgeage, estampage, ...) ou usinage (coupe des métaux).

Les principaux systèmes d'assemblages utilisés sont le rivetage et le boulonnage. Les assemblages soudés se distinguent des assemblages boulonnés, rivetés, agrafés,... par la continuité qu'ils assurent, absence de possibilité de jeu. Lors de leur utilisation, ces procédés présentent des discontinuités physiques ou chimiques. Par contre, et dans certains domaines d'applications, le procédé de soudage offre plus d'avantage et moins d'inconvénients. C'est dans ce cas que le procédé de soudage pourrait être une technique d'assemblage concurrente dans le domaine de l'aéronautique.

A travers notre étude, nous allons faire une recherche biographique sur le procédé de soudage, le rivetage et sur les alliages d'aluminium 7075 T6. Pour caractériser cette soudure, nous allons utiliser l'essai de traction. La première partie de notre travail concernera la partie expérimentale pour le rivetage et l'essai de traction et la deuxième partie concernera l'application du logiciel Solidworks pour comparer les résultats expérimentaux.

Les résultats obtenus nous permettront de déterminer le bon déroulement de l'essai de traction du fait que la rupture doit se faire au niveau du cordon de soudure ce qui va prouver que le procédé de soudage TIG. La partie numérique ne fera que confirmer d'une manière générale, les résultats obtenus lors de nos différentes expériences.

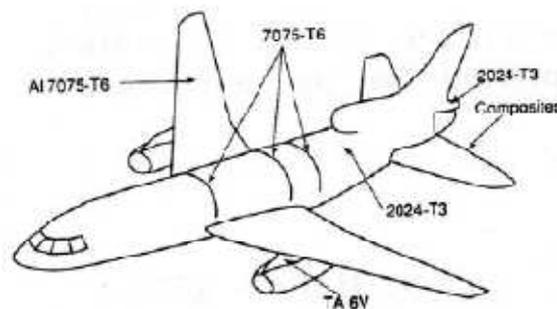
En comparant les résultats, on pourra confirmer que le procédé de soudage TIG offre des avantages par rapport au rivetage en pratique.

# Chapitre **1**

## **Les alliages d'aluminium 7075 T6**

## I.1 Introduction

Les transports aériens sont aujourd'hui en plein essor, le nombre d'avions construits et le trafic aérien augmentent de manière exponentielle. Cette inflation a entraîné de nombreuses innovations technologiques et des changements fondamentaux en termes de conception des structures. Des premiers avions en bois et en papier du début du XX<sup>ème</sup> siècle, nous sommes passés à des gros porteurs constitués d'alliages métalliques optimisés à haute résistance mécanique. Dans cette course vers des propriétés accrues et contre le poids, les alliages d'aluminium se sont naturellement imposés. On peut estimer qu'un avion moderne est constitué à 70% d'aluminium.



**Figure I.1: Utilisation d'alliages d'aluminium en aéronautique**

Le choix des matériaux semble désormais avoir été optimisé. Ainsi les innovations technologiques se tournent maintenant vers les procédés d'assemblage. En effet, afin de gagner du poids et donc pouvoir construire de plus gros avions, une méthode serait d'éliminer les rivets servant à joindre les tôles entre elles. Jusqu'à une époque récente, seul le rivetage et le boulonnage étaient utilisés en tant que moyens d'assemblage. Pourtant, le rivetage présente trois problèmes en plus de celui de la masse. Premièrement, le rivetage implique des concentrations de contraintes non négligeables qui sont bien évidemment néfastes à la tenue des assemblages. Le second problème est lié à la mauvaise résistance à la corrosion des structures rivetées. Enfin, le rivetage est difficilement automatisable et donc cher. Le soudage est une voie possible de remplacement du rivetage. C'est ce constat qui nous a amené à utiliser le procédé TIG.

Ce procédé appliqué à des alliages à durcissement structural (série 2xxx, 6xxx, 7xxx) en plus d'être difficilement soudable, il a pour conséquence de modifier la microstructure du matériau de base et donc ses propriétés mécaniques.

## **I.2 L'aluminium et ses alliages**

### **I.2.1 Principales caractéristiques de l'aluminium**

En tonnage, la production d'aluminium ne représente que 2 % environ de celle des aciers. Cependant, ce métal 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.

#### **I.2.1.1 Masse volumique**

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

#### **I.2.1.2 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.2.1.3 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.2.1.4 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.2.1.5 Propriétés de mise en forme

L'aluminium a une température de fusion relativement basse, d'environ 660°C. 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 trempant et les alliages trempant :

## I.3 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.

Le tableau suivant retrace le classement des alliages :

**Tableau I.1: le classement en séries de l'Aluminium Association**

Série	Aluminium ou alliage
1xxx	Aluminium pur (teneur en aluminium supérieure à 99,00 %)
2xxx	Alliages Aluminium – Cuivre
3xxx	Alliages Aluminium – Manganèse
4xxx	Alliages Aluminium – Silicium
5xxx	Alliages Aluminium – Magnésium
6xxx	Alliages Aluminium – Magnésium – Silicium
7xxx	Alliages Aluminium – Zinc
8xxx	Autres alliages d'aluminium

## I.4 Série 7000 (aluminium zinc)

L'élément d'alliage de cette série est le zinc (Zn). Globalement, ils ont de très bonnes caractéristiques mécaniques ; ils sont les alliages d'aluminium à haute résistance. Malheureusement ces très bonnes caractéristiques mécaniques sont obtenues au détriment de la résistance à la corrosion.

Pour retrouver une bonne résistance à la corrosion, il faut effectuer ce qui est appelé un sur-revenu ou revenu à double pallier (T7). Ce traitement se distingue par une baisse des caractéristiques mécaniques. Ces alliages se divisent en deux groupes : les 7000 avec addition de cuivre et les 7000 sans addition de cuivre.

Les alliages 7000 avec cuivre ont les meilleures résistances mécaniques (à l'état T6). Le sur-revenu fait baisser les caractéristiques mécaniques d'environ 20 %. L'alliage le plus connu de ce groupe est le 7075 utilisé en aéronautique armement, sport.

Les alliages 7000 sans cuivre

**Tableau I.2 : Caractéristiques physiques des alliages de la série 7000**

/	<b>7020</b>	<b>7075</b>
Masse volumique (g/cm <sup>3</sup> )	2.78	2.80
Intervalle de fusion	605-645	475-630
Coefficient de dilatation linéique (0 à 100 °C) (°C <sup>-1</sup> .10 <sup>6</sup> )	23.0	23.5
Module d'élasticité (MPa) (1)	71500	72000
Coefficient de Poisson	0.33	0.33
Conductivité thermique (0 à 100°C) (W/M°C)	État T5 : 140	État T6 : 130
Résistivité à 20°C (μΩcm)	État T5 : 4.9	État T6 : 5.2
Capacité thermique massique (0 à 100°C) (J/kg°C)	920	915
Limité élastique RP0.2 (MPa)	210 (2)	470 (3)
Limité à la rupture Rm (MPa)	320 (2)	535 (3)
Allongement (%)	14 (2)	8 (3)
Limité élastique RP0.2 (MPa)	/	390 (4)
Limité à la rupture Rm (MPa)	/	475 (4)
Allongement (%)	/	7 (4)

En les comparant avec les alliages avec cuivre, ils ont de moins bonnes caractéristiques mécaniques mais une meilleure résistance à la corrosion. Certains comme le 7020 présente également de bonnes aptitudes à la soudure.

Les concentrations sont en pourcentage massique.

- (1) Moyenne des modules de traction et de compression
- (2) Tôle laminée état T6, épaisseur entre 0.35 et 12 mm
- (3) Tôle laminée état T6, épaisseur entre 3.2 et 6 mm
- (4) Tôle laminée état T7351, épaisseur entre 6 et 25 mm

# Chapitre 2

## Le procédé de soudage

## II.1 Introduction

En fabrication mécanique et dans le domaine des assemblages aéronautiques, les fixations doivent remplir cinq fonctions principales :

- Transmettre des sollicitations mécaniques,
- Maintenir l'intégrité de l'assemblage vis-à-vis de la corrosion,
- Transmettre des courants de métallisation de foudre,
- Assurer l'étanchéité en zone de réservoir,
- Rendre la maintenance aussi aisée que possible.

Les principaux systèmes d'assemblages utilisés sont le rivetage et le boulonnage:

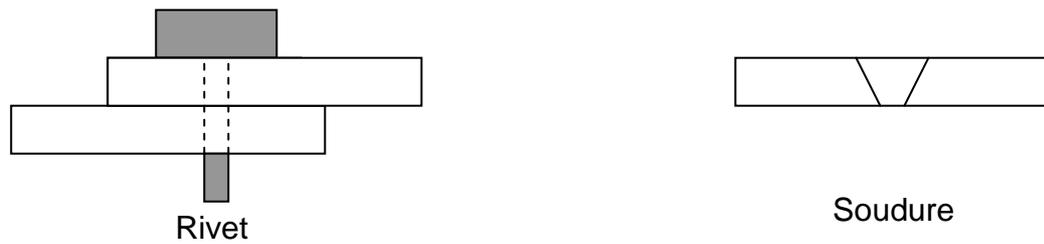
- Les rivets permettent la fixation de pièces minces (jonctions de fuselage ou fixations de raidisseurs) et ils sont réservés à des endroits où les efforts en cisaillement sont peu élevés,
- Les boulons constituent la majorité des fixations des structures des avions. Plusieurs types de boulons sont utilisés selon les propriétés recherchées.
- 



Schéma vis/ecrou

**Figure II.1:** Système vis/écrou utilisé pour les fixations des structures d'avions lorsque les contraintes sont en cisaillement

Lors de leur utilisation, ces procédés présentent des discontinuités physiques ou chimiques. C'est dans ce cas que le procédé de soudage pourrait être une technique d'assemblage concurrente. Ce changement de procédé est devenu un enjeu financier important dans la mesure où il entraînerait bien évidemment une réduction considérable de masse, donc de consommation de carburant et du coût d'exploitation.



**Figure II.2:** Schéma simplifié du gain de masse Rivet et Soudure

Avec:  = Masse supplémentaire

Actuellement, ce procédé de soudage occupe une place prépondérante dans la construction des avions, fusées,... La clé des problèmes qui se posent lors d'une opération de soudage relève du métier du soudeur ou du constructeur-soudeur dont la démarche doit inclure, outre l'opération de soudage, les problèmes se posant en amont et en aval de celle-ci, à savoir:

- La conception des assemblages soudés: découpage de l'assemblage et disposition des joints,
- La préparation des pièces avant soudage: géométrie des bords, état de surface,
- La mesure de la qualité des soudures et de la tenue de l'assemblage en service.

Cette démarche s'appuie sur les caractéristiques du procédé de soudage le mieux approprié qui induit la forme de la soudure et le résultat obtenu.

## II.2 Généralités

Les pièces mécaniques (appareils, machines,...) sont obtenues par plusieurs procédés : moulage, **assemblage**, formage (laminage, forgeage, estampage, ...) ou usinage (coupe des métaux). L'usinage se fait avec ou sans enlèvement de matière.

L'usinage ou la coupe des métaux consiste en une opération de mise en forme d'une pièce par enlèvement de matière. Il consiste aussi à utiliser certains procédés qui ont chacun un champ d'application bien déterminé.

## II.3 Description du procédé de soudage

### II.3.1 Définition

Le soudage est une opération consistant à assembler deux éléments métalliques, par fusion et re-solidification. Il permet d'assurer la continuité mécanique entre les parties à assembler avec ou sans l'aide d'un produit d'apport permettant un meilleur lien entre les pièces. Dans le cas de

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

Le soudage est aussi 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 l'état du métal d'apport du joint, ont une composition chimique identique ou voisine, et hétérogène dans les autres cas. Il constitue un moyen privilégié d'assemblage pour toute construction faisant intervenir des matériaux métalliques. Il a pour objet d'assurer la continuité de la matière à assembler. Dans le cas des métaux, cette continuité est réalisée à l'échelle de l'édifice atomique.

Les assemblages soudés se distinguent des assemblages boulonnés, rivetés, agrafés,... par la continuité qu'ils assurent, absence de possibilité de jeu. Ils sont probablement les plus importants, autant en grande série (carrosserie...) qu'en pièce unitaire (cuve de centrale) et nécessitent un apport de chaleur.

