

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE



**UNIVERSITE SAAD DAHLAB DE BLIDA 1 FACULTE DE TECHNOLOGIE  
DEPARTEMENT DE MECANIQUE**

Projet de Fin d'Etudes  
Pour l'obtention du Diplôme de Master en  
Fabrication mécanique et productive

Laboratoire de structure

Titre

**Soudage des alliages d'aluminium et  
étude du cordon de soudure**

Proposé et encadré par :  
Pr. M.TEMMAR

Réalisé par :  
Boualam mouhamed  
Belaid Abdessalem  
Bradaia Ahmed

Année universitaire 2019/2020

## Résumé

Le soudage est le procédé d'assemblage le plus utilisé de nos jours, il joue un rôle très important dans tous les secteurs industriels, le terme en service des assemblages soudés est une grande préoccupation industrielle avec des enjeux économiques important, parmi les procédés de soudage : le soudage TIG.

Les alliages d'aluminium 7075 T6, sont difficilement soudables. Notre travail consiste à utiliser le procédé de soudage TIG pour les souder.

Pour vérifier la qualité la soudure, on a utilisé les essais mécaniques comme l'essai de résilience et l'essai de traction.

Pour modéliser cette étude, on a utilisé le logiciel des plans d'expérience et le logiciel SolidWorks.

Summary :

Welding is the most widely used assembly process today, it plays a very important role in all industrial sectors, the term in service of welded assemblies is a major industrial concern with important economic stakes, among welding procedures: TIG welding.

Aluminum alloys 7075 T6, are difficult to weld. Our job is to use the TIG welding process to weld them.

To verify the quality of the weld, mechanical testing such as resilience testing and traction testing was used.

To model this study, experience plan software and SolidWorks software were used.

التلخيص :

التلحيم هو عملية التجميع الأكثر استخدامًا في الوقت الحاضر ، فهو يلعب دورًا مهمًا للغاية في جميع القطاعات الصناعية ، ومصطلح خدمة التجمعات الملحومة هو مصدر قلق صناعي كبير مع رهانات اقتصادية مهمة ، من بين عمليات اللحام : تيج لحام.

يصعب تلحيم سبائك الألمونيوم T6 7075. مهمتنا هي استخدام عملية التحام TIG لتلحمها.

للتحقق من جودة اللحام ، تم استخدام الاختبارات الميكانيكية مثل اختبار الصدمات واختبار الشد.

لنمذجة هذه الدراسة ، تم استخدام برنامج التصميم التجريبي وبرنامج SolidWorks.

## Remerciement

Je tiens tous d'abord à remercier Dieu le tout puissant, qui ma donné la force patience d'accomplir ce modeste travail

En second lieu, je tiens à remercier mon promoteur TEMMAR Mustapha pour leurs disponibilités constantes, tout au long de mon travail

Je remercie également toute l'équipe qui travail au niveau de département de science et technologie Blida pour tout aide qu'ils apportent au étudiants

Je tiens à exprimer mes remerciements aux membres du jury pour l'intérêt qu'ils ont porté a notre recherche en acceptant ce travail et de l'enrichir par leur prépositions .

Comme je n'oublie pas d'exprimer ma reconnaissance a tous les enseignants qui ont contribué ma formation

Mes vifs remerciement vont également à ma famille pour leur soutien compréhension et patience tout au long de mon cursus

Enfin , je tiens également à remercier toutes les personnes qui ont participé de prés ou de loin a la réalisation de ce travail

## Dédicace

Je dédie ce travail

A mes très chers parents

A mes frères et mes sœurs

A tous les membres de ma grande famille

A tous mes enseignants

A tous mes amis et collègues

# SOMMAIRE

Résumé

Remerciement

Dédicaces

Sommaire

Liste de figures

Liste des tableaux

Introduction générale .....1

## **Chapitre I : généralités sur le soudage**

I -1 définition de soudage .....3

I -2 technique de soudage .....3

I -3 soudage de nos jours.....3

I -4 procédés de soudage.....3

I -4-1 soudage au gaz ou au chalumeau .....3

I -4-2 soudage à l'arc .....4

I -4-2-1 soudage à l'arc avec électrode enrobée.....4

I -4-2-2 soudage à l'arc électrique type TIG tungstène gaz.....5

I -4-2-3 soudage TIG sous argon .....8

I -5 les différentes Zones du joint soudé .....8

I -5-1 Zone fondue.....9.

I -5-2 zone de liaison .....9

I -5-3 zone affectée .....10

## **Chapitre II : soudage par TIG**

II -1 généralité.....	11
II -2 principes de procédé de soudage TIG .....	12
II -3 avantages et les inconvénients du procédé .....	14
II -4 caractéristique du procédé de soudage TIG.....	15
II -5 les effets du procédé de soudage TIG .....	15
II -5-1 effet thermique .....	17
II -5-2 effet mécanique du régime thermique.....	18
II -6 déformations en soudage .....	18
II -6-1 les contraintes résiduelles.....	18
II -6-2 contraintes résiduelles longitudinales.....	18
II -6-3 contraintes résiduelles transversales .....	20
II -7 soudage des alliages d'aluminium .....	22
II -7-1 introduction .....	22
II -7-2 historique .....	23
II -8 principaux stade et flux dans la fabrication de l'aluminium.....	23
II -8-1 principes caractéristiques.....	25
II -8-1-1 caractéristiques.....	25
II -8-1-2 propriétés.....	25
II -9 technique e soudage.....	25

### **Chapitre III : les essais mécaniques**

III-1 généralité.....	30
III-2 notions de conception.....	30
III-3 rôle des traitements thermiques de surface et les essais mécanique.....	31

III-3-1 les traitements thermique.....	31
III-3-2 les essais mécaniques.....	31
III-4 partie expérimentale.....	33
III-4-1 essai de traction.....	34
III-4-2 essai de résilience.....	37

### **Chapitre IV : simulation numérique des résultats**

IV-1 introduction.....	44
IV-2 application de méthode des Plans d'expérience.....	45
IV-2-1 définition.....	45
IV-2-2 espace expérimentale.....	46
IV-3 surface de réponse.....	49
IV-4 modélisation mathématique.....	49
IV-5 application de la méthode des plans d'expérience.....	56
IV-6 application d'un logiciel de simulations pour l'essai de traction.....	63
Concluions générale	
Références bibliographie	

## Liste des figures

figure I -1 soudage au chalumeau.....	3
figure I -2 principaux procédés de soudage à l'arc électrique.....	4
figure I -3 schéma de principe du soudage à l'arc électrique source.....	5
figure I -4 soudage TIG sous argon .....	6
figure II -1 système vis\ écrou utilisé pour une fixation des structures.....	11
figure II -2 schéma simplifié du gain de masse Rivet et Soudure.....	12
figure II -3 profil longitudinal et transversal de la forme TIG [10].....	12
figure II -4 principe de l'application de la torche du procédé de soudage TIG...	13
figure II -5 forme des électrodes de soudage TIG.....	13
figure II -6 différentes formes de source de chaleur.....	16
figure II -7 répartition des températures et contraintes lors d'un soude bout à bout [20].....	17
figure II -8 aspect de cycle thermique de la zone affectée par la chaleur et définition des paramètres.....	18
figure II -9 différentes modes de déformations.....	20
figure II -10 répartition des contraintes longitudinales après le soudage et refroidissement [20].....	22
figure II -11 répartition des contraintes résiduelles transversales résultant d'un auto bridage.....	22
figure II -12 principaux stades et flux dans la fabrication d'un aluminium.....	25
figure II -13 apparition d'une fissure lors du soudage TIG d'un alliage d'aluminium 7075 T6 (épaisseur=2mm).....	
figure III -1 éprouvette de l'essai de traction normalisé.....	34

figure III-2 les différentes étapes de réalisation d'une éprouvette lors de l'essai de traction.....	35
figure III-3 éprouvette préparé.....	36
figure III-4 essai de traction sur une éprouvette d'épaisseur 2mm .....	36
figure III-5 essai de traction sur une éprouvette d'épaisseur 2.5mm.....	37
figure III-6 éprouvette normalisé.....	38
figure III-7 emplacement des entailles dans les différentes zones a souder ...	38
figure III-8 photo d'une éprouvette ayant subit un essai de résilience et variation de la résilience on fonction des différentes températures (métal de base).....	41
figure III-9 photo d'une éprouvette ayant une essai de résilience et variation de la résilience en fonction des différentes températures (ZAT) .....	42
figure IV-1 Domaine de variation d'un seul facteur.....	46
figure IV-2 Domaine de variation de deux facteur.....	47
figure IV-3 Points expérimentaux dans l'espace expérimentale.....	48
figure IV-4 Domaine d'étude pour le cas deux facteurs .....	48
figure IV-5 Domaine d'étude de la température et de l'épaisseur.....	51
figure IV-6 Cas minimale (Löv value).....	53
figure IV-7 Contours de raiponces.....	55
figure IV-8 éprouvette soudée.....	56
figure IV-9 Machine de traction.....	57
figure IV-10 Représentation de maillage.....	58
figure IV-11 Déplacement.....	59
figure IV-12 Contrainte.....	59

## Liste des tableaux

Tableau II -1 Intensités admissible sur les électrodes tungstène suivant la nature de courant et de l'électrode ainsi que le diamètre .....	14
Tableau III -1 Caractéristiques physiques du matériau.....	33
Tableau III -2 Caractéristiques de l'essai de traction (épaisseur=2.5mm).....	37
Tableau III -3 Résilience de la zone de métal de base (épaisseur=2mm	
Tableau III -4 Résilience e la zat (épaisseur=2mm).....	39
Tableau III -5 Résilience de la zone fondue (épaisseur=2mm).....	40
Tableau III -6 Résilience de la zone de métal de base (épaisseur=2.5mm).....	40
Tableau III -7 Résilience pour la zone fondue (épaisseur=2.5mm).....	40
Tableau III -8 Résilience pour la zone fondue (épaisseur=2.5mm).....	41
Tableau IV -1 Les 2 factures, leur unités, leur maximums et leur minimums....	50
Tableau IV -2 Les 2 factures et leur réponses .....	50
Tableau IV -3 Les facteurs et leur valeurs.....	52
Tableau IV -4 Les propriétés des matériaux.....	57
Tableau IV -5 Information sur le maillage.....	57
Tableau IV -6 Les détails de maillage.....	59
Tableau IV -7 Les résultants expérimentaux pour notre échantillon épaisseur =2mm.....	60
Tableau IV -8 Les résultats expérimental pour épaisseur =2.5mm.....	61

## 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.

Afin de répondre à cette demande, la modélisation du comportement d'un matériau permet de prédire les caractéristiques mécaniques.

A travers notre étude, nous allons faire une recherche biographique sur le procédé de soudage et sur les alliages d'aluminium 7075 T6. Pour étudier cette soudure, nous allons utiliser deux essais mécaniques qui sont les plus utilisés en pratique : essai de traction et de résilience. La première partie de notre travail concernera la partie expérimentale et la deuxième partie concernera l'application de la méthode des plans d'expériences et l'utilisation du logiciel SolidWorks pour comparer les résultats expérimentaux.

La méthode des plans d'expérience permettra de décrire l'action de cause lors des essais expérimentaux. Ce comportement est décrit à l'aide d'un modèle mathématique obtenu par la méthode des plans d'expérience ; les étapes sont alors clairement exposées. Celle-ci concernera l'essai de résilience. L'essai de traction sera étudié par SolidWorks.

Les résultats obtenus nous permettront de déterminer la qualité de la soudure.

# **Chapitre I : Généralités sur le soudage**



## **I -1 Définition de soudage**

Le soudage est une opération qui consiste à assurer la liaison permanente de deux ou plusieurs parties constitutives de nature identique ou différente, soit par chauffage, soit par pression, soit par l'action simultanée des deux, de la chaleur et de la pression. Le soudage peut être effectué avec ou sans métal d'apport [15].

## **I -2 Technique de soudage**

Dans la technique de soudage on trouve différentes méthodes qui s'appliquent suivant les épaisseurs des joints et leur préparation telle que bord à bord, bords relevés, sur chanfrein en V, sur chanfrein en X etc.

## **I -3 Le soudage de nos jours**

Nous n'estimons aujourd'hui que (60 à 80) % de la production mondiale de l'acier soient destinés à la fabrication des produits soudés.

A noter que le soudage est particulièrement utilisé dans les domaines de la fabrication des assemblages métallique à partir de la microélectronique jusqu'à la fabrication de grands corps de presses hydraulique. Actuellement nous avons la possibilité de des éléments d'épaisseur de 0.01mm jusqu'à 1000 mm et même plus en bref, on soude presque tous les métaux et alliages utilisés dans les techniques modernes.

## **I -4 Procède de soudage**

### **I -4-1 soudage au gaz ou au chalumeau**

Le soudage au gaz ou à la flamme, consiste à assembler des pièces de métal à l'aide d'un métal d'apport amené à fusion par la chaleur de la flamme d'un chalumeau.

Selon le type de pièces à assembler et la résistance de l'assemblage que l'on souhaite obtenir, on utilise différentes techniques.[3]



Figure I .1. Soudage au chalumeau  
I -4-2 Soudage à l'arc

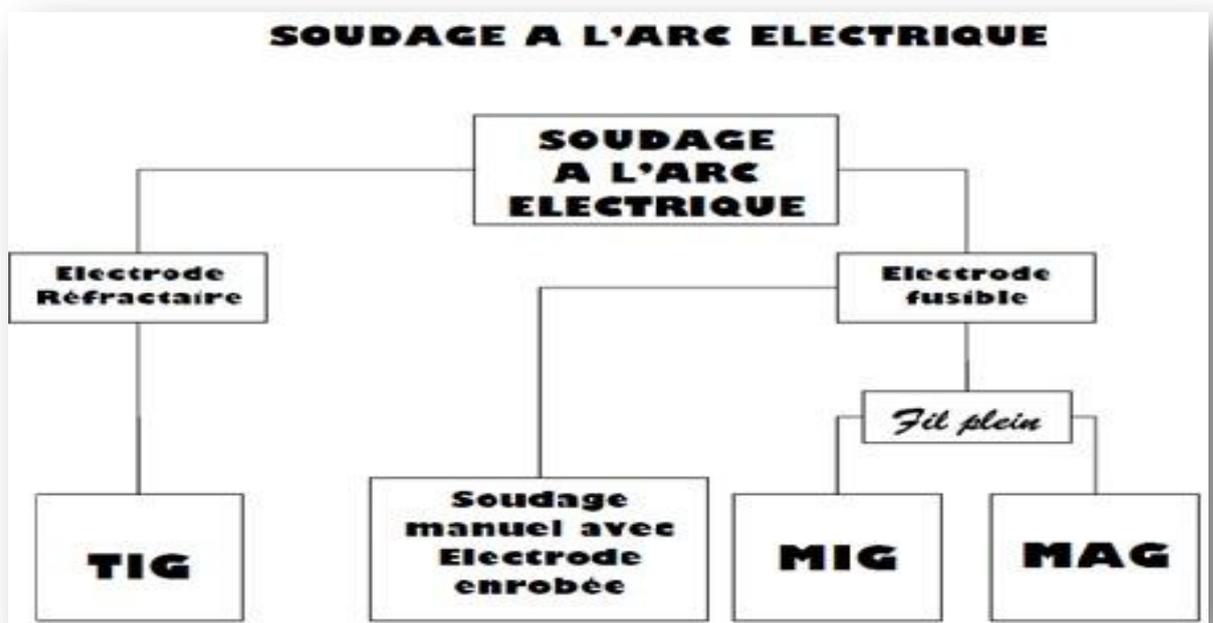


Figure I .2. Principaux procédés de soudage à l'arc électrique

Les différentes techniques de soudage à l'arc utilisent l'énergie calorifique d'un arc électrique entretenu entre une électrode et le métal à assembler. [4]

Les procédés de soudage appelés soudage de rechargement existent aussi et sont largement utilisés pour la remise en état de pièces et assemblage usés ou endommagés.