Les avantages de ces assemblages sont :

- Une excellente rigidité de liaison obtenue par des joints peu encombrants et économiques,
- Une étanchéité parfaite et permanente. Les assemblages soudés sont généralement obtenus par action d'un chauffage local intense dont les conséquences sont de deux ordres:

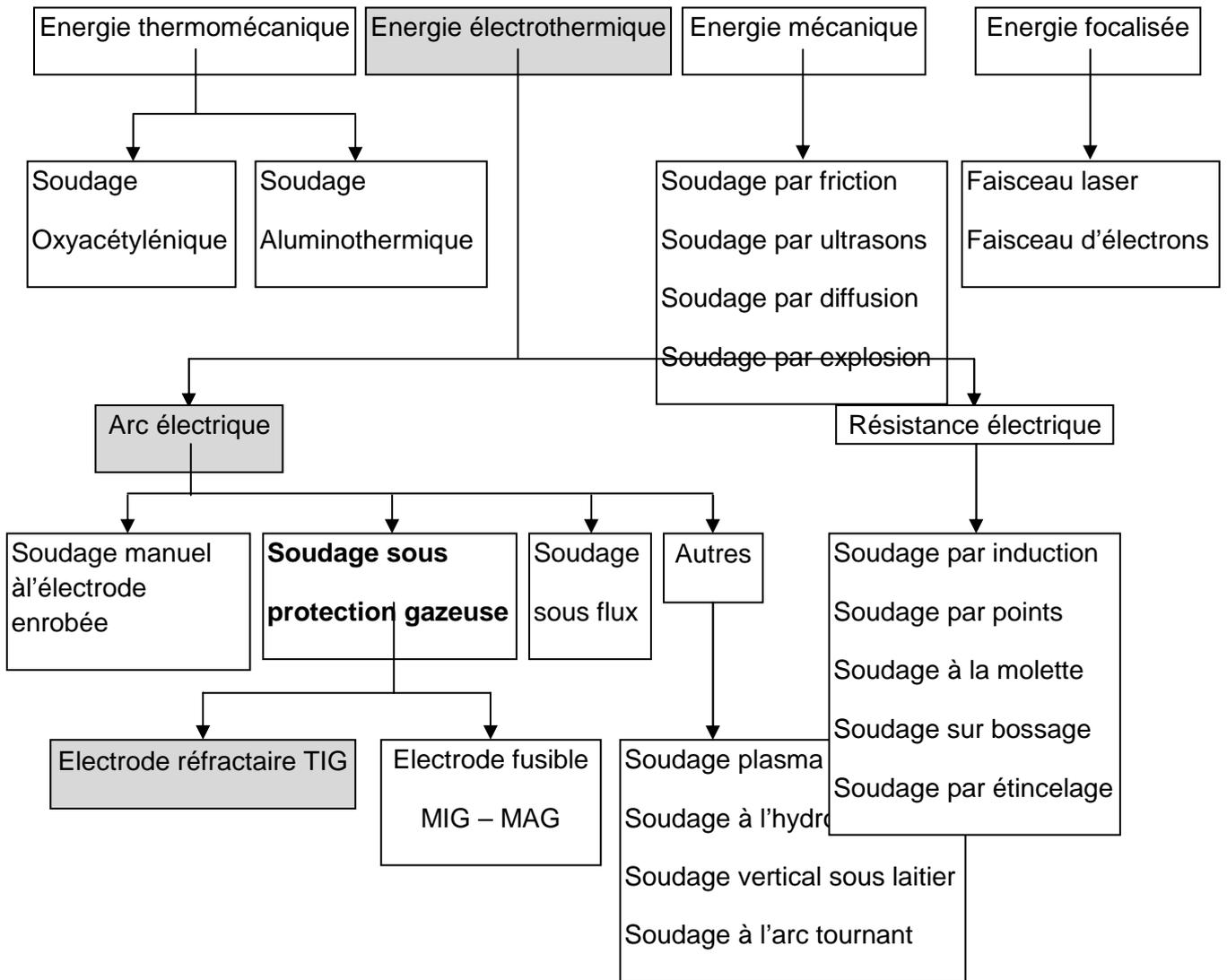
**1. Conséquences métallurgiques** (dépendant de la nature du matériau à assembler et du mode de soudage adopté) : L'opération de soudage induit de par son apport énergétique et parfois par l'apport de métal des modifications métallurgiques au niveau du joint soudé. Ces modifications vont affecter les microstructures de la zone fondue et des zones affectées thermiquement. De ce fait, le joint soudé est soumis à diverses problématiques résultant de ces modifications :

- Fragilisation par l'hydrogène : phénomène de fissuration à froid,
- Apparition de fissuration à chaud (liquation) en cours de solidification : retassures, fissuration intergranulaire,
- Tenue à la corrosion différente du métal de base : essentiellement due aux phénomènes de ségrégation.

## **2. Conséquences géométriques et mécaniques.**

Les modifications métallurgiques impactent la tenue mécanique du joint soudé. Aussi, faut-il s'assurer d'obtenir une tenue mécanique suffisante et tenir compte des soudures dans le calcul et le dimensionnement des pièces. Les défauts géométriques des cordons de soudure jouent un grand rôle dans la tenue à la fatigue des assemblages soudés.

Les procédés de soudage sont nombreux et le plus souvent complémentaires les uns des autres. La grande variété de ces procédés de soudage existants peut être classée en fonction de la nature des énergies mise en œuvre.



**Figure II.3 :** Les différents procédés de soudage

Les procédés de soudage par fusion sont de plus en plus utilisés dans la construction des avions civils et militaires. Ils peuvent aussi être classés suivant l'intensité de la source d'énergie qui induit des différences de caractéristiques importantes sur les cordons de soudure. Cette énergie spécifique de chaque procédé agit sur la pénétration, qui est le rapport de la profondeur de la soudure sur la largeur, et sur les caractéristiques mécaniques des cordons de soudure.

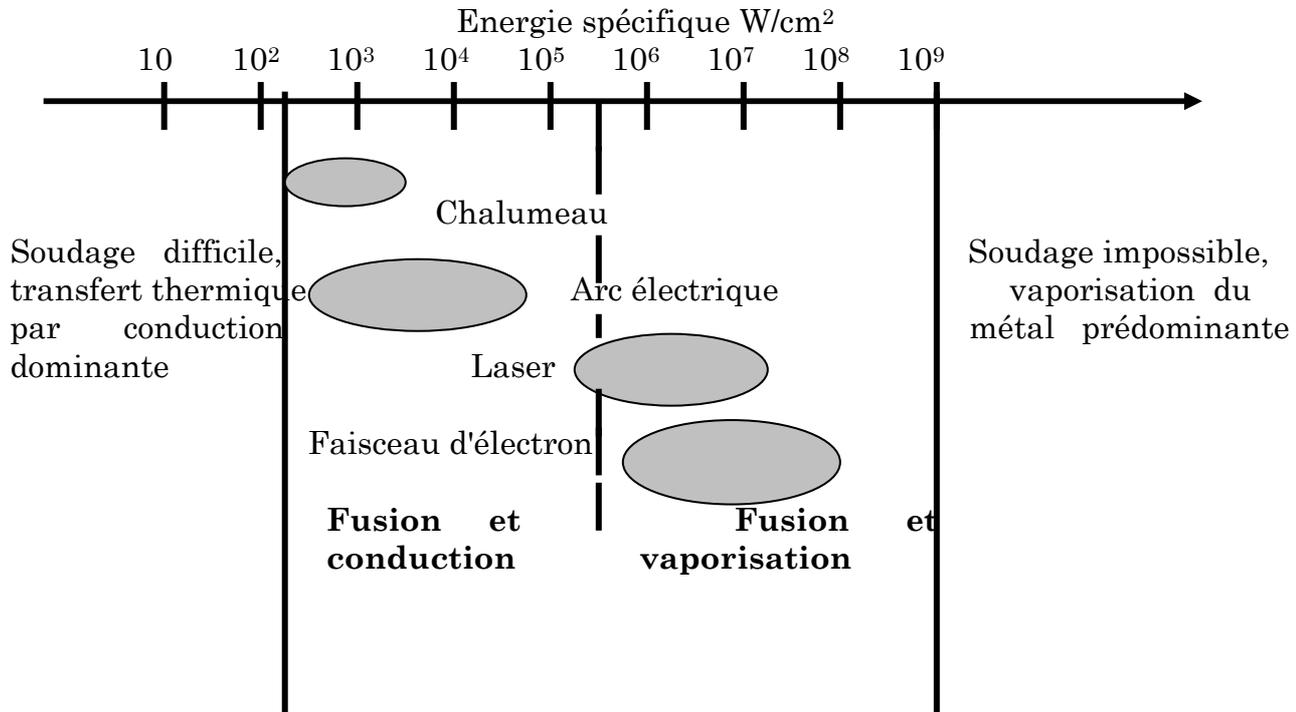


Figure II.4 : Sources thermiques et densités d'énergie

### II.3.2 Caractéristiques de la soudure

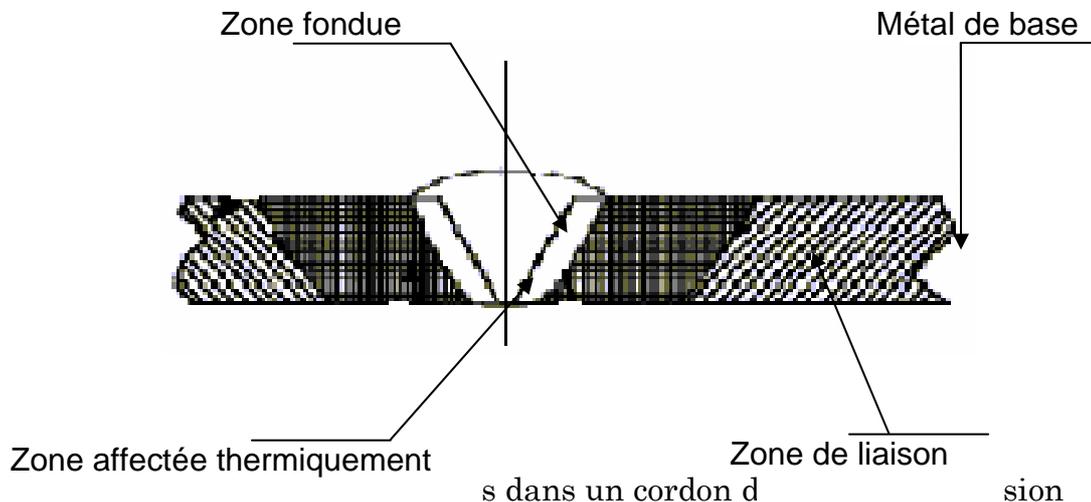
Le soudage permet d'assembler de façon permanente deux ou plusieurs éléments, tout en assurant entre eux la continuité de la matière. On distingue le soudage autogène et le brasage ou soudobrasage.

- **Soudage autogène**: les pièces à assembler, de même nature ou de composition voisine, participent à la constitution du joint ou de cordon de soudure. L'assemblage est dit homogène, c'est à dire « fait du même métal »,
- **Brasage et soudobrasage** : l'assemblage est hétérogène ; la formation du joint ou cordon est assurée par la seule intervention du métal d'apport qui agit comme une colle. La température de fusion du métal d'apport est inférieure à celle des matériaux à souder qui peuvent être de natures différentes.

Après la préparation des éléments à assembler et l'utilisation du soudage, on obtient après solidification, un joint homogène de même composition que le métal de base (soudage autogène) ou un joint hétérogène dans le cas des métaux différents (brasage ou soudobrasage) .

Le procédé de soudage par fusion permet de décrire la structure typique d'un alliage qui est composée de quatre (04) zones principales :

- Le métal de base,
- La zone affectée thermiquement,
- La zone de liaison,
- La zone fondue.



Le métal de base ne subit ni déformation, ni de modifications structurales et ni échauffement important de part de son éloignement de la zone soudée mais il conserve ses propriétés et microstructures d'origine. Bien que métallurgiquement inchangé, le métal de base, tout comme le joint de soudure global, est un lieu de concentration des contraintes résiduelles transversales et longitudinales dépendant du degré du rétreint imposé à la soudure.

### II.3.3.1 Aspects thermiques liés au soudage

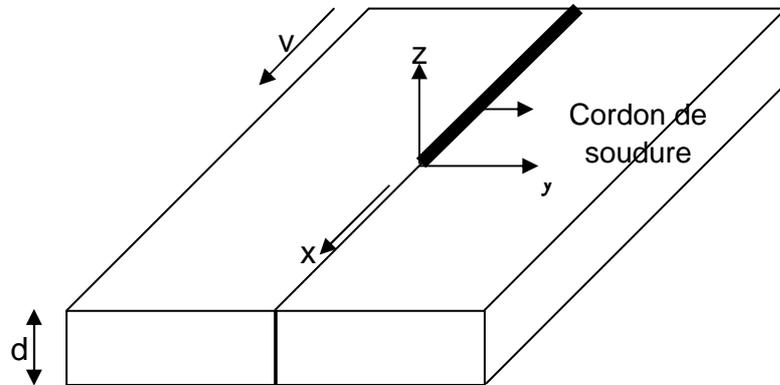
En dépit de leur grande diversité, les procédés de soudage ont pour caractéristique commune la localisation de l'apport de la chaleur. Ce phénomène se traduit par un passage bref à très haute température d'une petite quantité de matière suivi par un refroidissement, essentiellement par conduction dans les parties adjacentes. Celles-ci sont:

- Métal avoisinant plus froid,
- Éléments de bridage,
- Electrodes (dans le cas du soudage par points).

Le cycle thermique en tout point voisin de la zone soudée traduit ainsi l'évacuation de la chaleur correspondant au soudage, et dépend des variables liées au procédé (quantité de chaleur effective mise en jeu), au matériau (conductibilité thermique) et à la géométrie de l'assemblage.

Plusieurs études ont été faites pour résoudre l'équation de la chaleur simplifiée. La résolution de cette équation s'est basée sur une source de

chaleur ponctuelle  $q$  se déplaçant à une vitesse constante le long d'un axe  $x$ .  
l'équation différentielle de la chaleur peut être décrite comme suit :



**Figure II.5** Schéma représentant la définition du système de coordonnées

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) \quad (II.1)$$

Avec :

$T$  = température (°C)

$t$  = temps (s)

$\alpha$  = diffusivité thermique du matériau (m<sup>2</sup>/s)

$$\alpha = \lambda / \rho c$$

Avec :

$\lambda$  = conductibilité thermique du matériau (J/m<sup>3</sup>Ks)

$\rho c$  = capacité calorifique volumique (J/m<sup>3</sup> k)

En supposant qu'une source de chaleur, focalisée stationnaire, crée un bain de fusion lors du soudage, le volume de métal fondu est délimité par une enveloppe dite surface isotherme car chaque point de cette surface est à la même température. Pendant le régime transitoire de chauffage, tous les points de cette surface sont passés par toutes les températures existantes comprises entre la température initiale de la pièce et la température de fusion. Cette surface conserve la même température tant que la source de chauffage apporte, de manière continue, autant de chaleur dans toute la surface à souder.

Ainsi, en régime stationnaire, l'équation II.1 devient :

$$\frac{\partial T}{\partial t} = 0$$

En déplaçant maintenant la source de chaleur de manière rectiligne et à distance constante de la pièce à souder, la forme du bain de fusion va changer.