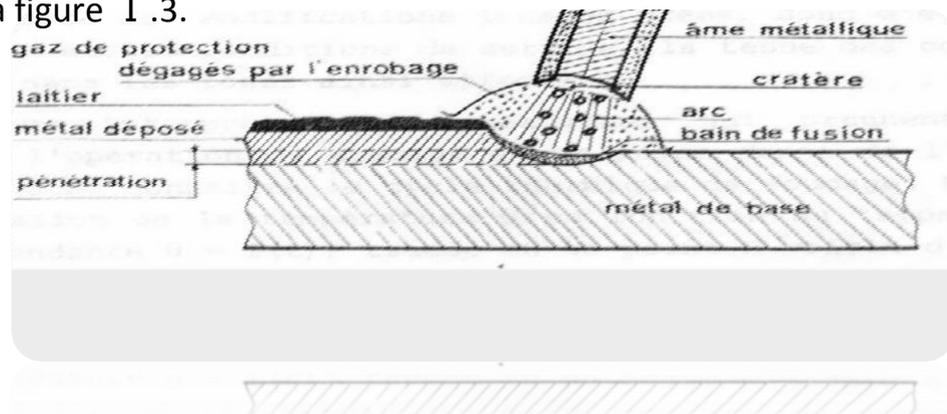
Le développement actuel des procédés de soudage est axé vers le perfectionnement des techniques d'utilisation (procédures, métallurgie, et équipement), vers l'introduction des robots industriels et de la programmation, vers l'application des nouvelles sources d'énergie telle que le LASER [2].

#### I -4-2-1 soudage à l'arc avec électrode enrobée

Le soudage à l'arc électrique est le plus répandu comme procédé d'assemblage des pièces métalliques. Une fusion rapide localisée fait que les déformations des pièces soudées à l'arc sont peu importantes. Cette localisation de la chaleur implique une grande rapidité de soudage et un rendement important, avantages indéniables de ce procédé, même sur des tôles de faible épaisseur. Cette rapidité de soudage est encore accentuée par l'emploi d'électrode à haut rendement. [2]

#### Schéma de principe

Le schéma de principe du soudage à l'arc électrique avec électrode enrobée est présenté par la figure I .3.



**Figure I .3. Schéma de principe du Soudage a l'arc électrique Source d'énergie**

Un générateur de courant électrique, alternatif ou continu, produit un arc électrique libre entre l'électrode métallique fusible et les deux pièces à assembler. [5]

#### Métal d'apport

Le métal d'apport se présente sous forme d'une électrode enrobée, caractérisée par le diamètre de l'âme métallique et la nature chimique de l'enrobage.

### **Élément de protection**

La protection du bain de fusion contre la contamination atmosphérique est assurée par des gaz provenant de la dissociation de l'enrobage dans l'arc. La protection du métal déposé est assurée par la formation d'un laitier adhérent à la surface de ce métal. [5]

### **I -4-2-2 Soudage à l'arc électrique type TIG Tungstène Insert Gaz**

Procédé de soudage mis au point aux Etats-Unis. Il s'apparente au soudage à l'arc, mais en lui apportant des améliorations conséquentes en matière de facilité de mise en œuvre et de qualité de soudure. Après le soudage à l'arc électrique et électrode enrobée, c'est le procédé le plus répandu. La chaleur nécessaire à créer la soudure est apportée par un arc électrique. Cet arc électrique est transmis au métal de base par une électrode en tungstène et le bain de soudure est protégé par un flux de gaz inerte.

L'arc électrique généré est stable, précis, capable de souder des métaux très réactifs comme l'Aluminium ou le Titane.

Par exemple le soudage de l'inox, avec le procédé TIG, permet d'éviter la formation d'oxydes de chrome. Formation qui entraînerait localement une baisse de la concentration en chrome et diminuerait sa résistance à la corrosion.

La soudure se fait sous protection de gaz inerte (ne présentant pas de danger, pas de risque explosif) Différents types de gaz sont utilisés :

- Argon pour l'acier
- Argon- Hélium (mélange binaire) pour l'aluminium
- Argon- Hélium- Oxygène

Dans cette technique l'arc électrique et la soudure sont protégés par le gaz. Ce qui permet de se passer de l'enrobage de la baguette. Ceci amène une diminution substantielle des émissions de fumée .

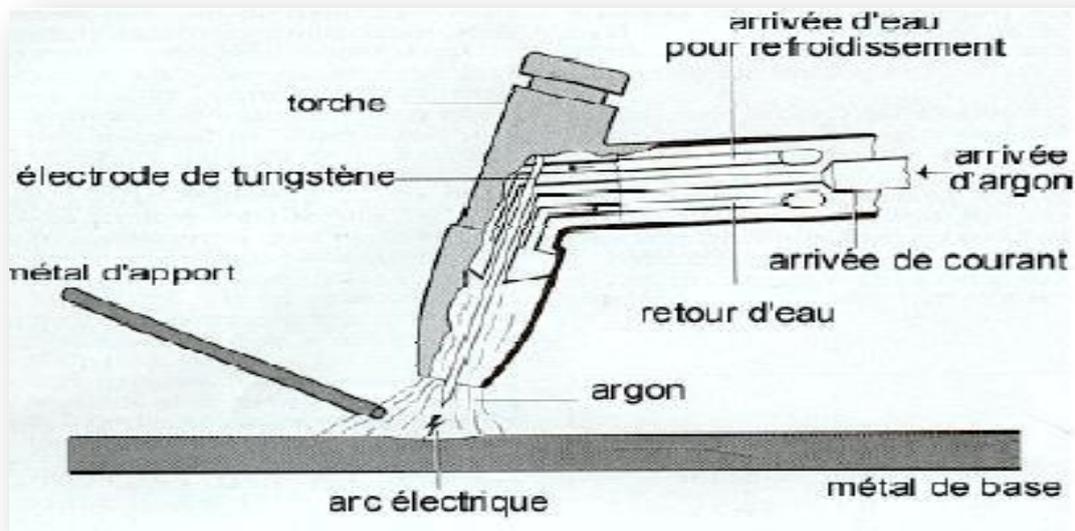


Figure I .4. Soudage TIG sous argon

Soudage MIG/MAG

### **I -4-2-3 Soudage semi-automatique: MIG, MAG**

Aussi appelé « kilomètre soudé ». Il s'agit d'un procédé de production grande quantité. Dans les ateliers, la métallerie. Il est rapide, nécessitant moins déformation pour la mise en œuvre que le procédé TIG. Sans production de laitier comme dans le soudage à l'arc avec électrode enrobée.

L'arc électrique est véhiculé par un fil électrode fusible (à la fois métal d'apport et électrode), ceci jusqu'à l'extrémité de la torche de soudage, qui est munie d'une gâchette. Le fil est disposé sur le dévidoir d'une bobine. Ce dévidoir tourne pour faire avancer le fil à l'aide d'un moteur de 24 Volt. La vitesse du fil en m/min est réglée à l'aide d'un potentiomètre. Le soudeur appuie sur la gâchette pour débiter le gaz protecteur, alimenter l'arc électrique et dévider le fil électrode. [6]

Protection gazeuse inerte (MIG : Métal Insert Gaz) le gaz s'écoule de façon continue et protège le métal en fusion contre l'oxygène et l'azote de l'air. En général de l'Argon ou du mélange Argon-Hélium.

Protection gazeuse active (MAG : Métal Active Gaz) le plus souvent par CO<sub>2</sub> ou mélange Argon-CO<sub>2</sub> ou Argon-CO<sub>2</sub>-O<sub>2</sub>. Le gaz protecteur participe activement au processus en réagissant, dans l'arc, avec les métaux d'apport et de base.

### **I -5 Les différentes zones du joint soudé**

Un procédé de soudage peut être assimilé à une opération locale d'élaboration métallurgique et délaitement thermique donnant une structure cristalline dépendant à la fois de la composition chimique élaborée et du traitement thermique engendré par le soudage. Une fois réalisée, la soudure par fusion se décompose en plusieurs zones (Figure II.1) :

### **I -5-1 Zone fondue (ZF)**

Zone où l'état liquide est prépondérant où la structure métallurgique obtenue après solidification dépend du cycle de refroidissement. On distingue des gradients de concentration de la partie la plus fondue vers la moins fondue. Il est donc possible d'examiner les variations de dureté [*Granjon 1995, Hamide 2008*].

### **I -5-2 Zone de liaison (ZL)**

Zone située entre la ZF et la ZAT, correspond à la surface sur laquelle la solidification du métal fondu a commencé.

### **I -5-3 Zone affectée thermiquement (ZAT)**

Elle concerne le métal de base qui n'a pas fondu mais qui a subi des modifications de structure (gros grain) ou physicochimiques (nature et proportions des constituants).

Pour les aciers la ZAT est la zone du métal de base qui a été austénitisée au cours du cycle de soudage

## Chapitre II : soudage par TIG

## II -1Généralité

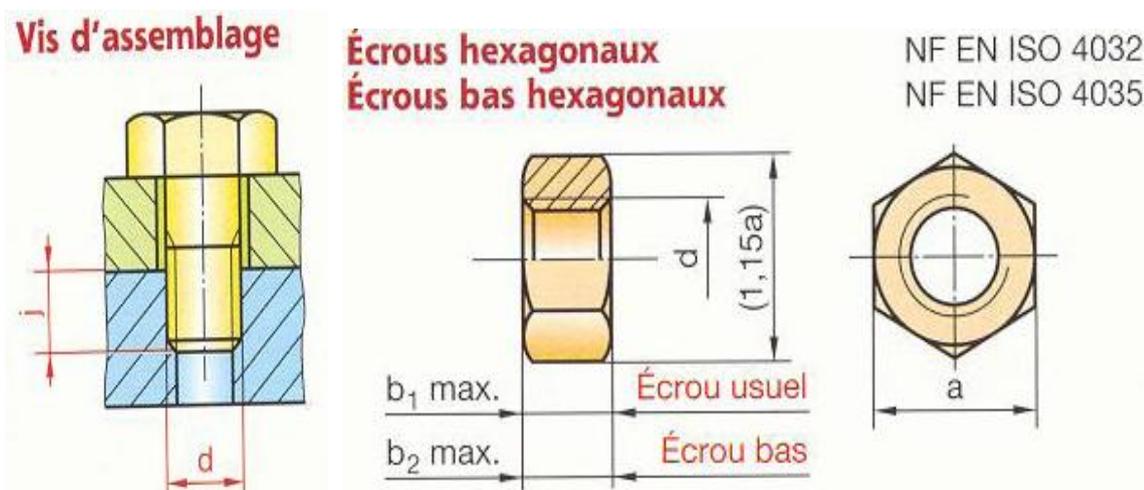
En fabrication mécanique et dans le domaine des assemblages aéronautiques, les fixations doivent remplir cinq fonctions principales [1] :

- 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 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.

La figure I.1 représente un système vis/écrou normalisé utilisé pour les fixations des structures :

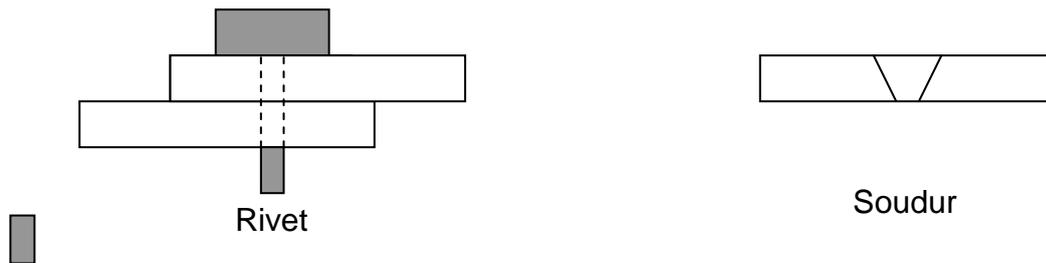


**Figure II .1:** Système vis/écrou utilisé pour les fixations des structures [2]

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[3]. 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.

Avec:



= Masse supplémentaire

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

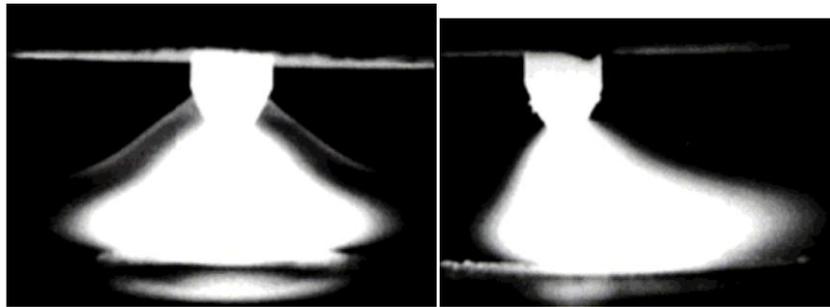
## II -2/ PRINCIPE DU PROCEDE DE SOUDAGE TIG:

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

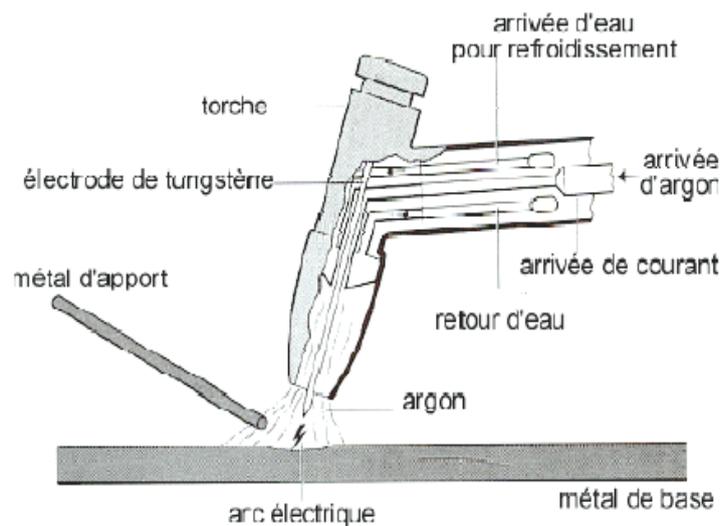
d'apport. Pour des épaisseurs importantes (généralement supérieures à 3 mm), les tôles nécessitent des préparations de bords (chanfreins) et du métal d'apport. Il faut impérativement éviter que l'électrode ne touche le bain de fusion pour éviter toute absorption de tungstène. Un arc électrique est établi 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 (poledu 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.

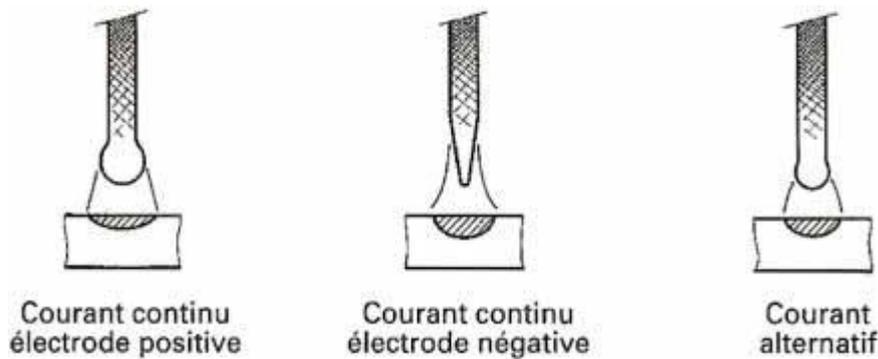


**Figure II.3 :** Profil longitudinal et transversal de la flamme TIG [10]



**Figure II.4 :** 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, la courante continue électrode négative et le courant alternatif



**Figure II .5** Forme des électrodes pour soudage TIG

Ø mm	Courant alternatif		Courant continu (polarité directe)	
	Tungstène pur	Tungstène thorié	Tungstène pur	Tungstène thorié
1	10-50 A	20-70 A	10-70 A	10-80 A
1.6	40-80 A	50-100 A	50-100 A	50-120 A
2	60-110 A	60-180 A	90-160 A	90-190 A
3	90-180 A	150-270 A	140-260 A	170-300 A
4	160-240 A	220-320 A	220-380 A	260-450 A
5	200-340 A	300-400 A	350-550 A	400-650 A
6	300-450 A	350-550 A	500-700 A	600-800 A
7	400-600 A	500-700 A		
8	550-750 A	650-800 A		

**Tableau II .1 :** Intensités admissibles sur les électrodes de tungstène suivant la nature du courant et de l'électrode ainsi que le diamètre

### II -3 / AVANTAGES ET INCONVENIENTS DU PROCEDE:

Parmi les avantages, on peut citer :

- Possibilité de souder la plupart des métaux et alliages soudables, à l'exception des métaux qui ont un très bas point de fusion comme l'étain,
- Possibilité de souder les métaux qui sont recouverts de leurs oxydes (très réfractaires) comme l'aluminium, le magnésium et les métaux qui s'oxydent rapidement en présence d'oxygène ou d'azote,
- Pas de laitier à éliminer,

- Pas de projections,
- Produit d'apport utilisé uniquement là où le soudeur en a besoin,
- Procédé utilisable dans toutes les positions,
  
- Contrôle facile de l'énergie de soudage; c'est un procédé "chaud" à forte énergie, mais qui peut être réduite dans une très grande proportion en utilisant le courant pulsé,
- Grâce au contrôle de l'énergie et l'utilisation du métal d'apport, soudure de matériaux de faible épaisseur et passes de pénétration sur joints accessibles d'un seul côté possibles,
- Arc et bain de fusion visibles,
- Produit d'apport ne traversant pas l'arc; addition indépendante du courant de soudage.

Parmi les inconvénients de ce procédé, on peut citer :

- Vitesse de soudage faible,
- Risque de contamination de l'électrode réfractaire,
- Vitesse de dépôt lente; procédé coûteux et peu intéressant pour l'assemblage des pièces épaisses,
- Pièces à souder nécessairement propres, il n'y a pas de flux, ni de laitier actif,
- Protection gazeuse perturbée et insuffisante dans le courant d'air.

## **II -4/ CARACTERISTIQUES DU PROCEDE 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 [11] :

$$A1 \quad > \quad H = EI/v \text{ (J/mm)} \quad (I.1)$$

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 :

$$H_n = f_1 EI/v \quad (J/mm) \quad (I.2)$$

Avec :

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

## **II -5 les effets du procédé de soudage TIG**

### **II.5-1 .1Effet thermique**

Dans le soudage des pièces métalliques, la liaison atomique réalisée au niveau du joint nécessite l'intervention d'une source d'énergie extérieure qui crée une élévation locale de température dans les pièces. Ces sources sont généralement le siège de phénomènes complexes. Le résultat est la production de la chaleur et son transfert au droit de la soudure.

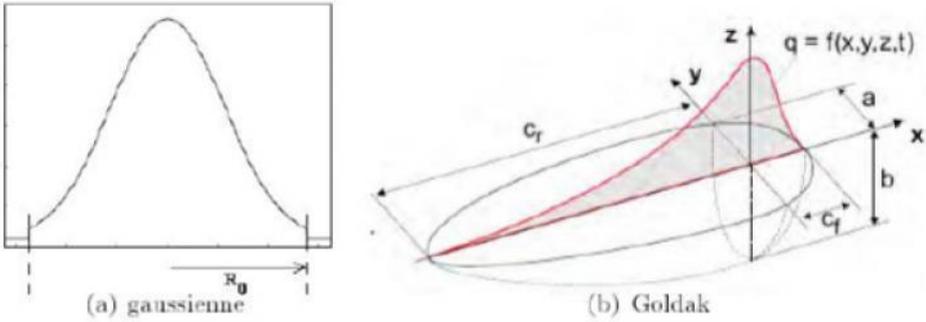


Figure II.6 différentes forme de source de chaleur [20]

Les surfaces isothermes de révolution autour de l'axe de déplacement de la source de chaleur sont très serrées en avant de la source et plus espacées dans la région où la source a déjà passé.

(Figure II.7). Lorsqu'on se rapproche de la source considérée comme ponctuelle, la température de façon très importante.

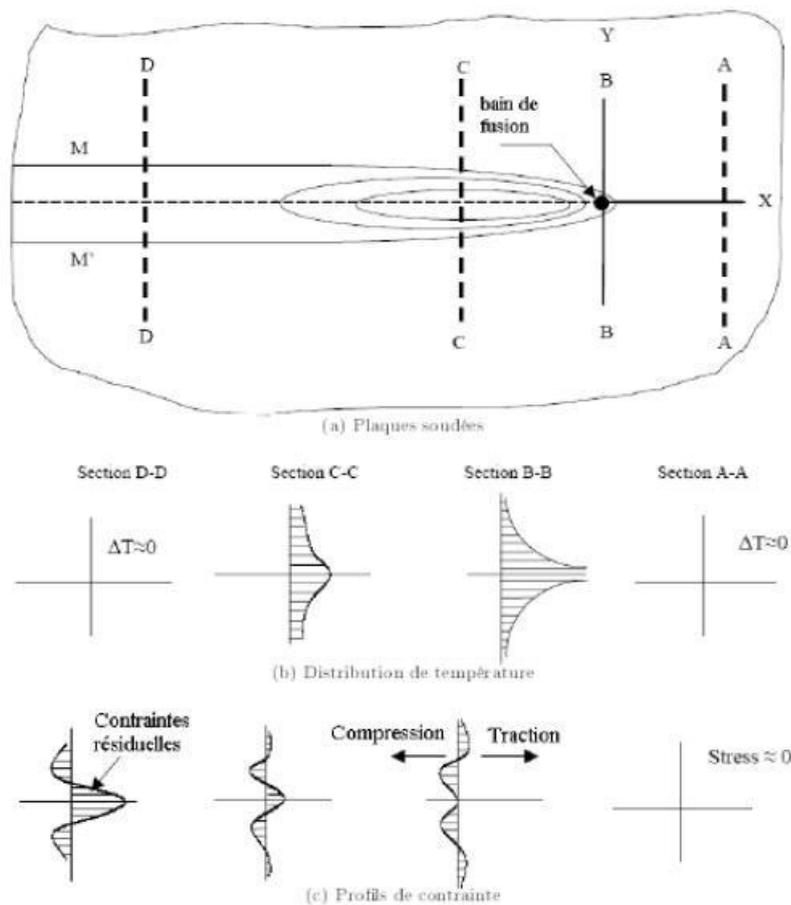


Figure II.7 : répartition des températures et contraintes lors d'un soudage bout à bout [20].

Le cycle thermique  $\theta$  (t) subi par tout point de la Zone Affectée Thermiquement (ZAT) quel que soit le type de procédé de soudage (source fixe ou mobile), comporte typiquement (voir figure II.8) :

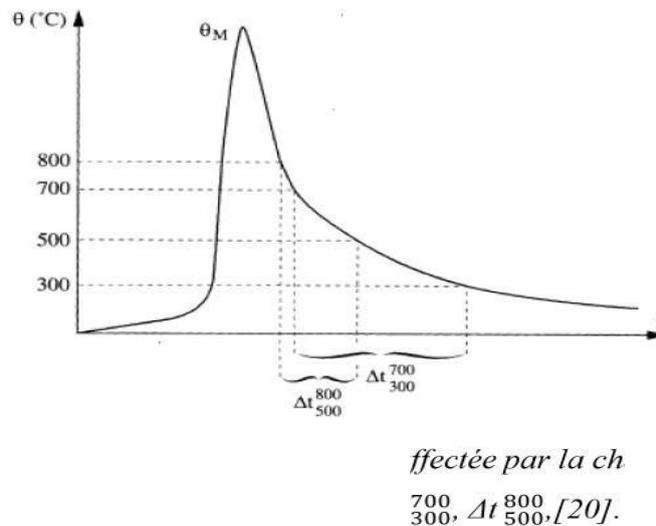


Figure II.8 : aspect de cycle thermique de la zone valeur (schématique) et définition des paramètres  $\Delta t$

- une phase d'échauffement très rapide
- un passage par une température maximale  $\theta_M$ .
- une phase de refroidissement plus ou moins rapide...

Les principaux paramètres caractérisant le régime thermique de soudage peuvent s'exprimer, pour un assemblage et un procédé de soudage donnés, en fonction de la durée de refroidissement entre 800 °C et 500 °C :  $\Delta t$

L'ensemble des phénomènes physiques, métallurgiques ou mécaniques qui se produisent lors de l'exécution d'un joint soudé ou d'un rechargement aussi bien dans la zone fondue que dans l'ensemble de la structure soudée dépendent de la grandeur de l'apport calorifique « Heat

Input »,  $H = P/V$  rapport entre la puissance nette de la source de chaleur et la vitesse  $V$  de soudage.

### II.5.2. Effets mécaniques du régime thermique

La localisation de l'opération de soudage entraîne une répartition thermique non uniforme dans les pièces à assembler. Cette répartition thermique non uniforme entraîne l'apparition de contraintes internes (résiduelles) dans les pièces assemblées et des déformations de celles-ci. Ces contraintes résiduelles et ces déformations peuvent entraîner de sérieux inconvénients lors de la mise en service

## II -6 Les déformations en soudage

Les déformations résultent des déformations des zones du métal de base échauffé par l'opération de soudage. Ces déformations résultant d'une répartition thermique non uniforme seront également variables dans les pièces assemblées comme le montre la figure II.9.

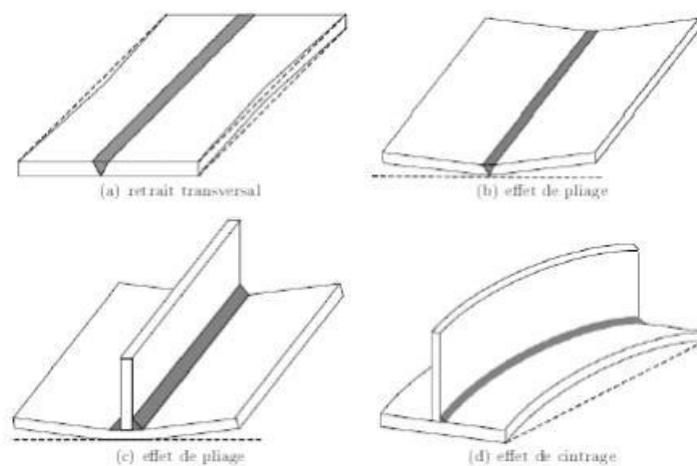


Figure II.9 : différents modes de déformations [20].

### II - 6-1 Les contraintes résiduelles

Les contraintes résiduelles résultent de l'empêchement des déformations ou bridage des zones du métal de base échauffé par l'opération de soudage. Suivant l'origine du bridage on distingue les contraintes résiduelles directes et indirectes. Les parties chaudes sont bridées par les parties restées froides des pièces à assembler.

### II -6-2 Contraintes résiduelles longitudinales

Pendant le refroidissement, la contraction du métal de toute la bande centrale est systématiquement bridée par les zones adjacentes restées plus froides (figII.10). Une

certaine largeur de métal de section  $s$  située de part et d'autre de l'axe du joint est plastifiée en traction à la valeur de la limite d'élasticité  $Re$  du métal. Les zones adjacentes assurant l'équilibre sont sous contraintes de compression. Celles-ci sont d'autant plus faibles que le rapport  $s/(S-s)$  est faible ( $S$  étant la section totale

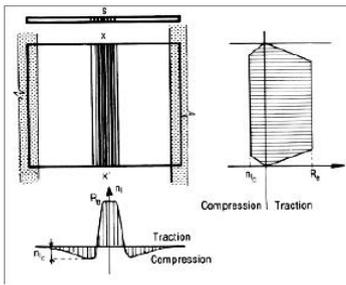


Figure II.9 : répartition des contraintes longitudinales après soudage et refroidissement [20].

Les contraintes et les déformations longitudinales augmentent avec la limite d'élasticité du métal d'apport.

### II -6-3 Contraintes résiduelles transversales

Même dans le cas de simples éléments de tôles soudées bout à bout, il intervient ce qu'on appelle communément l'autobridage, c'est-à-dire le bridage de la soudure par les éléments qu'elle assemble. Du fait que le soudage est exécuté de proche en proche, l'auto bridage n'est pas constant. Il est très faible au début de l'exécution d'une soudure et devient plus sévère à la fin.

En conséquence, les déformations et les contraintes transversales ne sont pas réparties régulièrement (figure II.9) et deviennent plus complexes en s'ajoutant aux contraintes induites (figure II.10).

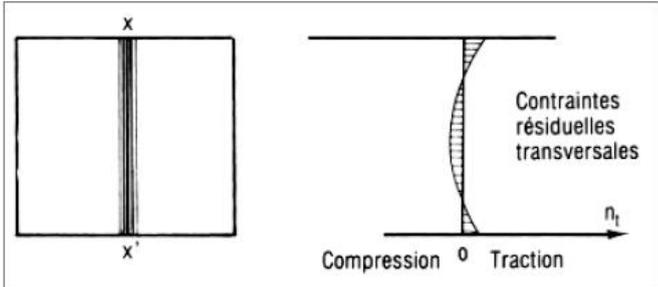


Figure II .11 répartition des contraintes résiduelles transversales résultant d'un auto bridag

## **II -7-/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. [12]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 découle

### **II -7-1/ INTRODUCTION:**

L'Aluminium est utilisé avec succès dans les différents domaines industriels, tels que: bâtiments, travaux publics, aéronautique, automobile, constructions navales, ingénierie mécanique,

montages industriels dans l'industrie chimique et en production d'énergie. Le constructeur a le choix parmi un grand nombre d'alliages, de corps semi-finis et de procédés d'assemblages (par exemple soudure)[13].