En prenant un système de coordonnées mobiles lié à la source, l'équation II.1 devient :

$$T(y) - T_0 \frac{q_0 v d}{\rho c \sqrt{4\pi a t}} \exp\left(-\frac{y^2}{4at}\right) \quad (\text{II.4})$$

Avec :

$T_0$  = température initiale (°C)

$q_0$  = puissance absorbée (W)

$v$  = vitesse de la soudure (m/s)

$d$  = épaisseur du matériau (mm)

### II.3.4 Les principaux défauts de soudage

En utilisant le procédé de soudage, on peut rencontrer plusieurs défauts. La norme NF EN 26520, correspondant à la classification des défauts dans les soudures par fusion des métaux, permet d'énumérer et de classer les défauts en fonction de leur géométrie, de leur position dans la soudure et de leur origine. Ces défauts peuvent être classés en deux catégories. La première qui est d'origine purement opératoire regroupe :

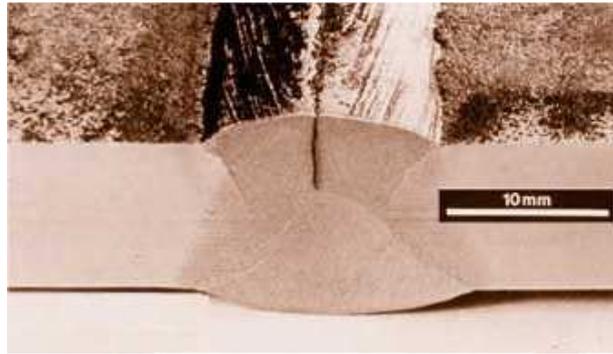
- Les caniveaux (internes ou externes),
- Le manque et l'excès de pénétration,
- Le manque de fusion (collage),
- Le défaut d'alignement,
- La déformation angulaire,
- etc...,



**Figure II.6** Exemple de manque de pénétration

La deuxième regroupe les défauts internes :

- Les différentes fissures (à chaud, à froid, au réchauffage),
- les porosités.



**Figure II.7 :** Exemple de Fissure à froid

Pour le cas de notre alliage d'aluminium 7075 T6, et lors de l'application du procédé de soudage TIG, un des défauts qui apparaît fréquemment est celui des fissures à chaud du fait des vitesses de solidification élevées et aussi de l'absence du métal d'apport. Elles sont appelées fissures à chaud lorsqu'elles apparaissent à la fin de la solidification. Ces fissures à chaud sont débouchantes, non débouchantes et de petites dimensions. Un autre défaut est que l'aluminium est sensible à la porosité due à l'hydrogène.

### II.3.5 Contrôle des soudures

On utilise des contrôles non destructifs afin de détecter les défauts pouvant apparaître lors du soudage. Ceux-ci sont de petites dimensions. Vu l'exécution rapide des soudures, l'utilisation des contrôles rapides est exigée et appliquée de la manière suivante :

- hors ligne (visuel, radiographie, ultrasons, courant de Foucault,...),
- en ligne (analyse du plasma, thermographie infrarouge, visuel par caméra,...).

Les contrôles destructifs comme la métallographie sont longs et permettent de détecter certains défauts de soudage comme les fissures et le manque de pénétration. Ils ne préjugent pas de la qualité globale de l'assemblage.

### II.4 Principaux procédés de soudage

Les procédés de soudage sont nombreux et le plus souvent complémentaires les uns des autres. Le soudage au chalumeau est recommandé pour les travaux délicats, sa mise en œuvre est simple à l'atelier ou sur un chantier. Le chalumeau oxyacétylénique est préconisé pour le brasage et le soudobrasage .

Les différents procédés sont représentés dans la figure II.3.

## II.5 Procédé de soudage TIG

Parmi les procédés de soudage, on trouve le soudage à l'arc électrique. Ce soudage est le plus utilisé industriellement en soudage autogène. La fusion, très localisée, amène moins de déformation que le chalumeau et une grande productivité.

**Inconvénient:** un refroidissement rapide générateur de contraintes internes et de déformations parfois difficiles à corriger.

Parmi les techniques de ce soudage, on peut citer le soudage TIG.

Le soudage TIG (Tungstène InertGas, GTAW GasTungsten Arc Welding selon les normes américaines ou encore procédé 141 selon l'ISOP 4063) utilise une électrode réfractaire.

Tungsten (Tungstène) désigne l'électrode et les mots InertGas (Gaz inerte) désignent le type de gaz plasmagène utilisé.

Les figures suivantes représentent respectivement un poste de procédé de soudage TIG et une de ses applications du Centre de Recherche Scientifique et Technique en Soudage et Contrôle de Cheraga (Alger).



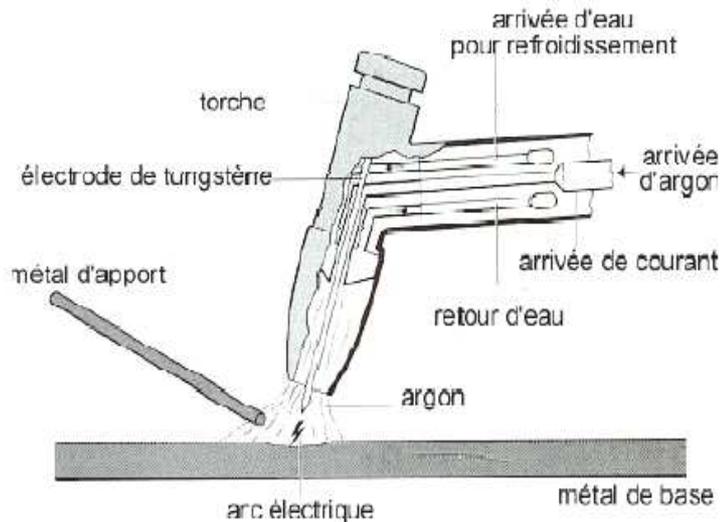
Figure II.8 : Un poste de procédé de soudage TIG



Figure II.9 : Application du procédé de soudage TIG

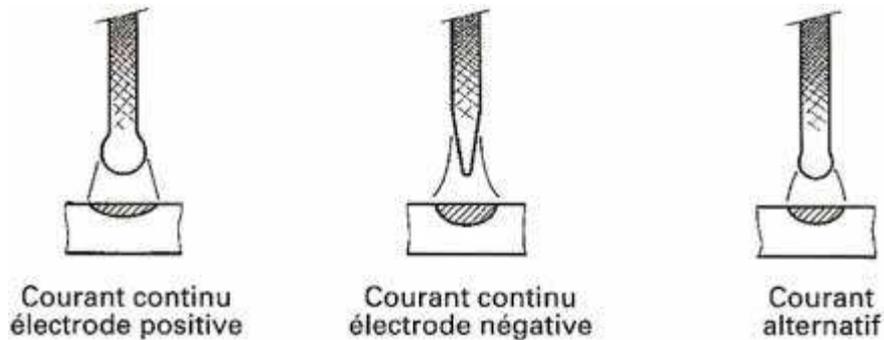
## II.5.1 Principe du procédé de soudage TIG

Le procédé de soudage TIG est appliqué généralement pour les tôles ayant une épaisseur inférieure à 10 mm. Au delà, il est exigé un nombre de passes important, ce qui le rend ainsi non économique. Pour de petites épaisseurs, il permet de réaliser des joints en bout à bout sans métal d'apport. Pour des épaisseurs importantes (généralement supérieures à 3 mm), les tôles nécessitent des préparations de bords (chanfreins) et du métal d'apport. Il faut impérativement éviter que l'électrode ne touche le bain de fusion pour éviter toute absorption de tungstène. Un arc électrique est établi entre l'extrémité d'une électrode réfractaire ou non fusible en tungstène. Le métal d'apport est amené manuellement (baguette) ou automatiquement (fil déroulé). C'est un procédé de soudage à l'arc avec une électrode non fusible. L'arc se crée entre l'électrode réfractaire (- du générateur) et la pièce (+ du générateur) sous un flux gazeux. D'une façon générale, il s'agit d'un gaz ou d'un mélange de gaz rares. L'amorçage se fait grâce au gaz circulant dans la buse qui entoure une grande partie de l'électrode. Le soudage s'effectue en polarité directe (pôle du générateur relié à l'électrode) pour la majorité des métaux et alliages (aciers, inox, cuivreux, titane, nickel,...) sauf dans le cas des alliages légers d'aluminium ou de magnésium où l'on soude en polarité alternée (pendant un laps de temps, l'électrode est reliée au pôle + du générateur). Il est important de noter que souder de façon continue en polarité inverse (pôle + relié à l'électrode) détruit cette électrode en la faisant fondre.



**Figure II.10 :** Principe de l'application de la torche du procédé de soudage TIG

Les formes des électrodes pour ce procédé de soudage TIG dépendent du type de courant utilisé à savoir le courant continu électrode positive, le courant continu électrode négative et le courant alternatif.



**Figure 11:** Forme des électrodes pour soudage TIG

## II.5.2 Caractéristiques du procédé de soudage TIG

En pratique, le procédé de soudage TIG permet de grandes vitesses de soudage et produit des soudures de bonne qualité et de bel aspect. L'intensité et la vitesse de soudage sont les paramètres les plus importants à contrôler parce qu'ils sont directement liés à la profondeur de pénétration, à la largeur du bain de fusion, et à la qualité du joint soudé. L'intensité affecte également la tension si la longueur de l'arc (distance entre la pointe de l'électrode et le matériau à souder) est fixée.

Pour étudier l'écoulement thermique en soudage à l'arc électrique dans le but de déterminer comment une source de chaleur peut affecter le matériau à souder, il est important de déterminer le concept de l'énergie de soudage. Cette chaleur générée par l'arc électrique  $H$  est représentée par la formule suivante:

$$H = EI/v \text{ (J/mm)}$$

Avec :

$E$  = Tension de l'arc (V)

$I$  = Intensité du courant (A)

$V$  = Vitesse d'avance de la torche (mm/s)

Mais en raison des faibles pertes électriques de l'arc, toute la chaleur n'est pas transmise à la pièce à souder. De ce fait, la chaleur réellement transmise est :

$$H_n = f_1 EI/v \text{ (J/mm)}$$

Avec :

$f_1$  = coefficient d'efficacité de transfert de chaleur (de l'ordre de 0.7 pour le procédé de soudage TIG)

## II.6 Soudage des alliages d'aluminium

La notion de soudabilité des alliages d'aluminium n'est pas liée, comme sur les aciers au carbone, au problème de transformation de phase, qui couplé avec l'hydrogène dissous et les contraintes mécaniques, peut conduire à une fragilité de la soudure. Leurs critères de soudabilité dépendent, comme pour les aciers inoxydables austénitiques, de la tendance à la fissuration à chaud. Le soudage des alliages d'aluminium conduit à des changements microstructuraux. Ces derniers sont liés aux cycles thermiques caractérisés par un passage de l'état solide à l'état liquide et inversement, au refroidissement et aux traitements thermiques qui peuvent être réalisés ensuite. L'amplitude et la durée de ce trajet thermique sont fonction de la distance à la source de chaleur et des conséquences sur le comportement en découlent.

### II.6.1 Technique de soudage

Les alliages à durcissement par écrouissage, les alliages traitables thermiquement et les alliages de fonderie ne réagissent pas de la même façon au soudage. La technique de soudage varie d'un alliage à un autre. Aussi, les alliages d'aluminium ne sont tous pas soudables. Le soudage des alliages d'aluminium par le procédé TIG exige des préparations de surfaces très soignées. Par rapport à d'autres procédés tel que le MIG, le procédé TIG permet l'obtention de cordon de bonnes qualités. Pour cela, une préparation de la surface est exigée. La première opération est toujours un dégraissage avec un solvant suivie d'un décapage de la surface. Le décapage est réalisé soit mécaniquement (brosse rotative à fils d'acier inoxydable) ou soit chimiquement (attaque à la soude, passivation à l'acide nitrique et rinçage à l'eau).



**Figure II.12 :** Apparition d'une fissure lors du soudage TIG d'un alliage D'aluminium 7075 T6 (épaisseur = 2 mm)

La présence d'une couche d'oxyde réfractaire nécessite un soudage en courant alternatif (TIG). Le coefficient de dilatation linéique est très différent de celui de l'acier. D'autre part, en raison d'une conductibilité thermique très élevée, il faut particulièrement faire attention à la pénétration. L'aluminium est sensible à la porosité due à l'hydrogène. Ainsi, il faut veiller à ce que les métaux d'apport soient stockés de manière appropriée, que le chanfrein de soudure reste propre et que l'alimentation en gaz de protection soit sécurisée.

La propreté est d'une importance primordiale pour le soudage de l'aluminium. Il est préférable d'opter pour le fraisage lors de la préparation des chanfreins de soudure.

L'oxydation superficielle de l'aluminium et de ses alliages produit une couche d'alumine  $Al_2O_3$  qui présente les propriétés suivantes :

- point de fusion élevé  $2050^{\circ}C$  ( $Al$   $658^{\circ}C$ ),
- épaisseur de la couche variant de  $0,01\ \mu m$  à  $0,1\ \mu m$ ,
- formation spontanée à l'air libre même après grattage,
- stable même à haute température,
- adhérente et insoluble dans le métal liquide.

Cette couche constitue un barrage entre les éléments à assembler. Le soudage des alliages d'aluminium demande donc :

- un décapage des pièces à assembler,
- une protection du bain de fusion pour éviter une réoxydation du métal fondu.

# Chapitre 3

## Le procédé de rivetage

### III.1 Généralités

La liaison rivetée étant un assemblage structural réalisé par un grand nombre de rivets, compte tenu de la nature hyperstatique de la liaison et des phénomènes locaux (tolérancements, mécanique des contacts) il est impossible de déterminer avec précision les efforts transmissibles (transmission des efforts réalisée normalement par l'adhérence entre les pièces) par chaque rivet pour vérifier d'un point de vue sécurité :

- la condition de non matage entre les surfaces en contact des composants assemblés,
- les conditions de résistance (Reg) ou de non rupture en cisaillement (Rrg) des rivets,
- la condition de non rupture en traction (Rr) des tôles assemblées.