Ces alliages d'aluminium sont naturellement bien estimés pour des applications nécessitant des propriétés mécaniques élevées et pour les quelles le prix n'est pas le seul argument déterminant.

Actuellement, les alliages qui possèdent les meilleures caractéristiques mécaniques appartiennent à la série 7000. Les principaux éléments d'addition sont dans ce cas:

- le zinc dont la teneur varie de 4 à 8% massique,
- le magnésium dont la teneur varie de 1 à 3% massique,
- le cuivre.

### **II -7-2/ HISTORIQUE:**

**1854** fut la première apparition de l'aluminium lors d'une présentation à l'Académie des Sciences par le chimiste français Sainte-Claire Deville sous la forme d'un lingot. Ce dernier fut obtenu par voie chimique.

**1886** fut la première invention du procédé d'électrolyse de l'aluminium par Paul Héroult (France) et Charles Martin Hall (USA). Depuis, l'aluminium a connu un développement très important.

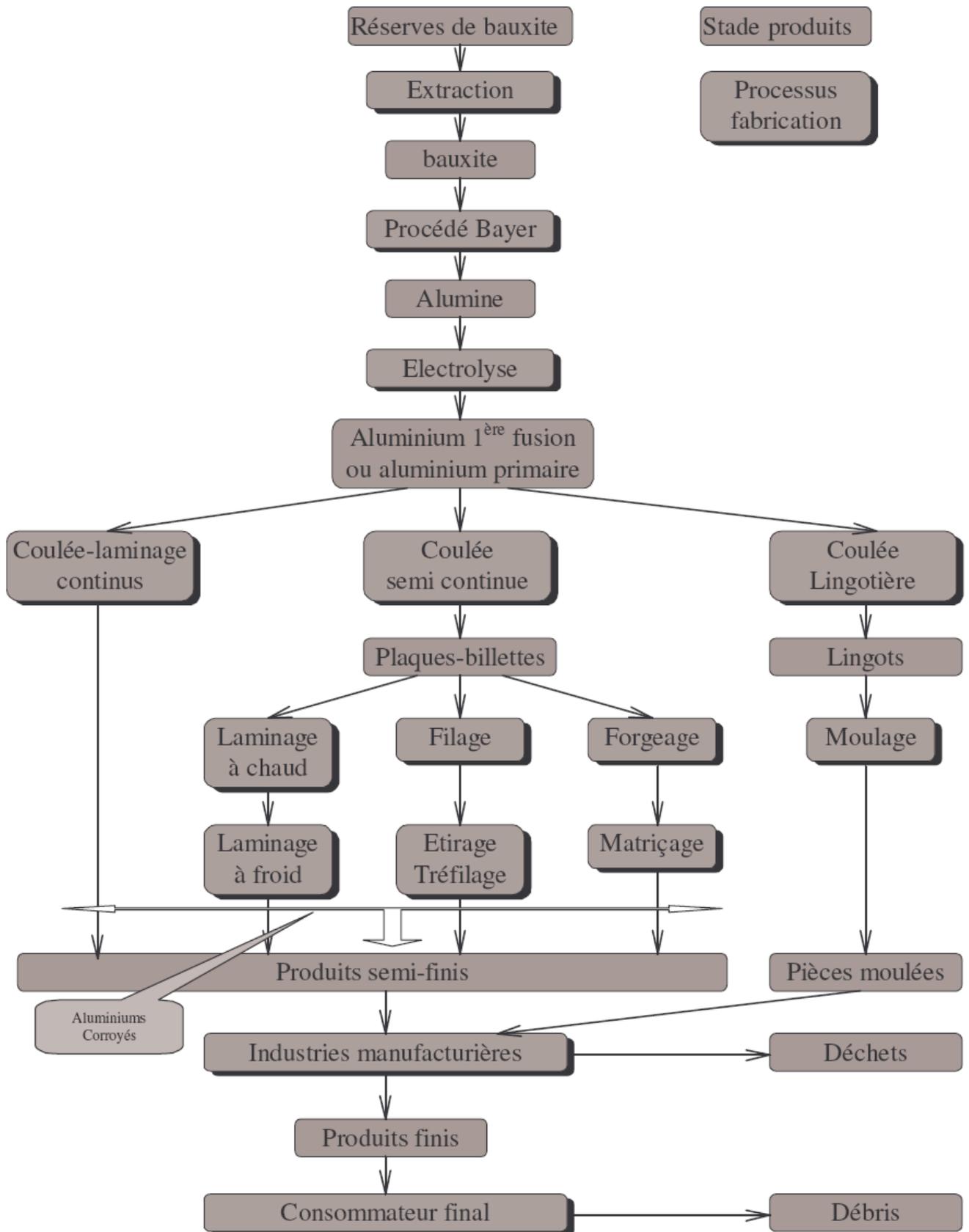
## **II -8 /PRINCIPAUX STADE ET FLUX DANS LA FABRICATION DE L'ALUMINIUM :**

L'Aluminium est un métal très répandu sur la terre, le troisième élément après l'oxygène et le silicium. Les bauxites qui sont des roches riches en aluminium (45 à 60%) constituent actuellement la source quasi exclusive de ce métal.

L'alumine est extraite de la bauxite par le procédé Bayer: la bauxite est broyée puis attaquée à chaud par de la soude. On obtient une liqueur qui après séparation des oxydes de fer et de silicium est envoyée dans des décomposeurs pour précipitation de l'alumine.

L'aluminium est obtenu à partir de l'alumine par électrolyse dans une cuve comportant un garnissage en carbone (cathode). L'aluminium formé par électrolyse se dépose au fond de la cuve.

La figure I.1 suivante représente les principaux stades et flux dans la fabrication de l'Aluminium :



**Figures II .12** Principaux stades et flux dans la fabrication de l'Aluminium

## **II -8-1/ PRINCIPALES CARACTERISTIQUES:**

### **II -8-1-1.A/ CARACTERISTIQUES:**

Grâce à sa masse volumique qui est de  $2700 \text{ Kg/m}^3$ , son utilisation s'impose donc dans les domaines de la construction aéronautique et du transport. Aussi, sa conductivité thermique,  $\lambda$ , est égale à  $222 \text{ W/m.K}$ ,

En solution, l'aluminium se trouve le plus généralement sous la forme d'ions  $\text{Al}^{3+}$ . Il s'oxyde lentement à froid et rapidement à chaud pour former l'alumine  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . L'action des acides sur l'aluminium produit l'ion cité plus haut.

La réaction de Al avec NaOH produit de l'aluminate de sodium  $\text{NaAlO}_2$  et du gaz dihydrogène  $\text{H}_2$ .

Les hydroxydes d'aluminium s'obtiennent en général en précipitant une solution contenant des cations  $\text{Al}^{3+}$  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.

### **II -8-1-2B/ PROPRIÉTÉS :**

Parmi les principales propriétés, on peut citer:

- Température de travail élevée,
- Très bonne résistance à la corrosion,
- Léger,
- Très bonne solidité, dureté et rigidité,
- Bon rapport force/poids,
- Bonnes propriétés de protection contre les interférences électromagnétiques,
- Bonne conductivité thermique,
- Conductivité électrique élevée,
- Bonnes caractéristiques de finition,
- Souder différents alliages.

## **II -9/ 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 [15].

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 .13 :** 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  $2050^{\circ}C$  ( $Al$   $658^{\circ}C$ ),
- Epaisseur de la couche variant de 0,01 mm à 0,1mm,
- 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 ré oxydation du métal fondu.

Lors de l'utilisation d'un métal d'apport, ce dernier doit être d'une pureté élevée et les pièces à souder doivent être nettoyées de toute contamination. L'électrode étant protégée par un nuage de gaz conducteur, l'énergie émise sera distribuée dans le volume du nuage et devient responsable de la faible pénétration du bain fondu. 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. L'argon 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 est présent à 0.93% dans l'atmosphère.

Le choix du métal d'apport est représenté dans le tableau II.3 de l'annexe II.4.

Bien que la plupart des alliages soient soudables sans métal d'apport, celui-ci est pratiquement toujours nécessaire pour avoir une section soudée suffisante, pouvoir combler les retraits, les effondrements et les jeux et prévenir la fissuration à chaud.

D'une manière générale, le soudage de tous les alliages d'aluminium est possible avec un apport Al-Si. En effet, la sensibilité maximale à la fissuration à chaud se situant entre 0.5 et 1% de silicium, les risques sont écartés par les taux de dilution obtenus habituellement en soudage. Ce taux de dilution est défini par le volume de fil d'apport déposé sur le volume total de la zone fondue. Cet avantage est couplé à un faible retrait de solidification qui limite les contraintes dans le cordon et réduit les déformations.

Le type de métal d'apport recommandé pour souder en TIG est sélectionné en fonction de trois critères:

- Les propriétés mécaniques maximales de la zone fondue,
- La résistance à la corrosion,
- La soudabilité opératoire incluant la fissuration à chaud.

Le choix du métal est souvent un compromis entre ces considérations car le soudage ne pose généralement pas de problème de corrosion avec un métal d'apport convenable. On notera toutefois le cas des alliages 7000 soudables corroyés qui ont un mauvais comportement à la corrosion à l'état trempé-mûri. La ZAT de l'alliage d'aluminium 7075 T6 doit pour cela être protégée. Un post revenu améliore sensiblement le problème.

# Chapitre 3 : Les essais mécaniques

### III-1/ GENERALITES:

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.

### III-2/ NOTIONS DE CONCEPTION:

La démarche de projet, (design process), 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.

### **III-3/ ROLE DES TRAITEMENT THERMIQUES DE SURFACES ET LES ESSAIS MECANIQUES:**

Les traitements thermiques de surfaces et 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'utilisation 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 ces essais. Le but étant de caractériser le matériau choisi et éventuellement changer ces mêmes caractéristiques.

Leurs utilisations dépendent du choix du concepteur.

#### **III-3-1/ LES TRAITEMENTS THERMIQUES:**

Les traitements que l'on fait subir aux matériaux métalliques sont choisis en fonction des caractéristiques que l'on désire obtenir: résistance à la corrosion, résistance à l'usure, résistance mécanique (dureté, résilience, résistance à la rupture,...),....

Les principaux traitements permettent d'obtenir des modifications de la structure dans toute la masse de la pièce et de ses caractéristiques mécaniques. Ils sont aussi étroitement liés aux transformations internes qui résultent de l'échauffement du métal à une température supérieure au point de transformation. Les sollicitations imposées à certaines pièces conduisent à employer des matériaux dont les caractéristiques internes et externes sont rendues différentes par des traitements thermiques appropriés (l'extérieur sera dur, l'intérieur moins dur mais résilient,...).

Les principaux traitements sont: la trempe, le revenu, le recuit, la cémentation, la nitruration, la sulfuration et la carbonituration.

### **III-3-2/ LES ESSAIS MECANIQUES:**

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...).

#### **III-3-2 A/ 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.

L'essai de résilience a pour objet de déterminer la résistance des matériaux à la rupture sous l'effet d'un choc par l'intermédiaire de l'énergie de rupture. Bien que la résistance à la rupture se mesure traditionnellement, comme tout le monde le sait, avec un essai de traction classique, la résistance que l'on vise à étudier ici a peu en commun avec la résistance observée dans un essai de traction statique. Dans l'essai de traction la déformation est graduellement imposée à l'éprouvette. La matière a ainsi assez de temps pour réagir et s'adapter au changement. Dans la pratique, une pièce est souvent soumise à des chocs brutaux. Pour cette situation, les valeurs observées dans un essai de traction ne donnent pas toujours satisfaction et peuvent même être trompeuses.

En principe, il serait bien utile de connaître les contraintes critiques qui provoquent la rupture sous l'effet d'un choc. Néanmoins dans la pratique et dans la théorie, le phénomène de la rupture dynamique est très complexe. Même au niveau expérimental, la détermination d'une contrainte critique s'avère déjà extrêmement difficile. Comme la fissuration sous l'effet du choc avance à très grande vitesse et que de ce fait les contraintes montent et descendent presque instantanément, leur mesure exacte n'est pratiquement pas possible. On doit reconnaître que les contraintes du choc se transmettent par une onde acoustique.

**III-4/ PARTIE EXPERIMENTALE:**

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

/	<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)

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

Avec :

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

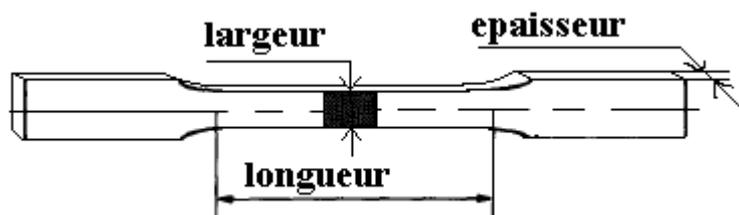
(2) = Tôle laminée état T6, épaisseur entre 3.2 et 6 mm

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

#### II -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). Du fait de Covid-19, notre promoteur nous a transmis le déroulement des expériences ainsi que les résultats. Une machine hydraulique de type Intron à commande électrique a été utilisée. Le pilotage et l'acquisition des données ont été 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 III.1** : Epreuve de l'essai de traction normalisée

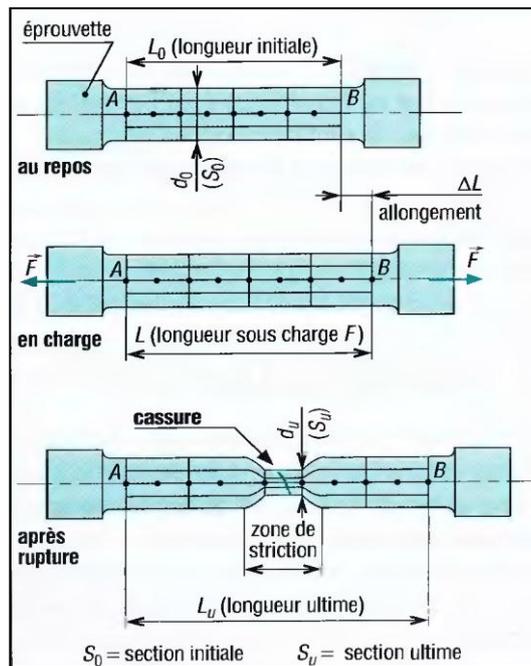
Avec :