Des hypothèses simplificatrices du comportement de ce type d'assemblage permettent au concepteur d'en faire un prédimensionnement rapide. La difficulté est de connaître dans quel domaine, élastique ou plastique se situe le mode de travail de cet assemblage. De plus au cours des sollicitations le type de matériau utilisé (ductile ou fragile) a de l'incidence sur l'évolution du comportement de cet assemblage.

Des modèles élément finis plus ou moins élaborés peuvent aider à la conception.

### III.2 Définition

Le rivetage est un assemblage de pièces à l'aide de rivets. C'est un assemblage définitif, c'est-à-dire non démontable sans destruction de l'attache. Quoiqu'il existe depuis peu un type de rivet imprimant une empreinte hélicoïdale, lors du montage, dans son logement, permettant ainsi un démontage et un remontage ultérieur sans destruction du rivet.

Ce mode d'assemblage a connu une très large utilisation dans l'assemblage métallique au XIXe siècle avant l'apparition de la soudure oxyacétylénique : employé en rivetage à chaud, il permettait un assemblage très résistant et de faible encombrement. On le trouvait utilisé pour l'assemblage des chaudières et la construction en charpente métallique. Un des meilleurs exemples de ce procédé est la tour Eiffel qui a été assemblée par rivetage.

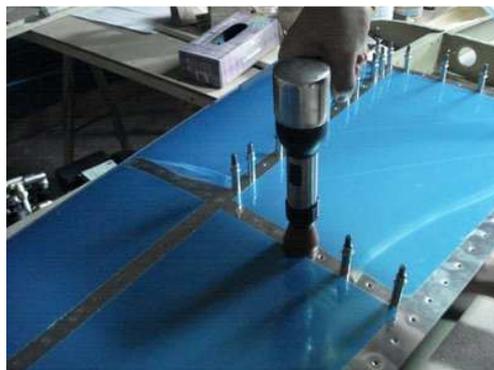


Figure III.1 assemblage riveté

### III.3 Type de rivet

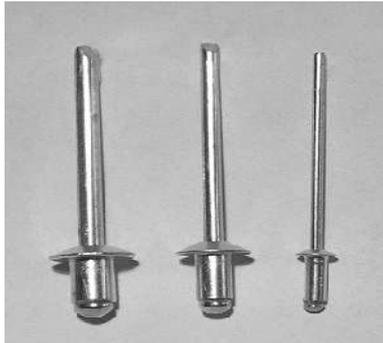
On peut citer :

- Le rivet standard,
- Le rivet aveugle (rivet pop),
- Le rivet double,
- Le rivet à contre plaque,

Les figures suivantes représentent respectivement une riveteuse simple et des rivets :



**Figure III.2** Riveteuse



**Figure III.3** Exemple de rivets



Choisir un rivet est dans la plupart des cas une chose simple. Il suffit de connaître l'application et de classer les critères les plus importants.

Lors de l'application, les premières choses à étudier sont les caractéristiques matérielles :

- l'épaisseur à sertir (si possible les informations « couche par couche »),
- les matières serties,
- les contraintes éventuelles de dégagement (place restante pour la tête du rivet, dégagement dans la partie aveugle, dépassement de la tête indésirable,...),
- $\emptyset$  de perçage possibles.

Parmi les caractéristiques mécaniques, on peut citer :

- Résistance à la traction : L'effort de traction est l'application de forces perpendiculaires au plan des pièces serties, c'est-à-dire dans l'axe parallèle à l'axe de perçage.

La résistance à la traction dépend de la matière du corps du rivet aveugle, la manière dont le rivet répartit l'effort de serrage, c'est à dire de la forme de la tête du corps et de la déformation qui résulte du sertissage dans la partie aveugle.

Pour des applications industrielles, il faut penser à appliquer un coefficient de sécurité.

Mais dans beaucoup de cas, la résistance à la traction a une valeur supérieure à celle des pièces assemblées.

- Résistance au cisaillement

L'effort de cisaillement est l'application de forces dans un axe parallèle au plan des pièces assemblées.

Cette caractéristique dépend également de la matière du corps. Il est toutefois possible d'influer sur la valeur de la résistance au cisaillement en modifiant l'emplacement de la rupture sur le clou. Un point de rupture abaissé laisse une partie du clou dans le corps, celle-ci contribuant à la résistance au cisaillement.

Par exemple, et pour des transmissions des efforts dans un assemblage riveté, on peut utiliser :

Torseur de cohésion dans le plan de l'interface rivetée induit par les efforts transmissibles de 1/2:

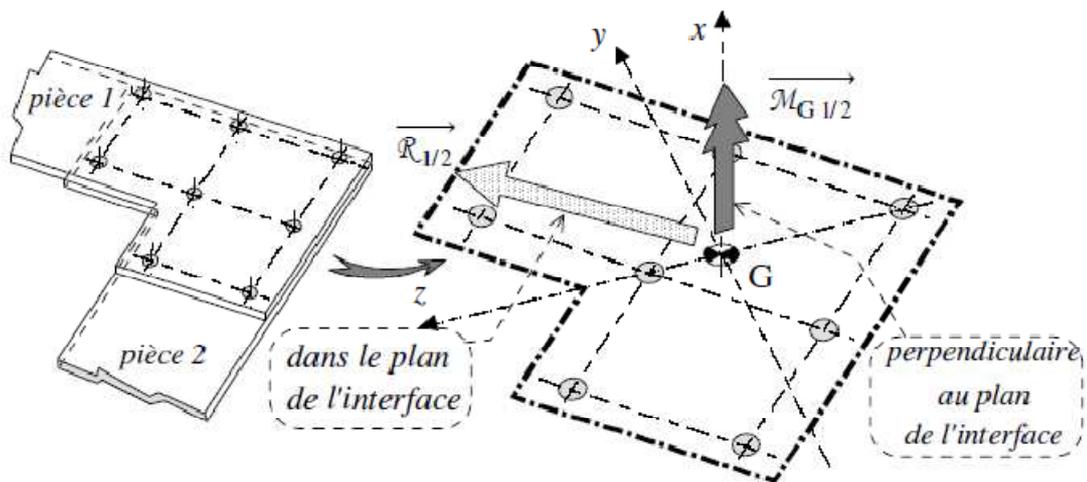


Figure III.4 : Torseur de cohésion

Notion de torseur de cohésion  $\{Coh_{1/2}\}_G = \left\{ \begin{array}{l} \overrightarrow{R_{1/2}} = T_y \vec{y} + T_z \vec{z} \\ \overrightarrow{M_{G(1/2)}} = M_x \vec{x} \end{array} \right\}_{G,r}$

Dans le repère local lié au centre géométrique et au plan de l'interface rivetée les deux efforts tranchants et le moment de torsion engendrent des contraintes tangentielle dans le plan de l'interface. Au contact des alésages des pièces et des corps cylindriques des rivets ces deux efforts tranchants engendrent des pressions de contact.

Remarques : en préliminaire à l'étude des divers comportements proposés, on peut s'y familiariser par une approche intuitive sur des assemblages de composants rigides et souples.

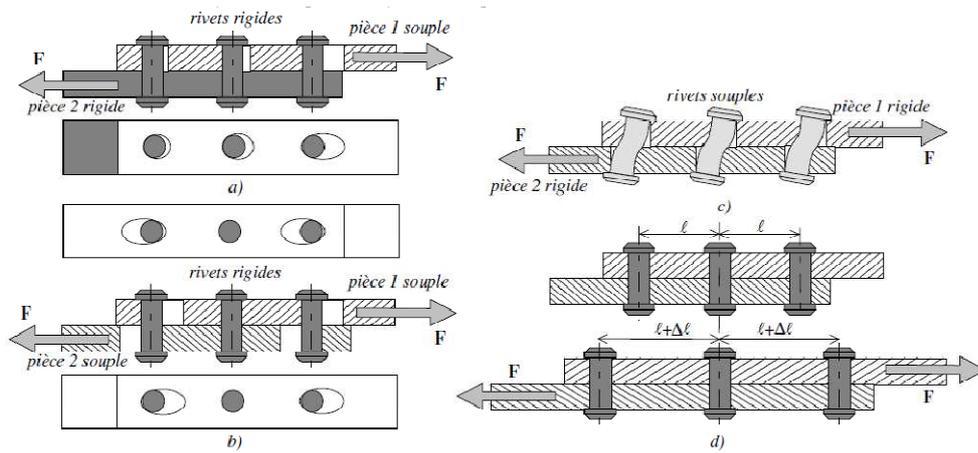


Figure III.5 comportement d'un assemblage rivète

A partir de l'observation des zones déformées, on peut constater immédiatement que dans le domaine élastique :

- une répartition équitable des efforts dans les rivets est impossible (déformations différentes et décroissantes des alésages)
- une répartition équitable des efforts dans les rivets extrêmes est possible (déformations des alésages) et un effort nul dans le rivet médian (pas de déformation d'alésage)
- une répartition équitable des efforts dans les rivets est possible (déformations identiques des rivets).
- une répartition équitable des efforts dans les rivets extrêmes est possible et un effort nul dans le rivet médian (assemblage parfaitement monolithique)

### III.4 Mode de calcul

Pour choisir un rivet, on doit tenir compte des paramètres suivants :

- Matériau identique,
- Diamètre identique,
- Modes de travail des rivets (pas de flexion du corps cylindrique, seule une sollicitation en cisaillement dans la section (cf. figure a) et b)). L'état de contraintes dans la section étant complexe, on peut le résumer de façon simplifiée sous la forme d'une contrainte tangentielle moyenne, soit :

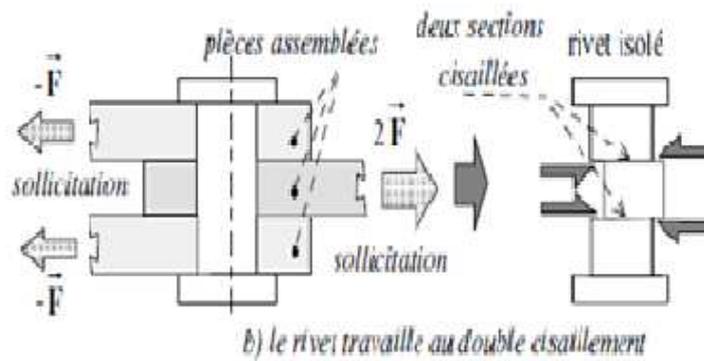


Figure III.6 Rivet en double cisaillement

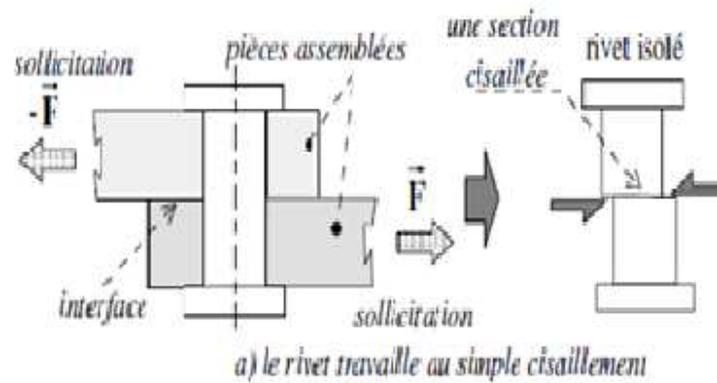


Figure III.7 Rivet en simple cisaillement

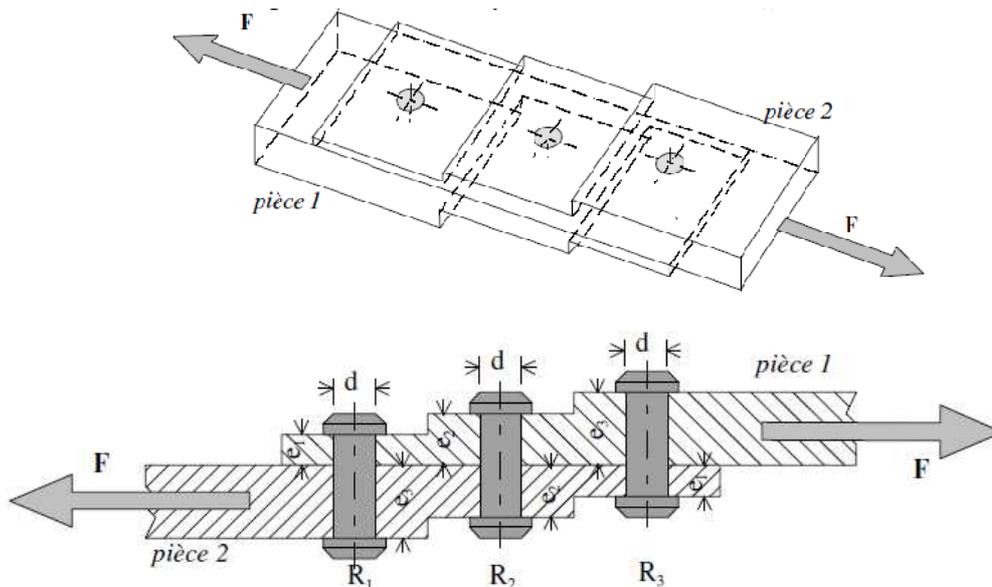
$$\tau_{moy} = \text{Effort tranchant} / \text{Aire section riv}$$

Les efforts tranchants sollicitant chaque section cisailée correspondent aux efforts transmissibles par chaque rivet.

Aussi, l'expression de la pression de matage est exprimée par :

$$P = F / \text{Surface projetée}$$

Il s'agit de calculer la contribution de l'effort à transmettre  $F$  (seul élément de réduction du torseur de cohésion : effort tranchant) par l'assemblage des pièces dans chaque liaison rivetée :  $F_1, F_2, F_3$



**Figure.III.8** La répartition des efforts induits par  $f$  dans chaque liaison rivetée est

Pour les pièces ayant des épaisseurs différentes, pour chaque liaison rivetée, on ne considère que la valeur de la pression de contact la plus élevée.

L'expression de la pression de contact maximale dans chaque liaison rivetée devient :

Rivet 1 isolé	Rivet 2 isolé	Rivet 3 isolé
<p>négligeable</p> $p_1 = \frac{F_1}{d \times e_1}$ <p>ou <math>F_1 = p_1 \times d \times e_1</math></p>	<p>négligeable</p> $p_2 = \frac{F_2}{d \times e_2}$ <p>ou <math>F_2 = p_2 \times d \times e_2</math></p>	<p>négligeable</p> $p_3 = \frac{F_3}{d \times e_1}$ <p>ou <math>F_3 = p_3 \times d \times e_1</math></p>

**Figure.III.9** pression de contact

Et avec une pression de contact dans chaque liaison rivetée étant identique, on a

$$p = p_1 = p_2 = p_3$$

L'équilibre d'une pièce assemblée donne la relation :

$$F_1 + F_2 + F_3 = F$$

Soit encore :  $(p_1 \times d \times e_1) + (p_2 \times d \times e_2) + (p_3 \times d \times e_1) = F$

En remplaçant par la pression de contact  $p$  :  
 $p[2(d \times e_1) + d \times e_2] = F$

D'où l'expression de la pression de contact d'iso-matage :

$$P = F / d (2e_1 + e_2)$$

Les efforts transmissibles par les rivets sont représentés dans le tableau suivant :

Rivet 1 isolé	Rivet 2 isolé	Rivet 3 isolé
$F_1 = F \frac{e_1}{2e_1 + e_2}$	$F_2 = F \frac{e_2}{2e_1 + e_2}$	$F_3 = F \frac{e_1}{2e_1 + e_2}$

Les épaisseurs au droit des rivets 1 et 3 étant identiques :  $F_1 = F_3$ .

Remarque : Dans le cas classique où les épaisseurs sont identiques :

( $e_1 = e_2 = e_3 = e$ ), la pression de contact est égale à  $P = \frac{F}{3(d \times e)}$

Et les efforts transmissibles sont identiques  $F_1 = F_2 = F_3 = \frac{F}{3}$

# Chapitre 4

## Partie expérimentale et simulation

## IV.1 Généralités

Le domaine de la construction mécanique, un des piliers du monde industriel actuel, a connu une profonde mutation depuis l'avènement de l'ère industrielle. Encore de nos jours, la production automatisée s'avère un nouveau pas dans cette mutation.

Les principes de fabrication évoluent normalement tandis que le milieu environnant s'automatise, se robotise en faisant appel à l'ordinateur. Cela appelle un renouvellement des équipements, mais aussi la création de nouveaux instruments de formation

Le rôle des fabrications mécaniques est de confectionner, maintenir en état et réparer tous mécanismes courants.

Les pièces mécaniques (appareils, machines,...) sont obtenues par plusieurs procédés : **moulage**, **formage** (laminage, forgeage, estampage,...) ou **usinage** (coupe des métaux). L'usinage se fait avec ou sans enlèvement de matière.

Le processus consiste à transformer des matériaux reçus dans une forme de produit brut pour réaliser des pièces par enlèvement de métal. Les pièces, une fois réalisées, seront réunies et assemblées entre elles pour constituer le mécanisme prévu.

Ainsi, il faut :

- Exploiter le savoir faire des connaissances des faits, conventions, méthodes, analyse et synthèse,
- Développer les processus d'analyse et de synthèse devant permettre à tout utilisateur de trouver les méthodes adéquates lui permettant de résoudre efficacement un problème posé.

## IV.2 Notions de conception

La démarche de projet, (design procès), consiste à concevoir, innover, créer et réaliser un produit à partir d'un besoin à satisfaire. C'est à la fois un art et une science.

Le produit envisagé peut être entièrement nouveau ou être l'évolution d'un système existant.

Dans presque tous les cas, le processus de création ou d'amélioration est le résultat d'un travail d'équipe.

Les concepteurs de produits doivent avoir des connaissances dans le domaine des sciences de bases (mécanique, électricité, statistiques, chimie,...) mais aussi dans le domaine des sciences de l'ingénieur et du technicien (matériaux, composants, productique,...). De plus, ils devront avoir la capacité à communiquer leurs idées à la fois graphiquement (dessin industriel et graphes) et oralement (exposés, conférences,...) et avoir des connaissances en économie, marketing et publicité.

## IV.3 Rôle des essais mécaniques

Les essais mécaniques ont un rôle essentiel lors de la conception d'un produit du fait que le choix d'un matériau pour un certain nombre d'utilisations s'effectue sur la base de ses propriétés physico-chimiques, mécaniques et technologiques.

Dans une entreprise industrielle, les bureaux d'études et de méthodes se basent essentiellement sur cet essai. Le but étant de caractériser le matériau choisi et éventuellement changer ces mêmes caractéristiques.

### IV .3.2 Les essais mécaniques

Les essais, en laboratoire ou sur le terrain, apportent des renseignements précis et fiables sur la qualité et les performances d'un matériau. Il en existe un grand nombre; des normes internationales règlent la plupart. Ceux sont des expériences dont le but est de caractériser les lois de comportements des matériaux (mécanique des milieux continus). La loi de comportement établit une relation entre les contraintes (pression=force/surface) et les déformations (allongement unitaire sans dimensions).

Cependant, la déformation d'une pièce dépend de la forme de la pièce et de la manière dont sont exercés les efforts extérieurs sur cette pièce. Il faut donc normaliser les essais. Des normes définissent donc :

- Quelle est la forme de la pièce d'essai dont on teste le matériau, on parle alors d'éprouvette normalisée,
- Comment sont exercés les efforts sur l'éprouvette, on parle alors d'essai normalisé.

Parmi ces essais, on peut citer :

- Les essais mécaniques (traction, dureté, résilience, fatigue, fluage...),
- Les essais pour la productique (emboutissage, pliage, usinabilité),
- Les essais sur les surfaces (abrasion, rayures, rugosité, adhérence...),
- Les essais sur les fluides (viscosité, écoulements...).

#### IV.3.2.1 Essai de traction

Parmi tous les essais mécaniques, l'essai de traction est certainement l'essai le plus fondamental. Il sert à déterminer les principales caractéristiques mécaniques telles que le module d'élasticité, le coefficient de Poisson, la limite d'élasticité, la résistance à la rupture, l'allongement après rupture et le coefficient de striction. Son exécution est facile et les résultats obtenus servent à dimensionner toutes sortes des pièces allant d'un pignon microscopique jusqu'à la structure métallique d'un grand hall. Dans la recherche, on l'applique pour la

caractérisation de nouveaux matériaux et dans industrie pour les contrôles périodiques servant à surveiller la qualité des alliages, des polymères et des céramiques.

Cet essai a comme objectif :

- De faire connaître le fonctionnement d'une machine de traction et des capteurs qui y sont appliqués,
- De mesurer des courbes de traction sur des alliages d'aluminium, de cuivre et des aciers,
- D'interpréter les résultats obtenus: déterminer la limite élastique, l'allongement à rupture, etc...
- D'estimer la précision de mesure.

Son principe consiste à exercer sur une éprouvette normalisée deux forces égales et opposées qui vont la déformer progressivement puis la rompre.

Il est exécuté soit sur des barres de section constante, soit sur des éprouvettes cylindriques ou prismatiques prolongées de part et d'autre par des têtes d'attache de forme appropriée pour la fixation.

## IV.4 Partie expérimentale

Le matériau utilisé à savoir l'alliage d'aluminium 7075 T6 possède des caractéristiques physiques représentées dans le tableau II.1

**Tableau IV.1** : Caractéristiques physiques du matériau

/	<b>7075</b>
Masse volumique (g/cm <sup>3</sup> )	2.80
Intervalle de fusion	475-630
Coefficient de dilatation linéique (0 à 100 °C) (°C-1.106)	23.5
Module d'élasticité (MPa) (1)	72000
Coefficient de Poisson	0.33
Conductivité thermique (0 à 100°C) (W/M°C)	État T6 : 130
Résistivité à 20°C (μΩcm)	État T6 : 5.2
Capacité thermique massique (0 à 100°C) (J/kg°C)	915
Limité élastique RP0.2 (MPa)	470 (2)
Limité à la rupture Rm (MPa)	535 (2)
Allongement (%)	8 (2)
Limité élastique RP0.2 (MPa)	390 (3)
Limité à la rupture Rm (MPa)	475 (3)
Allongement (%)	7 (3)

Avec :

(1) = Moyenne des modules de traction et de compression

(2) = Tôle laminée état T6, épaisseur entre 3.2 et 6 mm

(3) = Tôle laminée état T7351, épaisseur entre 6 et 25 mm

### IV.4.1 Essai de traction

L'expérience s'est déroulée au niveau du Centre de Recherche Scientifique et Technique en Soudage et Contrôle de Cheraga (Alger). On a utilisé une machine hydraulique de type Instron à commande électrique. Le pilotage et l'acquisition des données sont effectués à l'aide de la console de la machine, l'ensemble est piloté par un logiciel Merlin. La cellule d'effort a une capacité de  $\pm 600$  KN. Le type d'éprouvette utilisée est le suivant

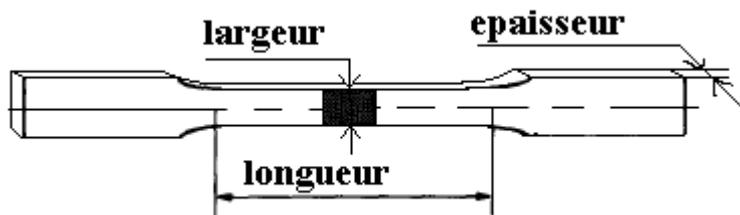


Figure IV.1 Eprouvette de l'essai de traction normalisée

Avec :

Largeur : 19.16 mm

Longueur : 122 mm

Epaisseur : 2 mm

Les différentes étapes de l'essai de traction sont représentées ci-dessous :

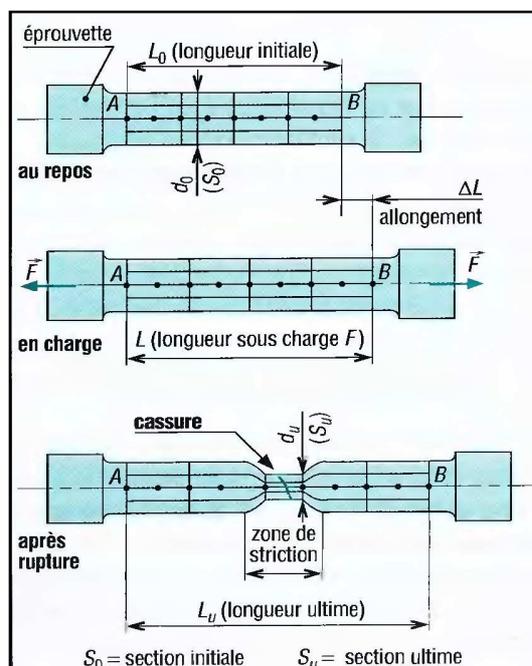


Figure IV.2 Les différentes étapes de réalisation d'une éprouvette lors de l'essai de traction

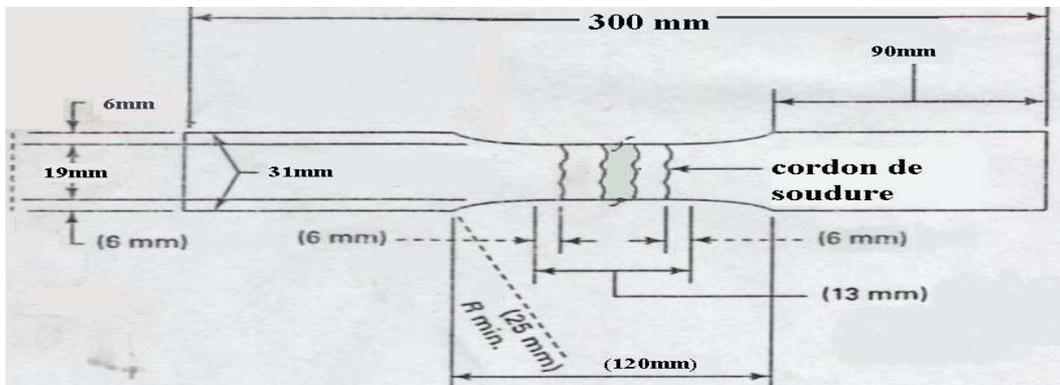
De l'essai de traction, on obtient les caractéristiques mécaniques suivantes :

- Le module d'élasticité,
- La limite élastique conventionnelle,
- La limite apparente d'élasticité supérieure/inférieure,
- La résistance à la traction,
- L'allongement à la rupture.

Notre éprouvette (alliage d'aluminium 7075 T6) soudée par le procédé de soudage TIG se divise en trois zones :

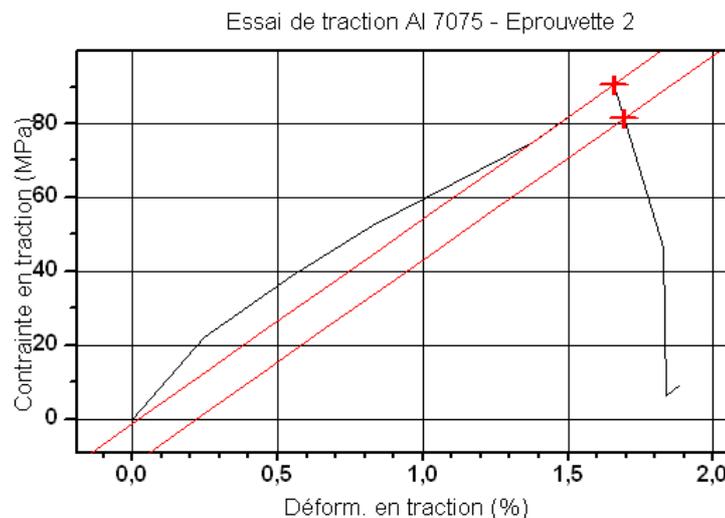
- Métal de base,
- Zone affectée thermiquement (ZAT),
- Zone fondue.