Largeur : 19.16 mm

Longueur : 122 mm

Épaisseur : 2 et 2.5 mm

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



**Figure III.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 :

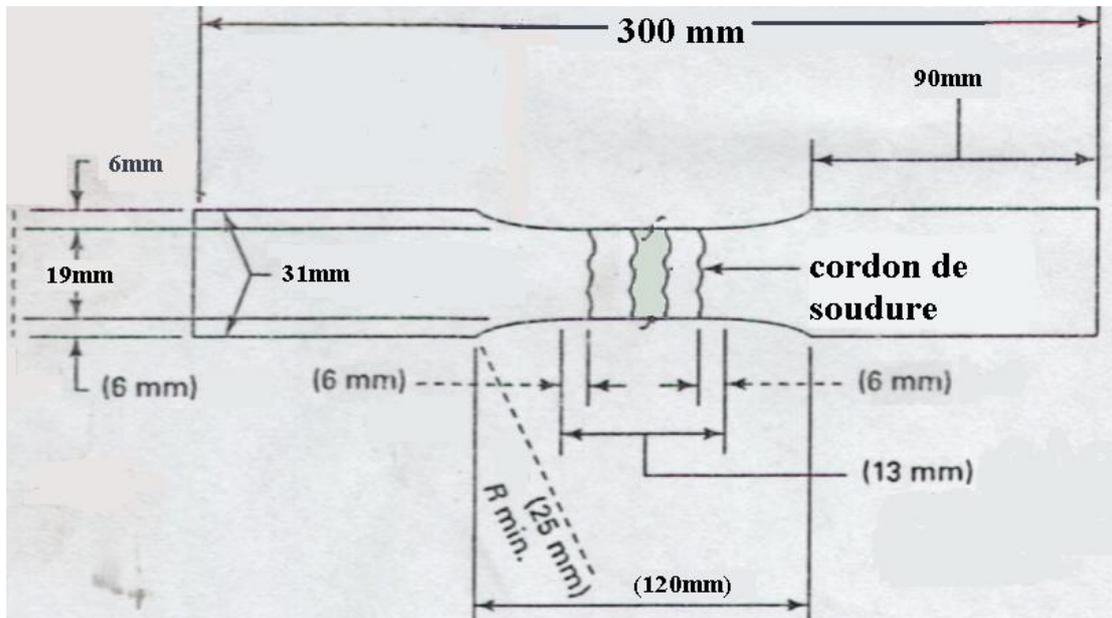


Figure III.3 : Epreuve préparée

Les résultats expérimentaux sont illustrés de la manière suivante :

**1<sup>er</sup> cas :**

Epaisseur = 2 mm

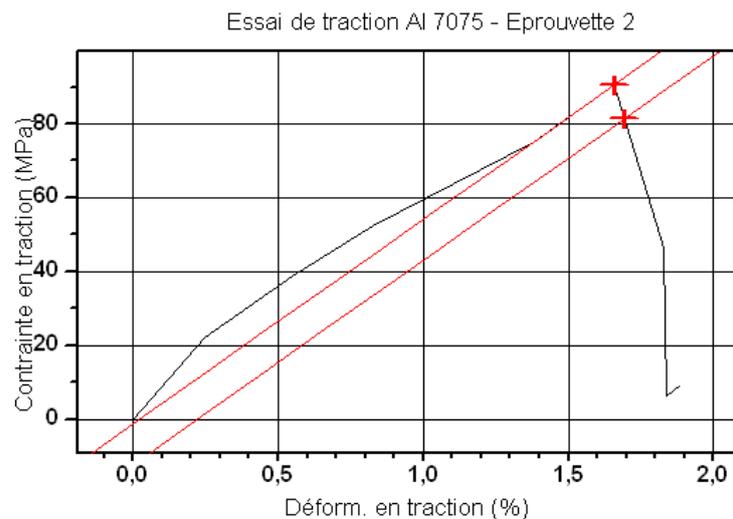


Figure III.4 : Essai de traction sur une éprouvette d'épaisseur de 2 mm

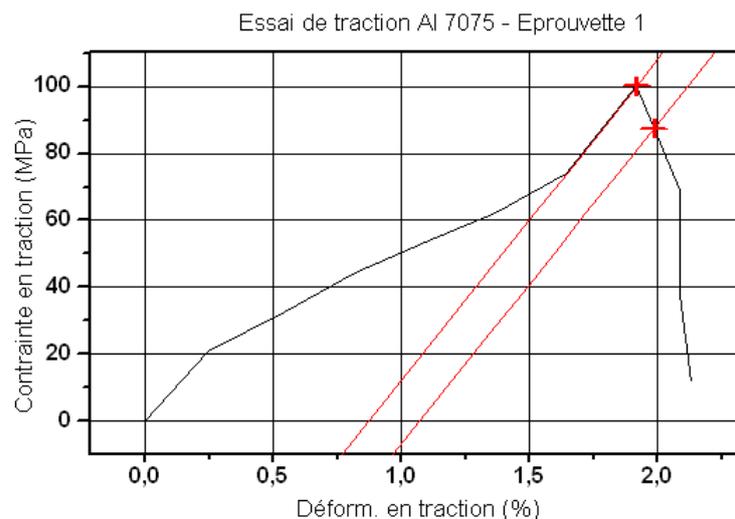
Avec :

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

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

**2<sup>ieme</sup> cas :**

Epaisseur = 2.5 mm



**Figure III.5 :** Essai de traction sur une éprouvette d'épaisseur de 2.5 mm

**III-4-2/ Essai de résilience:**

L'expérience s'est déroulée au niveau du laboratoire des Grands Travaux Pétroliers (GTP) de Reghaia (Wilaya de Boumerdès) sur une machine disposant d'une énergie de 300 Joules, de marque Instron Wolper et de type PW 30.

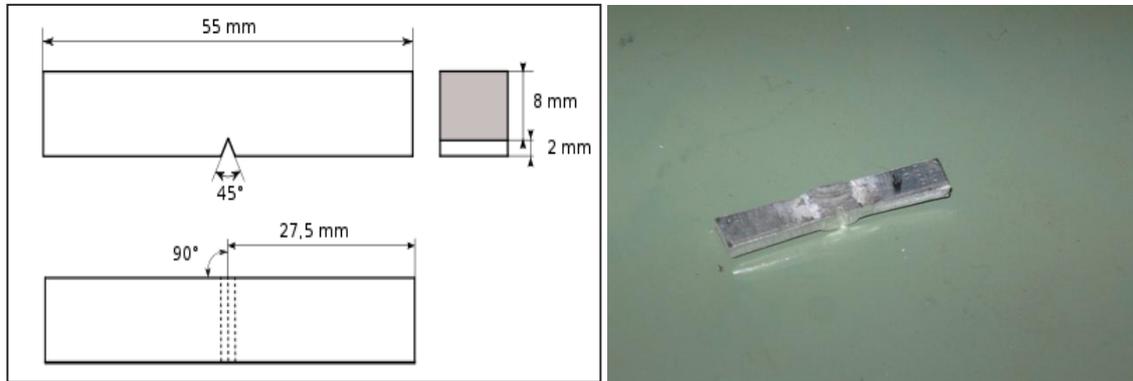
Avant d'entamer l'expérience, des éprouvettes entaillées (forme V) devaient être préparées conformément aux normes.

Aussi, l'entaille a été réalisée selon le type de l'expérience désirée à savoir :

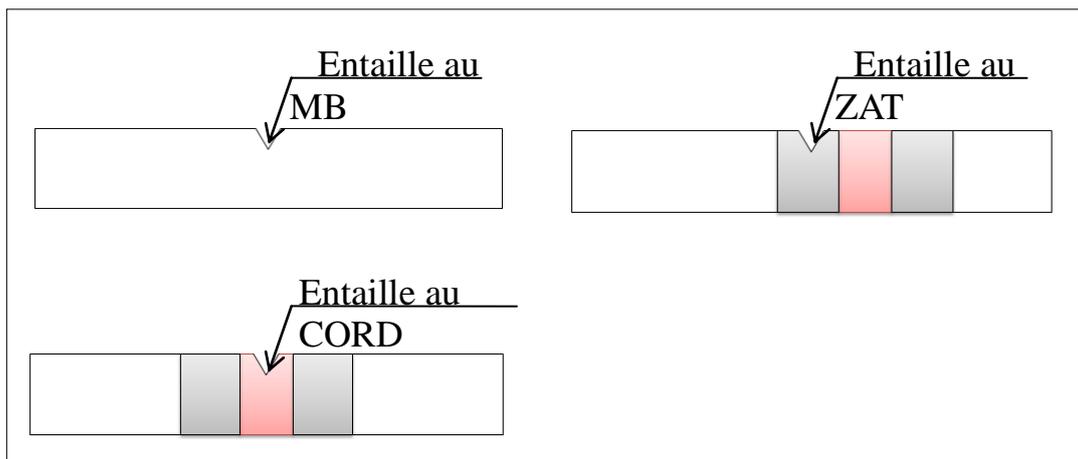
- Métal de base,

- ZAT,
- Cordon.

Celles-ci sont représentées dans la figure



**Figure III.6 :** Eprouvette normalisée



**Figure III.7 :** Emplacement des entailles dans les différentes zones à souder

A travers l'essai de résilience, on mesure les énergies nécessaires à la rupture de notre matériau à l'état non traité et après les différents traitements thermiques. L'influence de la forme de l'entaille sur l'énergie de rupture est très grande.

La résilience est l'énergie nécessaire pour produire la rupture de l'éprouvette, exprimée en joules par centimètre carré.

$$\text{Résilience} = \frac{\text{énergie absorbée par la rupture } W \text{ (Joules)}}{\text{section au droit de l'entaille (cm}^2\text{)}} \quad (\text{II.1})$$

L'énergie cinétique des débris de l'éprouvette étant négligeable après la rupture; le résultat de l'essai de résilience est donnée par l'énergie de rupture.

La résilience  $K_{cv}$  est égale au quotient de l'énergie absorbée au cours de la rupture, en Joules, par l'aire de la section utile, au droit de l'entaille. Sa valeur pratique est toujours exprimée en Joules par  $cm^2$  ( $J/cm^2$ ), ou directement désignée par le symbole  $K$ .

L'expérience s'est déroulée de la manière suivante :

- Epaisseur des échantillons : 2 mm et 2.5 mm,
- Pour chaque épaisseur, l'essai de résilience concernait 03 parties : métal de base, la ZAT et la zone fondue,
- Pour chaque partie, les températures suivantes furent utilisées :

$$T = 0^{\circ}C, 15^{\circ}C, T^{\circ} \text{ ambiante}, 30^{\circ}C, 45^{\circ}C \text{ et } 60^{\circ}C.$$

Les résultats de l'essai de résilience sont représentés dans les tableaux suivants :

**1<sup>er</sup> cas :**

Epaisseur = 2 mm

T°	Joules
0°	2.78
15°	3.23
Ambiante	1.84
30°	4.35
45°	3.39
60°	3.19

**Tableau III.3 :** Résilience pour la zone de métal de base (épaisseur = 2 mm)

T°	Joules
0°	2.39
15°	1.88
Ambiante	1.45
30°	1.72
45°	2.15
60°	1.64

**Tableau III.4 :** Résilience pour la ZAT (épaisseur = 2 mm)

T°	Joules
0°	1.80
15°	2.07
Ambiante	2.98
30°	3.76
45°	2.47
60°	1.45

**Tableau III.5 :** Résilience pour la zone fondue (épaisseur = 2 mm)

**2<sup>ème</sup> cas :** Epaisseur = 2.5 mm

T°	Joules
0°	4.48
15°	4.72
Ambiante	3.23
30°	4.14
45°	3.54
60°	4.95

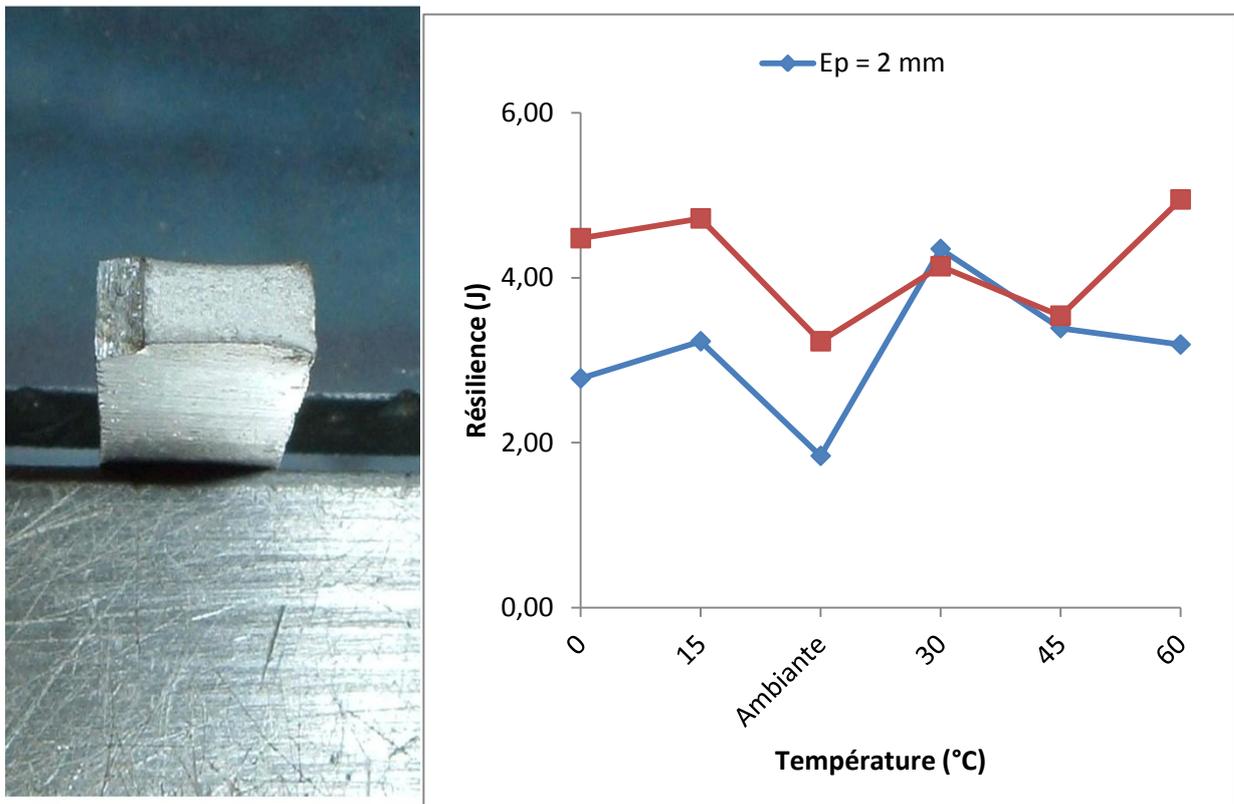
**Tableau III.6 :** Résilience pour la zone de métal de base (épaisseur = 2.5 mm)