Les éprouvettes de traction ont été réalisées d'après la norme ASME section IX. La figure suivante représente cette éprouvette :



**Figure IV.3** Eprouvette préparée

Les résultats expérimentaux sont illustrés de la manière suivante :



**Figure IV.4** Essai de traction sur une éprouvette d'épaisseur de 2 mm

**Tableau IV.2** Caractéristiques de l'essai de traction (épaisseur = 2mm)

Charge maximale [KN]	Contrainte maximale [MPa]	Module de Young [MPa]	Limite d'élasticité [Mpa]	Déformation à la rupture [%]
3.41	90.47	5537.238	81.360	1.89

## IV.5 Simulation des résultats

### IV.5.1 Introduction

Ayant pris connaissance au travers des chapitres précédents des différents phénomènes liés au procédé de soudage TIG ainsi que les conséquences d'essais de traction, nous nous intéressons dans ce chapitre à appliquer un modèle de modélisation.

La modélisation numérique des liaisons des assemblages est difficile en raison des grandes déformations, des modifications thermiques ou encore des frottements qu'elles subissent. La simulation de mise en forme d'assemblage est représentée dans la plupart des cas par un modèle mathématique non linéaire. Cette non linéarité est induite par l'existence des grands déplacements, du modèle de comportement et des conditions de frottement inhérents à la simulation de pièces assemblées.

La modélisation des procédés de soudage nécessite au préalable l'étude des phénomènes physiques intervenant au niveau des échelles suivantes :

- Microscopique,
- Macroscopique,
- Bain liquide.

L'échelle microscopique concerne l'étude de la structure microscopique du cordon c'est-à-dire la l'étude des phénomènes liés à la solidification rapide du matériau.

L'échelle macroscopique concerne la détermination des différentes contraintes et des distorsions résiduelles.

Le bain liquide concerne l'étude des interactions intervenant directement sous l'arc.

En pratique, chaque cas est étudié séparément mais la fiabilité des résultats reste liée aux connaissances des lois de comportement du matériau utilisé lors de l'expérience. Aussi, il est à signaler que pour le moment, aucun modèle ne permet de prendre en considération tous les phénomènes simultanément (échelle microscopique, macroscopique et bain liquide).

Parmi les travaux étudiés, on peut citer celui de Taylor, Hughes, Strusevich et Pericleous ou il est mentionné que la simulation numérique du procédé de soudage ne peut avoir lieu qu'en deux étapes :

- Modéliser le bain fondu en prenant compte les différents phénomènes thermohydrauliques pour déterminer la forme du bain fondu et de la forme de la ZAT.
- Modéliser le comportement thermomécanique global de la structure soudée et où le rôle de la source de chaleur est important.

## **IV.5.2 Application d'un logiciel de simulation**

### **IV.5.2.1 Pour l'essai de traction et du rivetage**

De la même manière du sous chapitre précédent, nous allons utiliser un logiciel de simulation pour comparer nos résultats expérimentaux obtenus lors de l'essai de traction.

Le logiciel de SolidWorks® un ensemble de logiciels de conception mécanique 3D, de simulation, de création d'outillage et de communication de conception. SolidWorks® fait passer de la 3D au Digital Prototyping, en permettant à l'utilisateur de créer un modèle 3D précis pour concevoir, visualiser et simuler les produits avant leur réalisation.

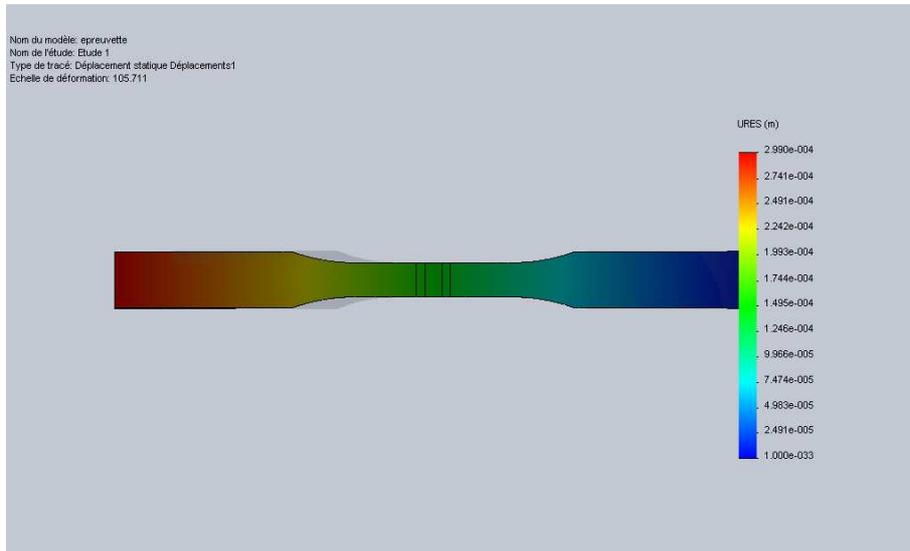
L'épaisseur choisie est 2 mm.

A travers cette étude, nous allons connaître, si comme dans la partie expérimentale, la rupture se déroule au niveau du cordon de soudure ou à l'extérieur de cette zone pour la partie 'essai e traction' et si les mêmes sollicitations utilisées lors de cet essai sont identiques ou non au procédé d'assemblage : Rivetage.

De cette étude, nous pourrons avoir une estimation sur la fiabilité de chaque procédé à savoir Soudage TIG ou Rivetage. Ces résultats vont aussi nous permettre de choisir le procédé le plus efficace.

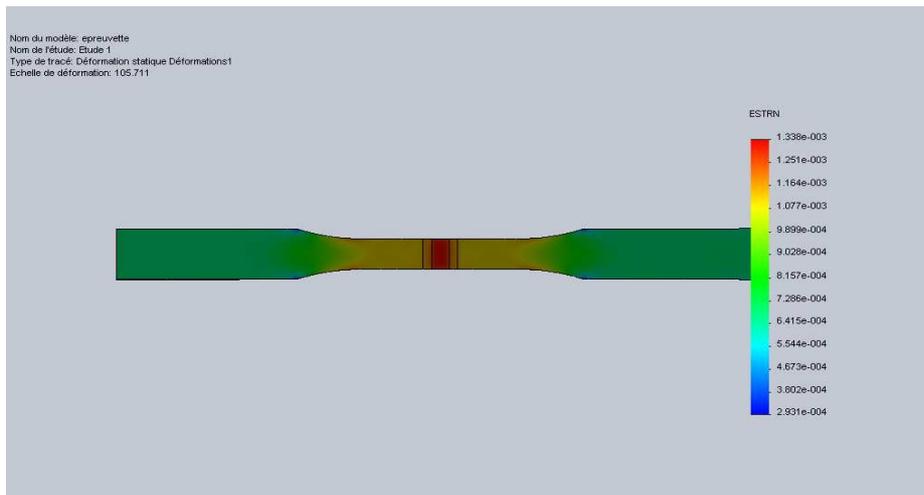
## IV.5.2.1 présentations des résultats

### a- Les résultats correspondent à la soudure



**Figure IV.5.** les Déplacements,

Déplacement maximum est a 0.29mm



**Figure IV.6.** Contours des Déformations

On remarque que les déformations se concentrent dans le cordon de soudure.

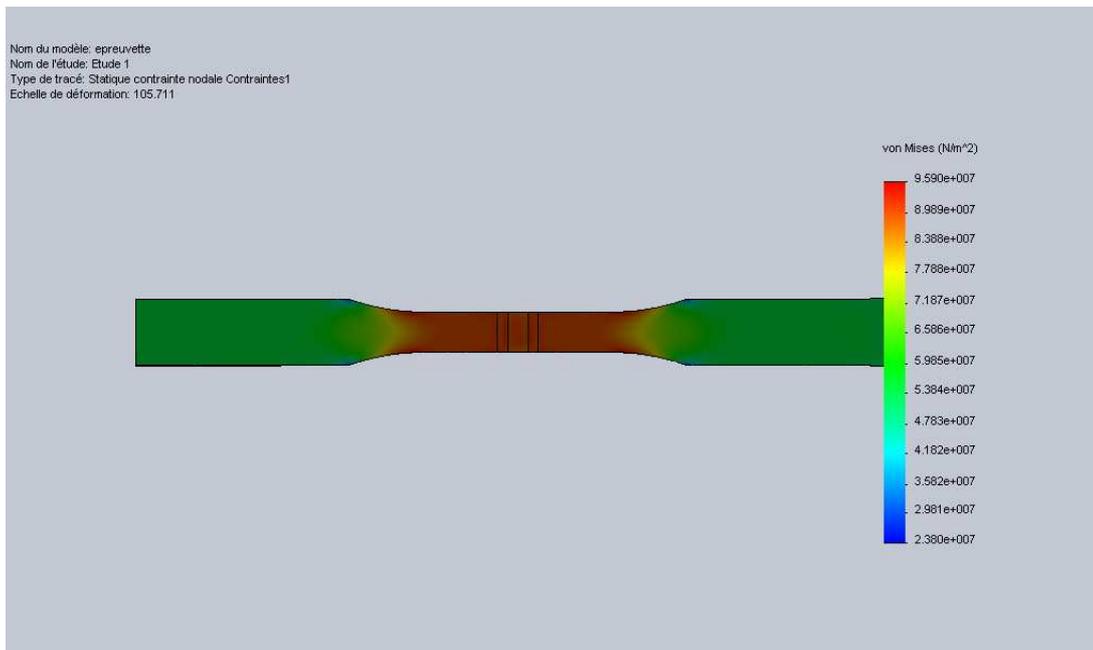


Figure IV.7 Contours des répartitions des Contraintes

On observe la colore rouge qui désigne la section dangereuse dans le 0.09 GPa.

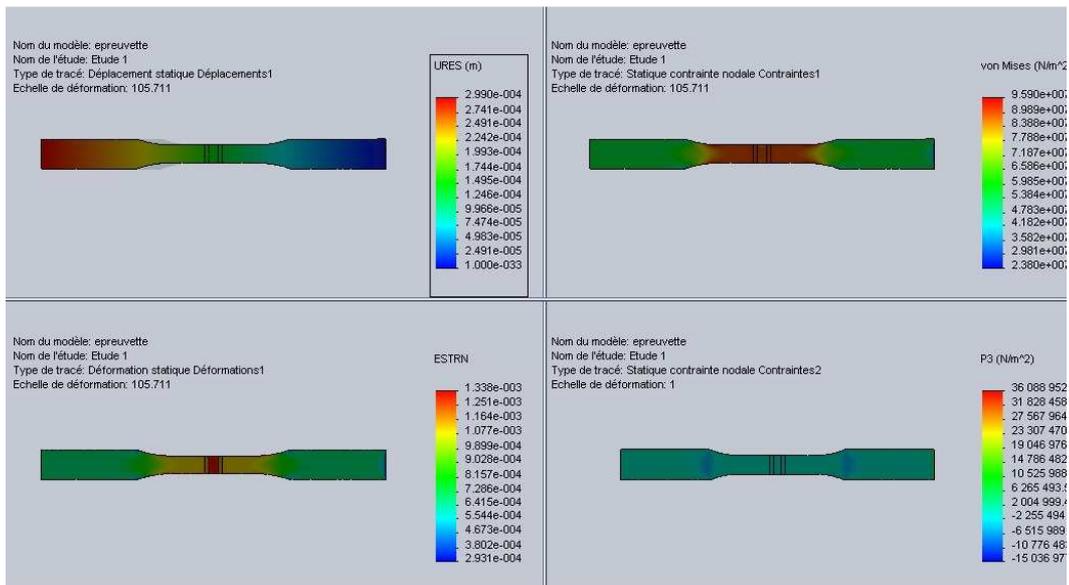
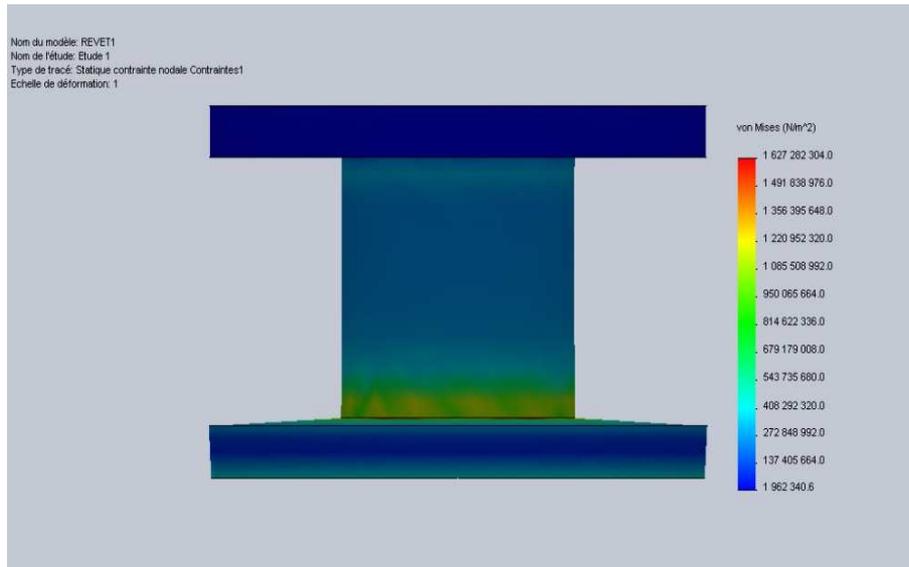