T°	Joules
0°	3.80
15°	4.76
Ambiante	4.68
30°	3.66
45°	4.80
60°	4.99

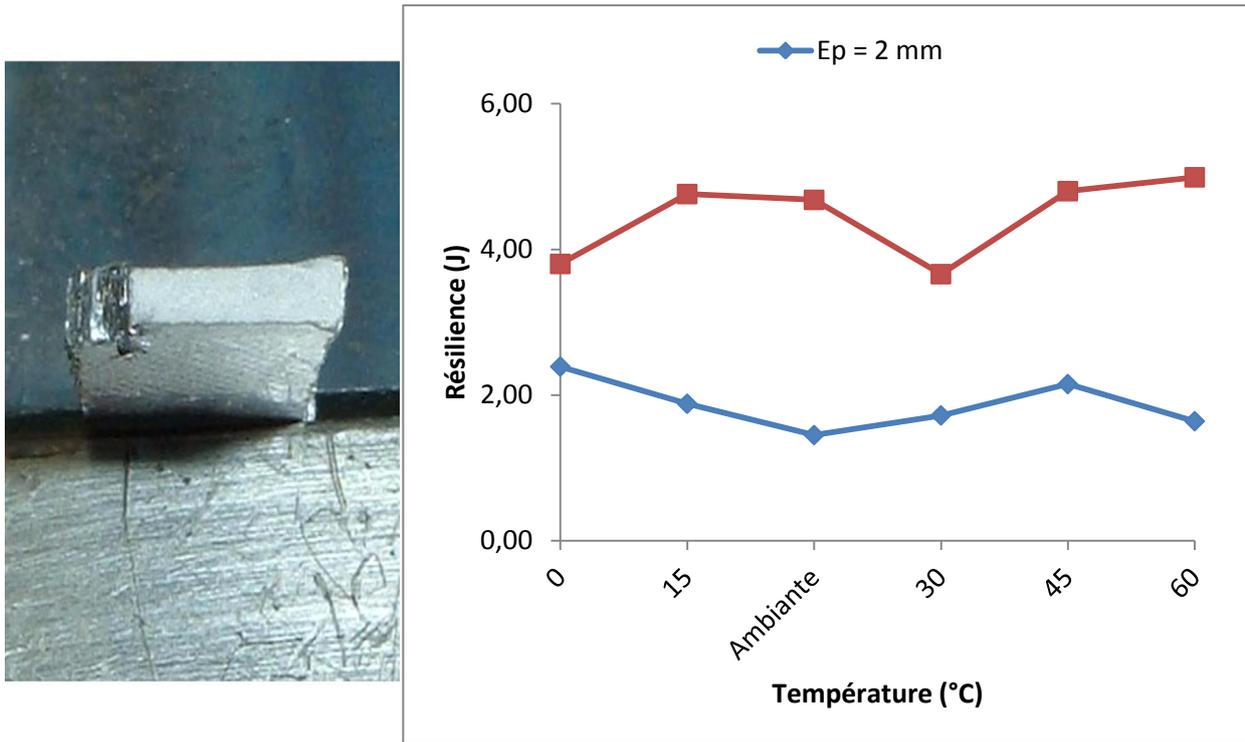
**Tableau III.7 :** Résilience pour la ZAT (épaisseur = 2.5 mm)

T°	Joules
0°	3.52
15°	4.06
Ambiante	3.58
30°	3.44
45°	3.39
60°	4.74

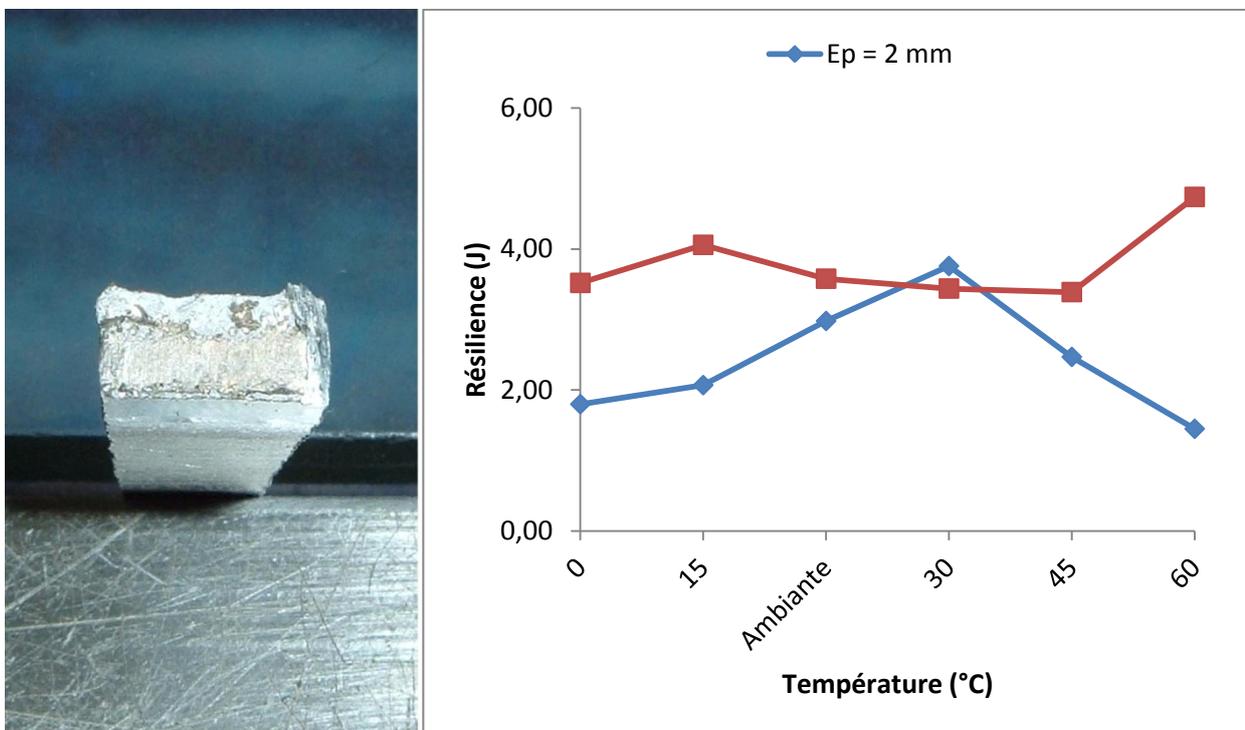
**Tableau III.8 :** Résilience pour la zone fondue (épaisseur = 2.5 mm)



**Figure III.8 :** Photo d'une éprouvette ayant subi un essai de résilience et Variation de la résilience en fonction des différentes températures (Métal de base)



**Figure III.9 :** Photo d'une éprouvette ayant subi un essai de résilience et Variation de la résilience en fonction des différentes températures (ZAT)





# Chapitre IV : Simulation numérique

Des résultats

## IV-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 et de résilience, 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 [14] 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 thermo hydrauliques 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.2/ APPLICATION DE LA METHODE DES PLANS D'EXPERIENCE:

Parmi les méthodes de simulations existantes, nous avons utilisé la méthode des plans d'expérience pour simuler nos résultats expérimentaux. [15]. Cette partie concerne l'essai de résilience.

Les différentes recherches sont toujours amenées à procéder à des essais. Or ces essais sont malheureusement trop souvent conduits sans méthodologie. On obtient toujours des résultats ou il est très rare de bien les exploiter.

### IV-2-1/ DEFINITION:

Parmi les méthodes de simulations existantes, nous avons utilisé la méthode des plans d'expérience pour simuler nos résultats expérimentaux. Cette partie concerne l'essai de résilience.

Les différentes recherches sont toujours amenées à procéder à des essais. Or ces essais sont malheureusement trop souvent conduits sans méthodologie. On obtient toujours des résultats ou il est très rare de bien les exploiter.

A ce titre, la méthode des plans d'expériences permet d'organiser au mieux les essais qui accompagnent des résultats expérimentaux. Ils sont applicables à de nombreuses disciplines et à toutes les industries à partir du moment où l'on recherche le lien qui existe entre une grandeur d'intérêt,  $y$ , et des variables,  $x_i$ . Il faut penser aux plans d'expériences si l'on s'intéresse à une fonction du type :

$$Y = f(x_i)$$

(III.1)

Cette méthode des plans d'expériences permet une interprétation rapide à partir d'un modèle expérimental étudié. Sa compréhension est basée sur :

- espace expérimental,
- modélisation mathématique.

Avec cette méthode, on obtient le maximum de renseignements avec le minimum d'expériences. Pour cela, il faut suivre des règles mathématiques et adopter une démarche rigoureuse. Il existe de nombreux plans d'expériences adaptés à tous les cas rencontrés par un expérimentateur. La compréhension de cette méthode s'appuie sur deux notions essentielles, celle d'espace expérimental et celle de modélisation mathématique des grandeurs étudiées.

Lorsqu'on est intéressé de connaître la dépendance d'une variable de sortie F d'un cas précis, on se trouve confronté à plusieurs difficultés :

- Quels sont les facteurs les plus influents ?
- Existe-t-il des interactions entre les facteurs (corrélations) ?
- Peut-on linéariser le processus en fonction de ces facteurs et le modèle ainsi obtenu est-il prédictif ?
- Comment minimiser le nombre de points de mesure du processus pour obtenir le maximum d'informations ?
- Existe-t-il des biais dans les résultats des mesures ?
- La méthode du plan d'expériences répond donc à ces questions et peut ainsi être appliquée à notre cas.
- Selon notre recherche bibliographique, les plans d'expériences permettant d'obtenir un maximum d'informations en réduisant à un minimum le nombre d'expériences à réaliser [14].
- En appliquant cette méthode, on peut obtenir plusieurs avantages comme par exemple :
  - Efficacité,
  - Exactitude,
  - Analyse des interactions.
- Aussi et avant l'application de cette méthode, l'utilisateur doit toujours au préalable mener une démarche expérimentale et par la suite mettre en application un plan d'expériences afin de répondre au problème posé. L'une des méthodes d'application qu'on peut utiliser est :
  - Définitions des objectifs,
  - Définition des critères,
  - Définition des facteurs de la démarche expérimentale,

- Définir le plan d'expériences,
- Expérimentation et analyse des résultats,
- Acceptation des résultats.

#### IV-2-2/ ESPACE EXPERIMENTAL:

Pour chaque expérience, chaque essai est défini par une grandeur.

Celle-ci est exprimée par la réponse. La valeur de cette grandeur dépend de plusieurs variables. Lors de l'application de la méthode des plans d'expériences, le terme variable est remplacé par le terme facteur.

La figure suivante représente le domaine de variation d'un seul facteur :



**Figure IV.1 :** Domaine de variation d'un seul facteur

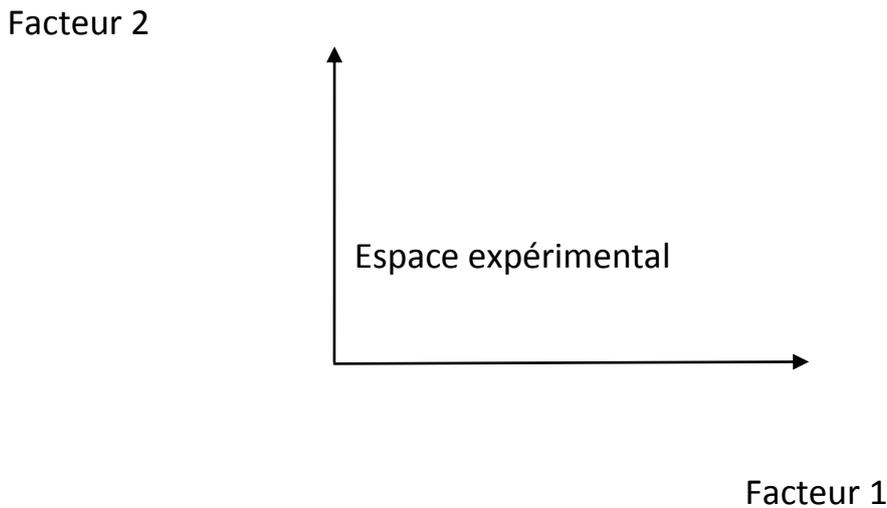
Avec :

-1 : niveau bas

+1 : niveau haut

On appelle domaine du facteur, l'ensemble des valeurs prises par le facteur entre les deux niveaux (niveau bas et niveau haut).

Pour le cas de l'existence de deux facteurs, la représentation est définie dans la figure suivante à savoir par un axe gradué et orienté.

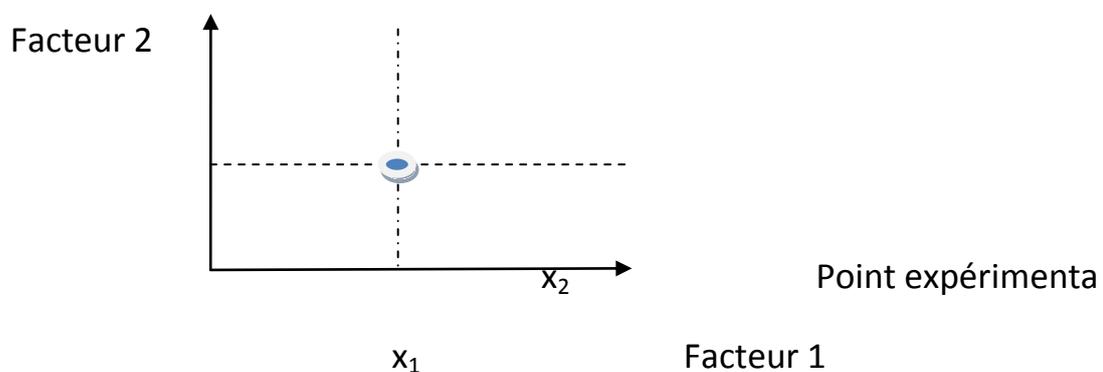


**Figure IV.2 :** Domaine de variation de deux facteurs

De la même manière que l'exemple précédent, on définit pour le premier facteur : le niveau haut, le niveau bas et le domaine de variation. Cet axe est disposé orthogonalement au premier. On obtient ainsi un repère cartésien qui définit un espace euclidien à deux dimensions. Cet espace est appelé : Espace expérimental. [15].

Le niveau  $x_1$  du facteur 1 et le niveau  $x_2$  du facteur 2 peuvent être considérés comme les coordonnées d'un point de cet espace expérimental.

La figure suivante représente les points expérimentaux de l'espace expérimental pour une expérience donnée. Elle est représentée par un point dans ce système d'axes du fait qu'un plan d'expériences est représenté par un ensemble de points expérimentaux.

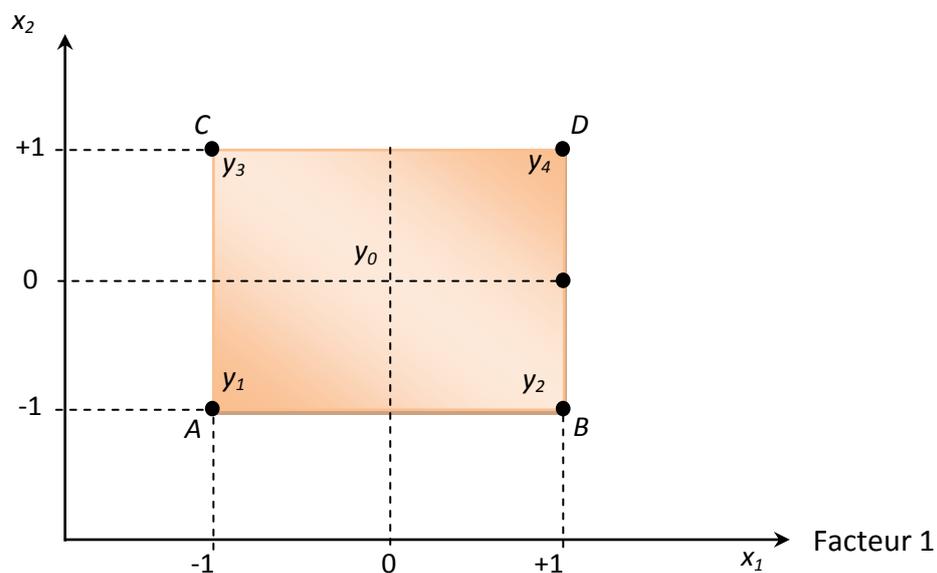


**Figure IV.3 :** Points expérimentaux dans l'espace expérimental.

Le regroupement des domaines des facteurs définit le domaine d'étude. Ce dernier est la zone de l'espace expérimental défini par l'expérimentateur pour faire ses essais.