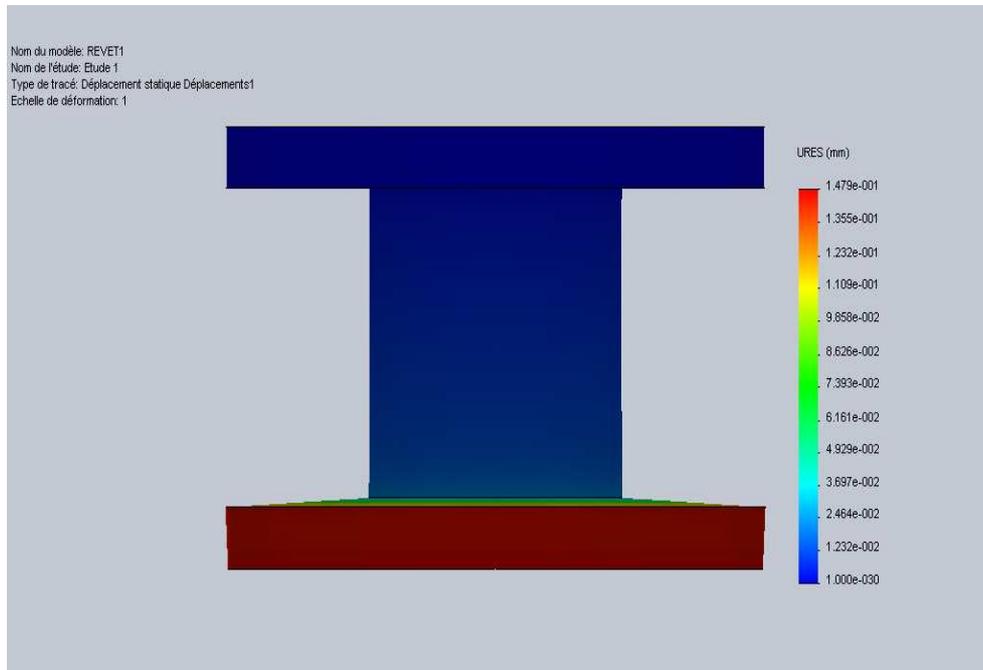
Figure IV.8 comportement du cordon de soudure

## b- Les résultats correspondent au rivet



**Figure IV.9.** Contours des répartitions des Contraintes

On observe la couleur rouge qui désigne la section dangereuse dans les 1.6 GPa



**Figure IV.10.** Contours des Déplacements

Déplacement max est a0 .14mm

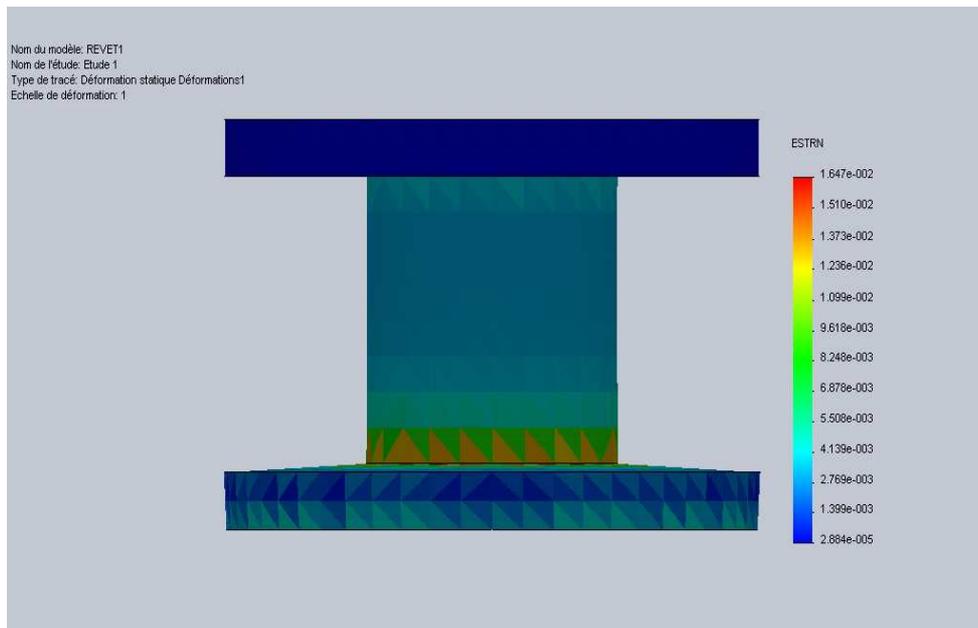


Figure IV.11 Contours des Déformations

On remarque que les déformations augmentent à la surface de contact (pression de contact) juste sous la tête de rivet.

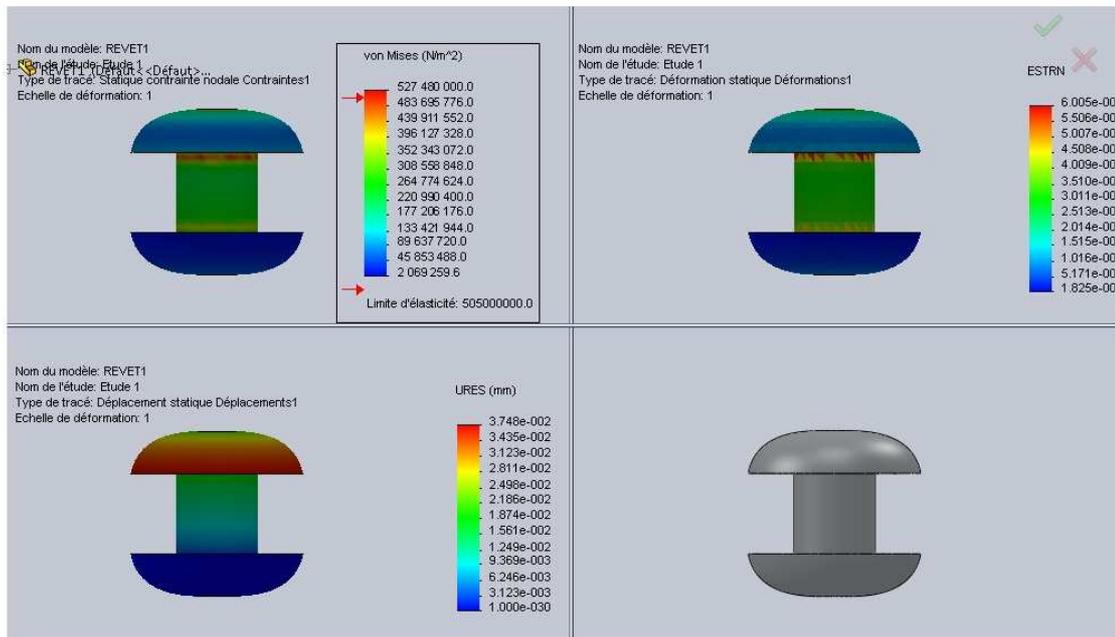


Figure IV.12 comportement du rivet

## IV.5. 2.2 Présentation des graphes

### a- Les contraintes

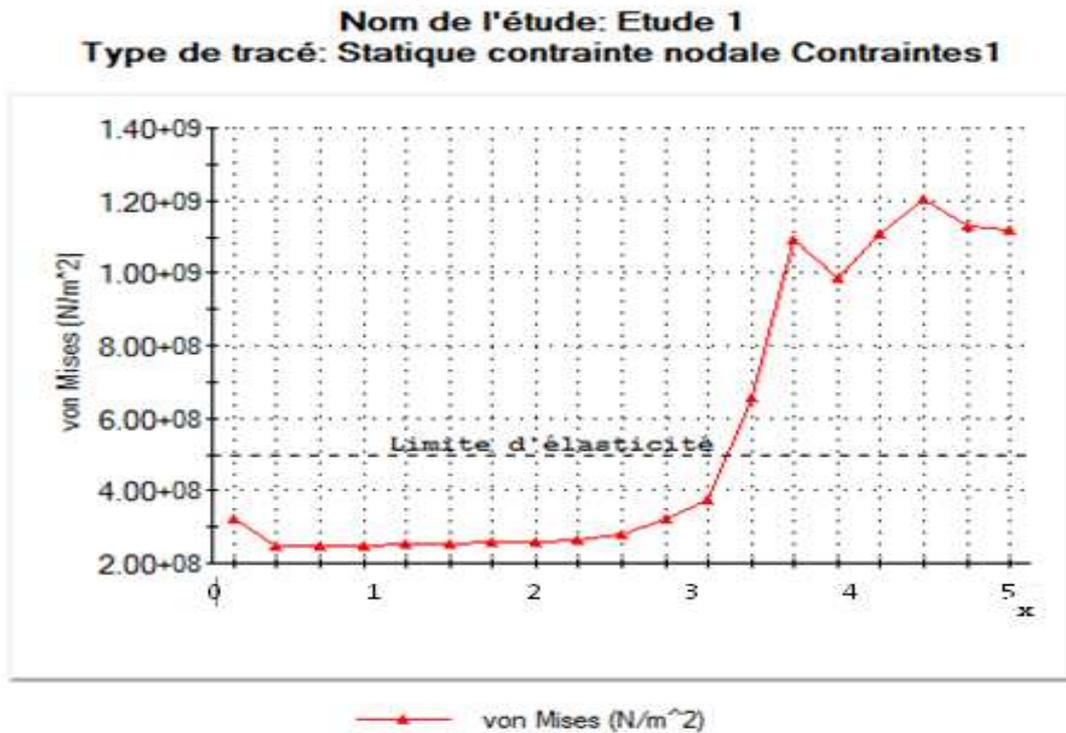


Figure IV.13 Les contraintes

Ce graphe nous montre clairement que les contraintes appliquées par la force de la traction (3.41KN) au rivet dépasse largement la limite d'élasticité ce qui va provoquer la rupture du rivet ainsi que la rupture de l'assemblage riveté.

De 0 à 3.5 mm, les contraintes sont normales.

A partir de 3.5 mm, les risques de ruptures commencent sur la surface de contact du rivet avec ses têtes et où se situe la pression du contact, facteur le plus délicat de ce procédé

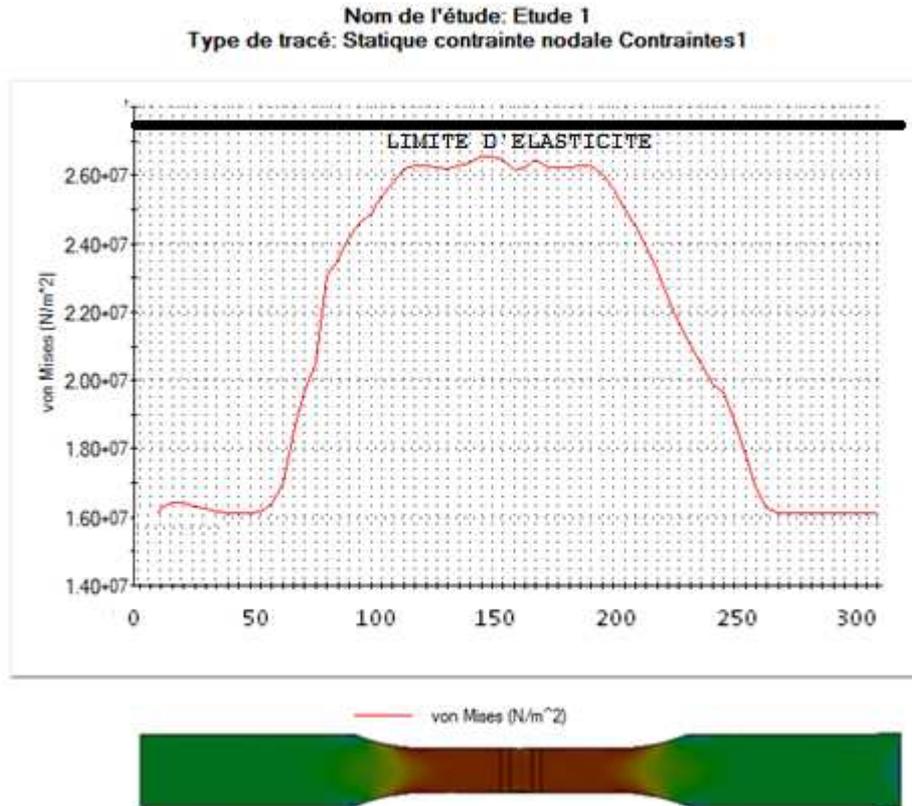
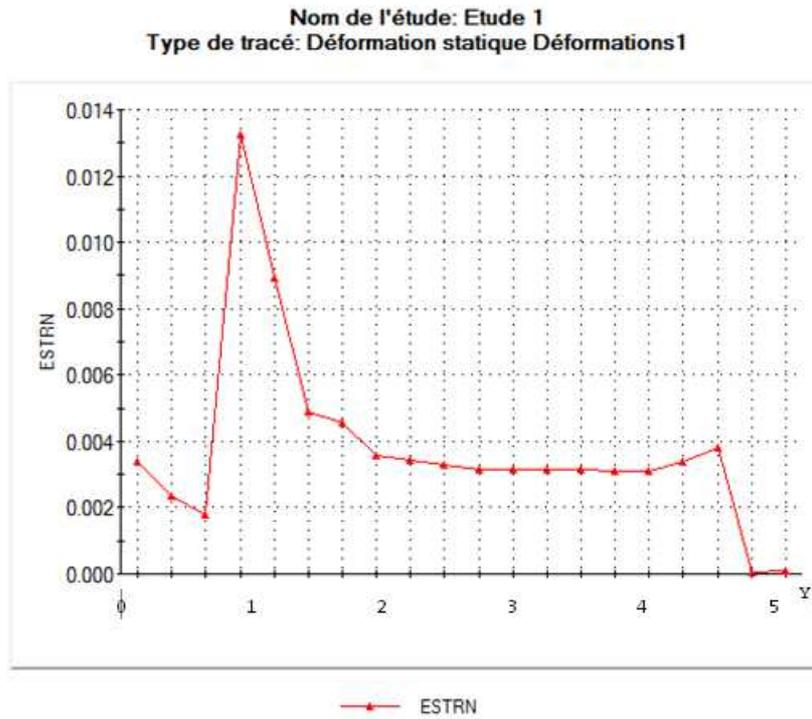


Figure IV.14. Répartition des contraintes le long de l'éprouvette

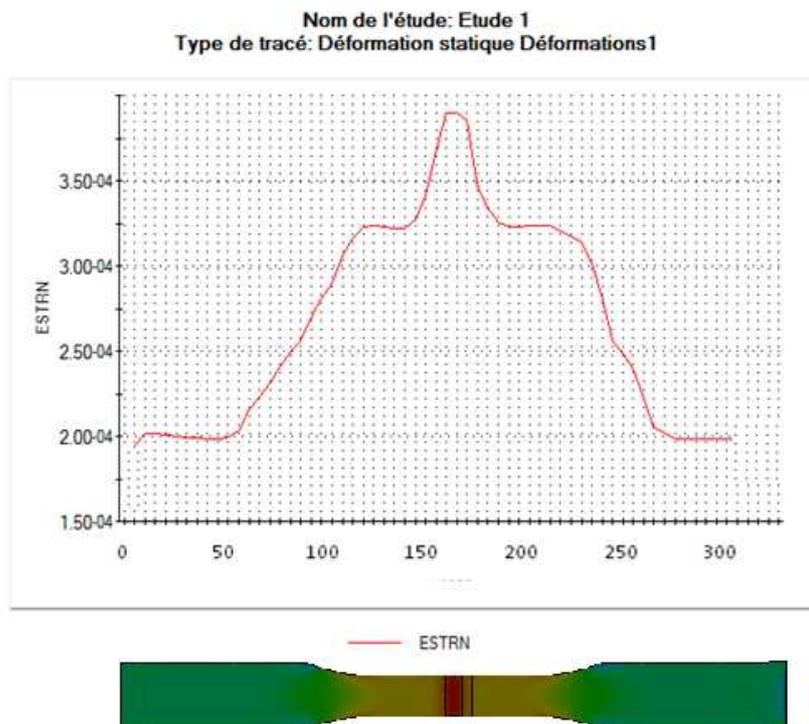
Dans ce cas, la contrainte appliquée par la même force de traction (3.41KN) n'arrive même pas à atteindre la limite d'élasticité (voisinage).

On remarque qu'au niveau de cordon de soudure, se concentrent les contraintes maximales.

**b- Les déformations**



**Figure IV.15. :** Déformations atteintes le max (0.0135E) à la surface du contact



**Figure IV.16. :** Déformations  
Les déformations sont maximales (0.00039E) dans le cordon de soudure

### c- Les déplacements

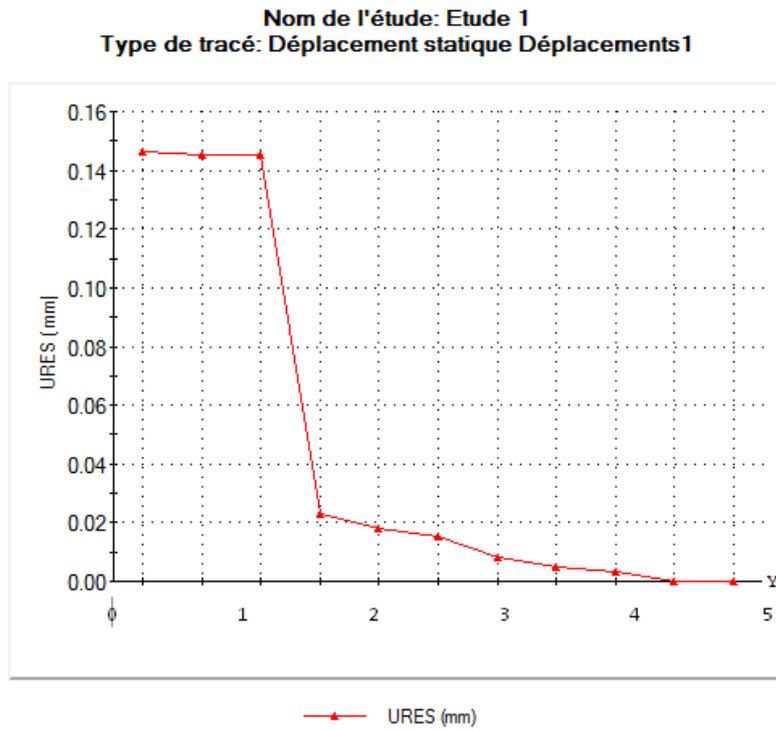


Figure IV.17 Déplacements de rivet

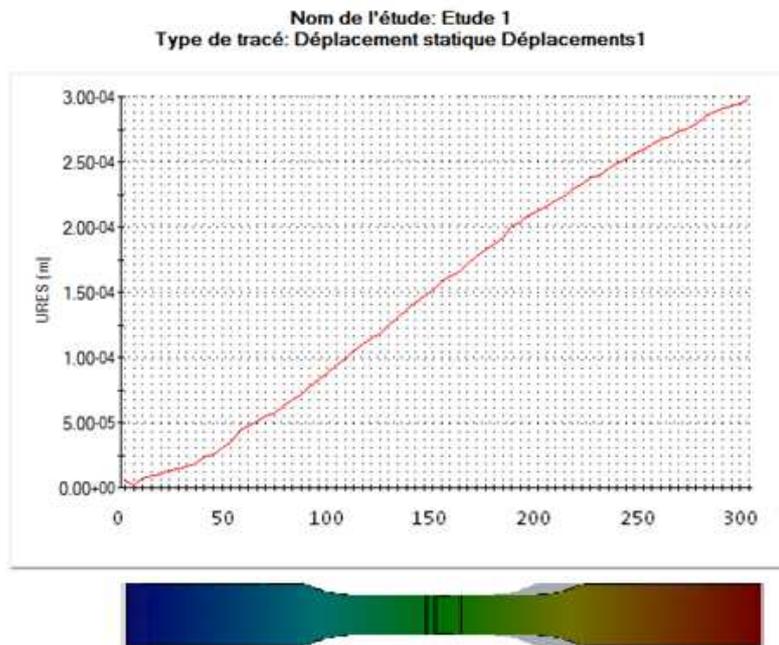


Figure IV .18 Déplacements de l'éprouvette

## IV.6 discussions

Notre étude a concerné le rivetage et le soudage TIG

### IV.6.1 les contraintes

En comparant les résultats de la Figure IV.13 et Figure IV.14, nous avons remarqué que le cordon de soudure peut supporter une charge appliquée (3.41KN) tandis que le rivet subit une rupture du fait que les contraintes générées par cette charge dépassent la limite d'élasticité.

Une première conclusion nous amène à constater que le cordon de soudure résiste mieux que le rivet.

#### IV.6.1.1 La limite d'élasticité

On définit la limite d'élasticité du matériau comme la contrainte à partir de laquelle le comportement cesse d'être purement élastique lors de la première mise en charge du matériau. Celle-ci,  $R_e$  se trouve aux alentours de 0.5 GPa pour l'alliage 7075 T6.

### IV.6.2 les déformations

En comparant les résultats des Figure IV.15 et 16, les déformations dans le rivet (0.0135E) sont plus intéressantes que dans le cordon (0.00039E). Le rivet est moins ductile que le cordon de soudure.

Une deuxième conclusion nous amène à constater que le rivet est plus fragile que le cordon.

#### IV.6.2.1 La déformation

La déformation plastique est la déformation irréversible d'une pièce ; elle se produit par un réarrangement de la position des atomes. Lorsque qu'on sollicite une pièce, un objet (on le tire, on le comprime, on le tord...), celui-ci commence par se déformer de manière réversible (déformation élastique), c'est-à-dire que ses dimensions changent, mais il reprend sa forme initiale lorsque la sollicitation s'arrête.

#### IV.6.2. La ductilité

La ductilité désigne la capacité d'un matériau à se déformer plastiquement sans se rompre. La rupture se fait lorsqu'un défaut (fissure ou cavité), induit par la déformation plastique, devient critique et se propage. La ductilité est donc l'aptitude qu'a un matériau à résister à cette propagation. S'il y résiste bien, il est dit ductile, sinon il est dit fragile.

# Conclusion générale

---

Notre travail intitulé, étude comparative des procédés d'assemblage, le rivetage et le soudage TIG, dans le domaine de l'aéronautique, nous a permis de mettre en pratique nos connaissances acquises lors de notre formation.

A travers cette étude, nous avons fait des recherches bibliographies sur les alliages d'aluminium 7075 T6, le procédé de soudage TIG, le rivetage et l'essai de traction. Ce dernier qui s'est déroulé au centre de soudage de Chéraga s'est déroulé dans de bonnes conditions ainsi que le soudage des tôles d'aluminium.

La pratique nous a permis d'affirmer que notre matériau reste toujours difficile à souder. Ce qui confirme la thèse que notre matériau soudé n'est pas encore accepté dans certains domaines tel que l'aéronautique. Pour comparer les deux procédés, une simulation a été utilisée dans le but de bien cerner le problème.

Les résultats ont montré que le procédé de soudage présente des avantages par rapport au rivetage. Les charges appliquées au cordon de soudure lors des sollicitations maximales (rupture) ne peuvent pas être supportées par les rivets.

L'optimisation des paramètres a été réalisée à l'aide du Solidworks. Elle a permis de retrouver la même évolution des comportements mécaniques dans l'essai de traction. Aussi, elle a conduit à des résultats satisfaisants en termes de réponse effort/écrasement ou de déformation locale.

Finalement, il a été constaté que lors de son utilisation, le rivetage présente des discontinuités physiques ou chimiques. C'est dans ce cas que le procédé de soudage pourrait être une technique d'assemblage concurrente. Ce changement de procédé est devenu un enjeu financier important dans la mesure où il entraînerait bien évidemment une réduction considérable de masse, donc de consommation de carburant et du coût d'exploitation.

---

# Références Bibliographique

- [1] M. Rachik « Simulation numérique des procédés numériques de mise en forme et d'assemblage », Habilitation à diriger les recherches, 2003, UTC
- [2] B. Saint-Germain « Etude expérimentale et numérique des distorsions des structures mécano-soudées » Thèse de doctorat, 2006, LGMM, Université de Bretagne-Sud
- [3] E. DELETOMBE, B. MALHERBE, "*Simplification d'un modèle de crash d'avion complet - Phase 1 - Rapport final.*", ONERA-Lille, Rapport n°97/02, Janvier 1997.
- [4] P. DUCROCQ, "*Contribution au développement de nouvelles méthodes en vue d'améliorer la représentativité des modèles éléments finis en dynamique rapide.*", Thèse de doctorat, Université de Valenciennes, 1997
- [5] B. GINESTE, "*Assemblages de structures en matériaux composites par stratification d'un élément de liaison. Caractérisation de l'endommagement.*", Thèse de doctorat, Université de Nantes, École Centrale de Nantes, 1993.
- [6] Sarrazin E., « Modélisation du soudage d'alliages d'aluminium », Thèse de doctorat, Ecole Polytechnique, 1995.
- [7] CEBULSKI, L. 1999-2001 Caractérisation Numérique et Expérimentale d'Assemblages Rivetés sous Sollicitations Statique et Dynamique, *Thèse de Doctorat, Université de Valenciennes.*
- [8] EUROCODE 3, 1992 Calcul des structures en acier et Document d'Application Nationale Partie 1-1 : Règles générales et règles pour les bâtiments, Chap. 6 : Assemblages sous charges statiques, *AFNOR*. HUCK, 1995 Huck BOM Blind Fasteners, *Documentation technique.*
- [9] SNCF, 1995 Rivets aveugles à haute résistance, *Fascicule de normalisation CF 00-043.*
- [10] Langrand, B. 2005. *Comportement et modélisation des assemblages ponctuels.* 2005. Techniques de l'ingénieur. BM 7 805.
- [11] Hamel, V. 1998. *Contribution à l'étude de l'assemblage par clinchage. Aspects numériques et expérimentaux.* 1998. Thèse de doctorat, Université de

Technologie de Compiègne. Mashayekhi, M., Ziaei-Rad, S., Parvizian, J., Niklewicz, J., Hadavinia, H. 2007.

[12] Ductile crack growth based on damage criterion: experimental and numerical studies. *Mechanics of Materials*. 2007, Vol. 39, pp. 623-636.

[13] Kachanov, L.M. 1958. Time of the rupture process under creep condition. *Izv. Akad. Nauk. SSSR, Otd. Tekhn. Nauk*. 1958, Vol. 8, pp. 26–31

[14] Lemaitre, J. et Chaboche, J.L. 1996. *Mécanique des matériaux solides*. 2e édition. s.l. : Dunod, 1996.

[15] Lemaitre, J. et Desmorat, R. 2005. *Engineering damage mechanics*. s.l. : Springer-Verlag, 2005

### **Technique de l'ingénieur**

[1] Tôles pour mise en forme

[2] Calcul des assemblages vissés

[3] Assemblages de pièces planes de faibles Epaisseurs

[4] Corrosion des alliages d'aluminium *par* Max REBOUL

[5] Aluminium et alliages d'aluminium corroyés : propriétés métalliques *par* Roger DEVELAY

[7] Propriétés de l'aluminium et des alliages d'aluminium corroyés *par* Roger DEVELAY

[8] Traitements thermiques des alliages d'aluminium *par* Roger DEVELAY

[9] Anodisation de l'aluminium et de ses alliages

*Par* Jean Sylvestre SAFRANY