La figure suivante représente plusieurs expériences bien définies représentées par des points répartis dans le domaine d'étude.

Facteur 2



**Figure IV.4 :** Domaine d'étude pour le cas de 2 facteurs

### IV-2-3/ SURFACE DE REPONSE :

Notre recherche bibliographique nous montre qu'à chaque point du domaine d'étude correspond une réponse.

A l'ensemble de tous les points du domaine d'étude correspond un ensemble de réponses qui se localisent sur une surface appelée la surface de réponse.

Les niveaux  $x_i$  représentent les coordonnées d'un point expérimental et  $y$  est la valeur de la réponse en ce point.

On définit un axe orthogonal à l'espace expérimental et on l'attribue à la réponse.

La représentation géométrique du plan d'expériences et de la réponse nécessite un espace ayant une dimension de plus que l'espace expérimental. Un plan à deux facteurs utilise un espace à trois dimensions pour être représenté : une dimension pour la réponse, deux dimensions pour les facteurs.

Le nombre et l'emplacement des points d'expériences est le problème fondamental des plans d'expériences. On cherche à obtenir la meilleure précision possible sur la surface de réponse tout en limitant le nombre d'expériences.

### IV-3/ MODELISATION MATHÉMATIQUE :

Le principe consiste à planifier des essais en utilisant des tables ayant la propriété d'orthogonalité pour configurer les combinaisons des facteurs à tester[16].

La modélisation par plans d'expériences se fait par modèle mathématique sous forme polynomiale suivante :

$$y_i = a_0 + \sum_{i=1}^k a_i x_i + \sum_{i=1}^k a_{ii} x_i^2 + \sum_{i=1}^{k-1} \sum_{j=j+1}^k a_{ij} x_i x_j \quad (\text{III.2})$$

Avec :

- $a_0, a_i, a_{ij}$  et  $a_{ii}$  : coefficients du modèle de mathématiques
- $x_i$  : niveau attribué au facteur  $i$  par l'expérimentateur pour réaliser un essai
- $y_i$  : la réponse

### IV-4/ APPLICATION DE LA METHODE DES PLANS D'EXPERIENCES :

Le principe consiste à planifier nos essais en utilisant des tables ayant la propriété d'orthogonalité pour configurer les combinaisons des facteurs à tester [16].

La modélisation par plans d'expériences, pour le cas de l'essai de résilience, se fait par modèle mathématique sous forme polynomiale suivante :

$$y_i = a_0 + a_1 x_{i,1} + a_2 x_{i,2} + a_3 x_{i,3} + a_{12} x_{i,1} x_{i,2} + a_{13} x_{i,1} x_{i,3} + a_{23} x_{i,2} x_{i,3} + a_{11} x_{i,1}^2 + a_{22} x_{i,2}^2 + a_{33} x_{i,3}^2 \quad (\text{III.3})$$

Avec :

$x_1$  = Epaisseur de l'éprouvette normalisée,

$x_2$  = Température au moment de l'essai,

$x_3$  = Zone d'impact.

Ceux sont là les 3 paramètres qui agissent sur la réponse "y" c'est-à-dire sur la résilience.

Ainsi et en prenant en considération les paramètres de notre essai de résilience, on obtient :

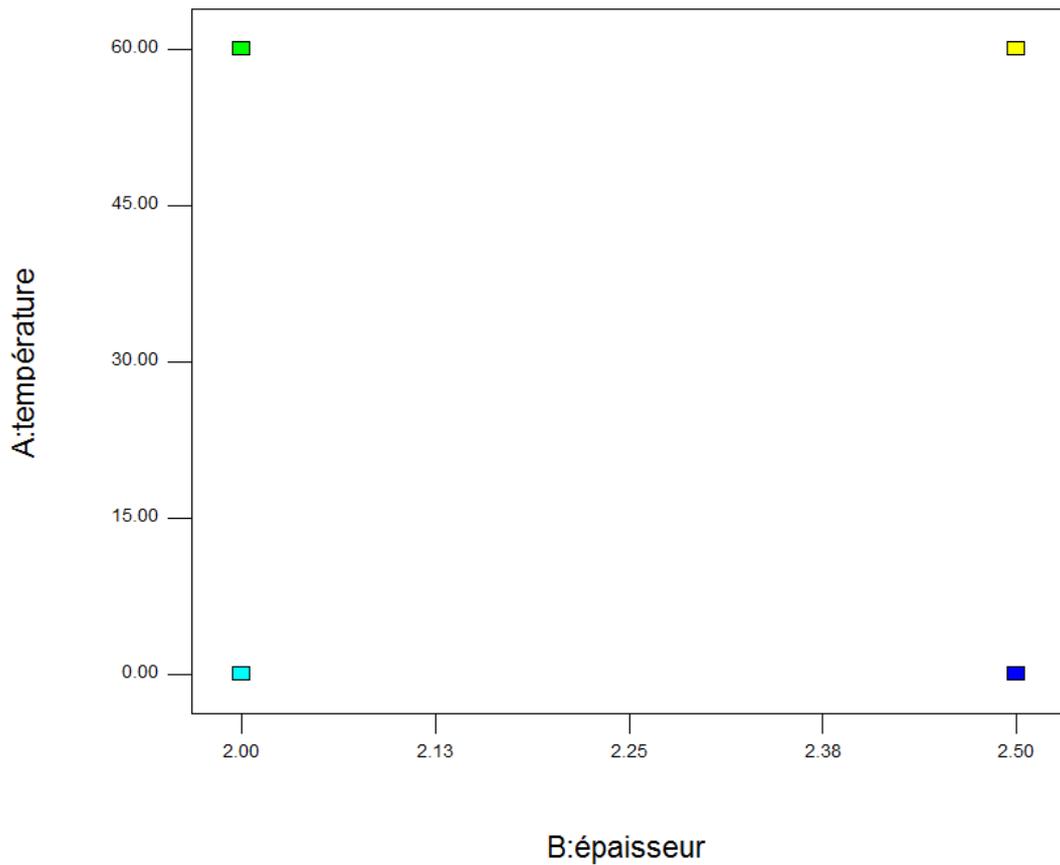
facteur	Unité	maximum	Minimum
Température	Degré Celsius	60	0
épaisseur	Mm	2.5	2

**Tableau IV.1 :** Les 2 facteurs, leurs unités, leurs maximums et leurs minimums

Facteur1 (température)	Facteur2 (épaisseur)	Réponse (énergie) Joule
0	2.5	4.48
0	2	2.78
60	2	3.19
60	2.5	4.95

**Tableau IV.2 :** Les 2 facteurs et leurs réponses

Ce tableau peut être interprété dans la figure suivante :



**Figure IV.5** : Domaine d'étude de la température et de l'épaisseur

Dans cette figure, nous constatons l'existence des niveaux bas et des niveaux hauts.

Les valeurs doivent être comprises entre (-1) et (+1) :

$$x_i = \frac{u_i - \left( \frac{u_{\min i} + u_{\max i}}{2} \right)}{\left( \frac{u_{\max i} - u_{\min i}}{2} \right)} \quad (\text{III.4})$$

Avec :

$x_i$  = Valeur codifiée à trouver,

$u_i$  = Valeur réelle du paramètre,

$u_{\max}$  = Valeur maximale du paramètre,

$u_{\min}$  = Valeur minimale du paramètre.

Ainsi,  $y$  peut être représenté de la manière suivante :

$$Y = a_0 + a_1 x_1 + a_2 x_2 + a_{12} x_1 x_2 \quad (\text{III.5}) \quad (\text{pour un plan factoriel})$$

$a_0$  = la valeur moyenne de l'effet des deux facteurs

$a_1$  = A l'effet de la température

$a_2$  = B l'effet de l'épaisseur

$a_{12}$  = AB l'interaction entre  $a_1$  et  $a_2$

Donc :

Facteur	Coefficient estimé
$a_0$	3,85
$a_1$	0,22
$a_2$	0,87
$a_{12}$	0,015

**Tableau IV.3** : Les facteurs et leurs valeurs

Notre équation devient :

$$Y = a_0 + a_1 x_1 + a_2 x_2 + a_{12} x_1 x_2$$

$$Y = 3,85 + 0,22x_1 + 0,87x_2 + 0,015x_1x_2 \quad (\text{III.6})$$

Les produits respectifs entre ces paramètres représentent respectivement les interactions entre eux.

Cette équation montre la qualité du polynôme à décrire et à s'approcher des valeurs expérimentales, alors que  $a_0$ ,  $a_1$ ,  $a_2$  et  $a_{12}$  montre la faculté du polynôme à donner les valeurs se situant dans la plage expérimentale non effectuées. Les valeurs des coefficients montrent comment agit chaque paramètre sur la résilience " $y$ ". On

remarque que le paramètre le plus prépondérant est l'épaisseur et aussi la variation de cette épaisseur.

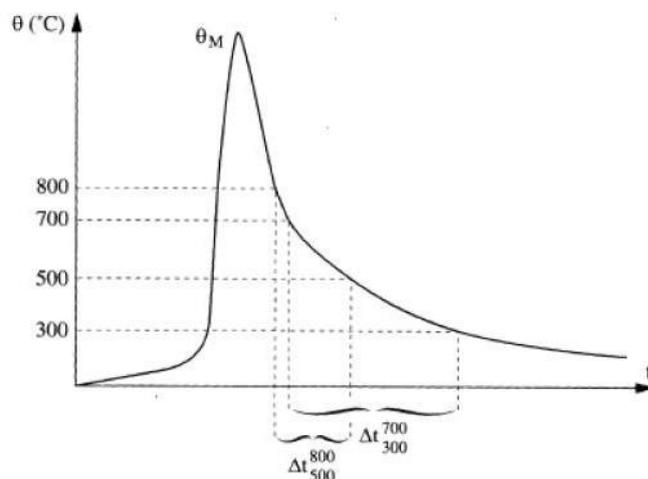
Par contre le paramètre de la zone de contact en passant de 1 vers 3 (il y a 3 zones d'impact) agit négativement : la résilience diminue en passant du métal de base vers la ZAT et puis vers la zone fondue. On peut déduire d'ores et déjà que la zone fondue du point de vue choc dynamique est plus faible que le métal de base et la ZAT.

Pour les interactions, on remarque que lorsqu'on réunit l'action de l'épaisseur et de la zone 3 (zone fondue), la résilience augmente. Ainsi, un classement des coefficients peut être établi tout en sachant que les signes positifs augmentent la résilience et les signes négatifs diminuent la résilience.

La figure suivante montre la déviation de chaque expérience par rapport au modèle mathématique. On remarque, par exemple, que certains points se rapprochent du modèle tandis que d'autres points s'éloignent. Aussi, on peut faire encore ici un classement dans un tableau pour décrire dans l'ordre croissant les écarts des points par rapport au modèle.

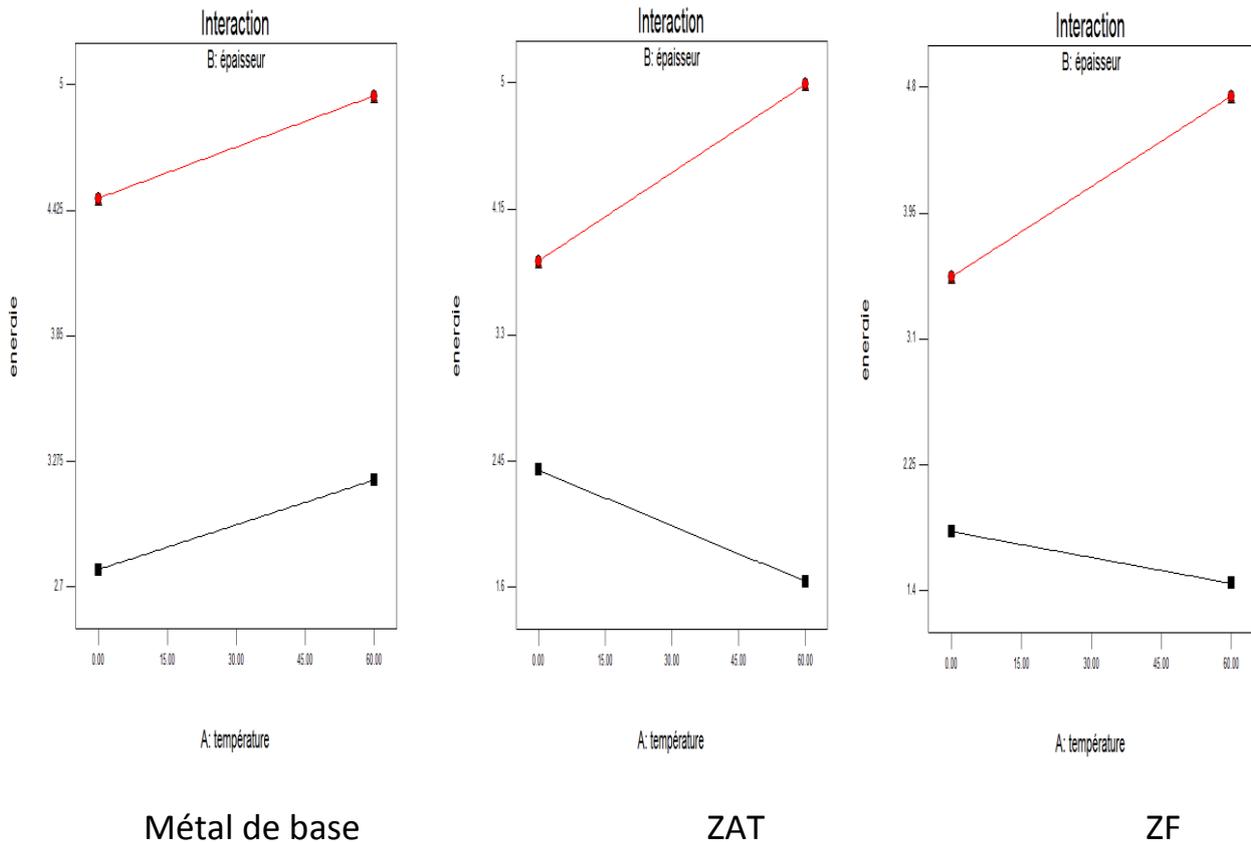
L'action d'un paramètre sur la résilience, lorsque les 2 autres restent constants, se distingue par 3 cas : Minimal (low), moyen (center) et maximal (high).

Un des 3 cas est représenté ci-dessous :



ffectée par la ch

700,  $\Delta t_{500}^{800}$ , [20].



**Figure IV.6** : Cas minimal (low value)

Ces graphes montrent comment agit chaque paramètre sur la résilience lorsque les 2 autres sont maintenus constants (3 premiers : valeurs minimales, 3 seconds : valeurs moyennes, 3 derniers : valeurs maximales).

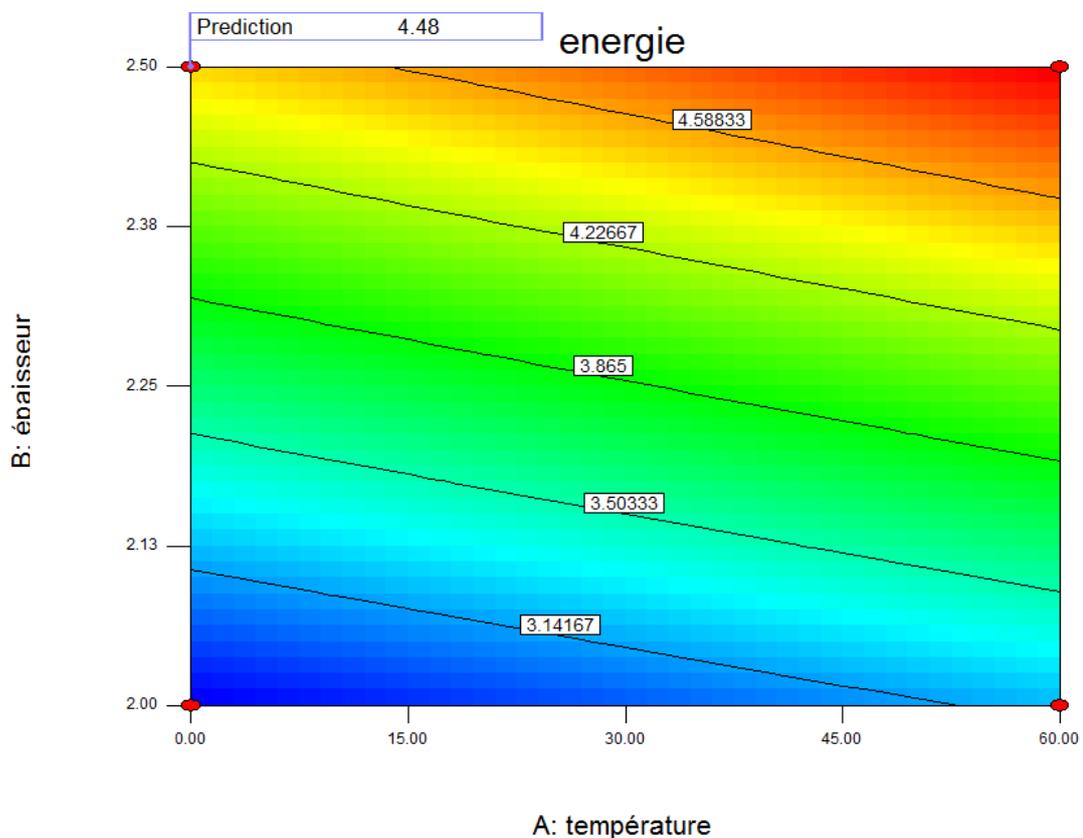
En comparant les graphes, on constate que l'allure et la forme des graphes restent les mêmes ; autrement dit qu'en passant de la valeur minimale à la valeur maximale, l'augmentation de l'épaisseur augmente la résilience et l'augmentation de la température augmente aussi la résilience mais le changement de la zone d'impact de 1 vers 2 puis 3 diminue cette fois-ci la résilience.

On remarque aussi suivant l'inclinaison (coefficient directeur de la droite) que la variation de l'épaisseur agit beaucoup plus que la variation de la température dans l'augmentation de la résilience (Cela est vérifié par les coefficients du polynôme).

En comparant maintenant l'action de l'épaisseur sur la résilience, on constate aisément qu'en prenant les valeurs moyennes des 2 autres paramètres (températures et zones), l'action sur l'augmentation de la résilience est plus visible puis vient en 2<sup>e</sup> position les valeurs maximales puis enfin les valeurs minimales. Il en est de même pour

l'action de la température puisque en prenant les valeurs moyennes de l'épaisseur et de la zone d'impact, on constate que l'augmentation est plus visible dans ce cas que celui de la valeur maximale puis la valeur minimale. En gardant la température et l'épaisseur sur leur valeur moyenne, la diminution de la résilience avec le changement de zone de 1 à 3 est plus prépondérant que les valeurs minimales en 2è position puis les valeurs maximales en 3è position.

L'action simultanée de l'épaisseur de l'éprouvette et de la température sur la résilience du métal de base est comme suit :



**FigureIV.7** : Contours de réponses

Les mêmes constatations sont à faire pour la ZAT puisque l'allure de la surface et des contours est la même. La différence réside sur le fait que pour les mêmes données d'épaisseur et de température, la résilience est plus faible dans la zone affectée thermiquement que dans la zone du métal de base. Les contours sont beaucoup plus

couchés que le métal de base ; c'est ce qui nous pousse à dire que l'influence de l'épaisseur est moindre que dans le 1<sup>er</sup> cas.

De cette partie on peut conclure que :

- L'effet des 3 paramètres en même temps ne peut pas être montré et illustré par un graphique, seule l'équation polynomiale (modèle) peut donner un résultat,
- On peut prédire n'importe quelle valeur de la résilience dans le domaine d'expérience même si les expériences ne sont pas faites.
- Cette partie numérique ne fait que confirmer d'une manière générale, les résultats obtenus lors de nos différentes expériences. De la même manière, les profils de dureté présentent presque des variations identiques. Aussi, et quelle que soit la vitesse de soudage utilisée, l'augmentation de la dureté est régulière surtout à l'approche de la ligne de fusion.

#### **IV-5/ APPLICATION D'UN LOGICIEL DE SIMULATION POUR L'ESSAI DE TRACTION:**

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.

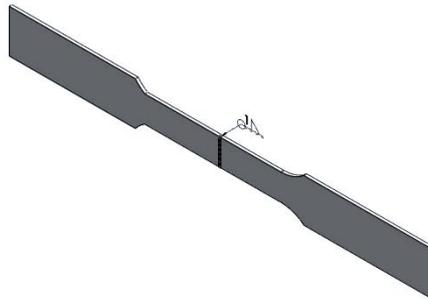
Le logiciel de SolidWorks un ensemble de logiciels de conception mécanique 3D, de simulation, de création d'outillage et de communication de conception. SolidWorks® fait passer de

la 3D au Digital Prototypions, en permettant à l'utilisateur de créer un modèle 3D précis pour concevoir, visualiser et simuler les produits avant leur réalisation.

La partie concernée de cette étude est la simulation de l'essai de traction.

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.



**Figure IV.8:** Eprouvette soudée

Les données à utiliser seront les mêmes appliquées lors de la partie expérimentale.

Le modèle sollicité est représenté dans la figure suivante :



**Figure IV.9:** Machine de traction

Les propriétés du matériau appliquées sont :

résultats

Tableau IV,4 les propriétés du matériau

Nom :	<b>7075-T6, Plaque (SS)</b>
Type de modèle :	<b>Linéaire</b>
Critère de ruine par défaut :	<b>élastique</b>
Limite d'élasticité :	<b>isotropique</b>
Module d'élasticité :	<b>ue</b>
Coefficient de Poisson	<b>Inconnu</b>
<b>Masse volumique:</b>	<b>5.05e+00</b>
<b>Module de cisaillement:</b>	<b>8 N/m<sup>2</sup></b>
<b>Coefficient de dilatation thermique :</b>	<b>5.7e+008</b>
	<b>N/m<sup>2</sup></b>
	<b>0.33</b>
	<b>2810</b>
	<b>kg/m<sup>3</sup></b>
	<b>2.69e+01</b>
	<b>0 N/m<sup>2</sup></b>
	<b>2.4e-005</b>
	<b>/Kelvin</b>

tableau IV,5

information sur le maillage :

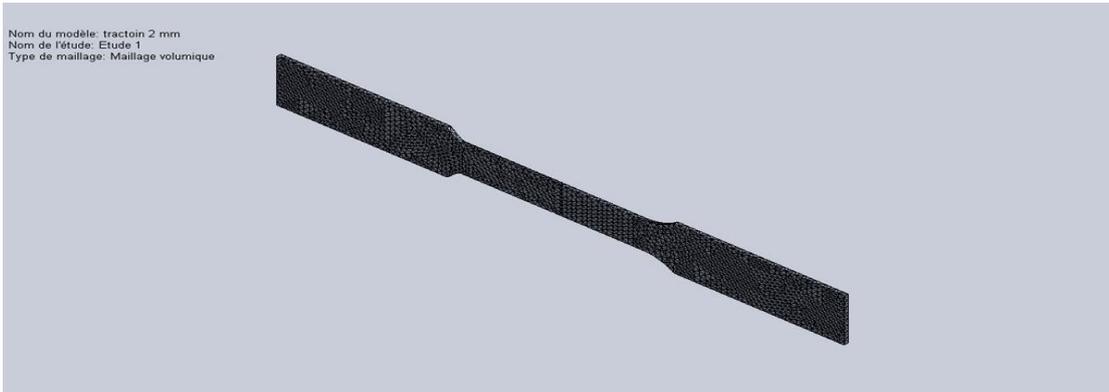
Type de maillage	Maillage volumique
Mailleur utilisé:	Maillage basé sur la courbure
Points de Jacobien	4 Points
Taille d'élément maximum	2.63852 mm
Taille d'élément minimum	2.63852 mm
Qualité de maillage	Haute
Remailler les pièces en échec avec un maillage incompatible	Désactivé(e)

tableau IV,6

Les détails du maillage sont :

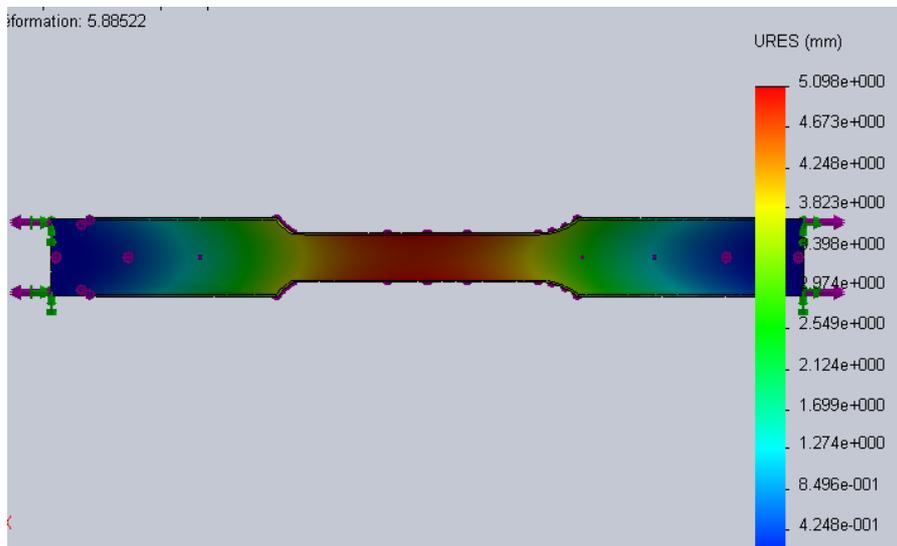
Nombre total de noeuds	19197
------------------------	-------

Nombre total d'éléments	9689
Aspect ratio maximum	5.8004
% d'éléments ayant un aspect ratio < 3	98.7
% d'éléments ayant un aspect ratio > 10	0
% d'éléments distordus (Jacobien)	0

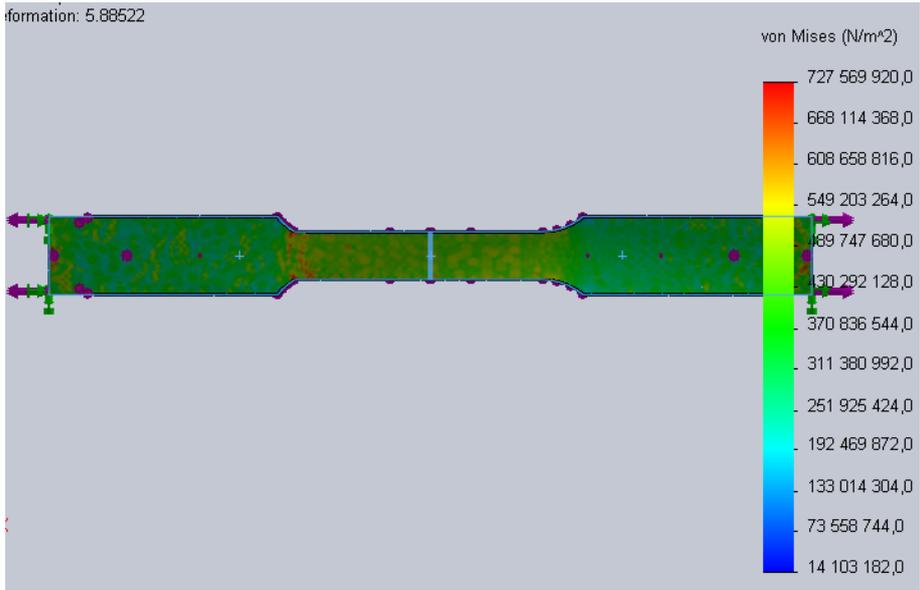


**Figure IV.10:** Représentation du maillage

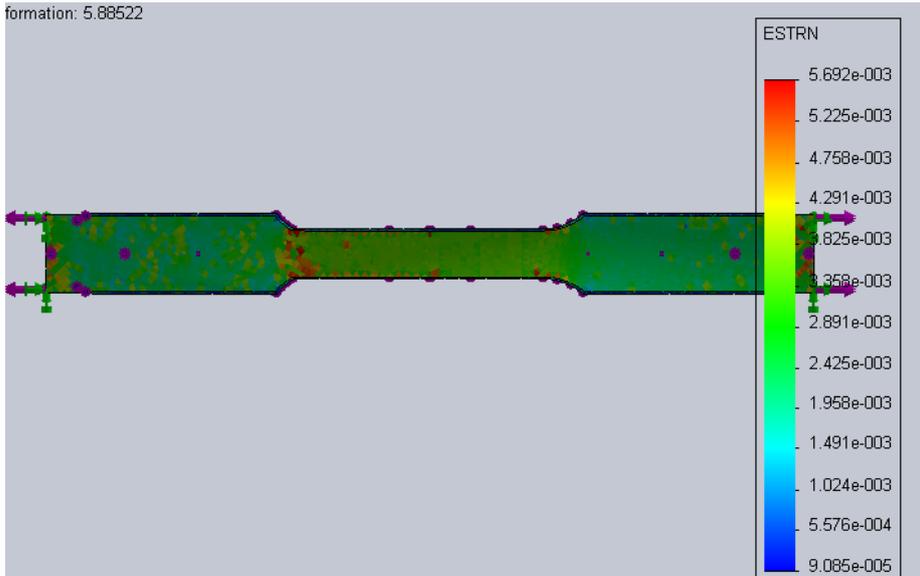
les résultats sont représentés dans les figures suivantes :



**Figure IV.11:** Déplacement



**Figure IV.12 :** Contrainte



**Figure IV.13:** Déformation

**comparaison :**

**Pour l'essai de traction :**

Nous pouvons constater qu'en augmentant la charge, les phénomènes de l'essai de traction apparaissent à savoir : l'élasticité, la plasticité et la rupture.

Comme le montre les figures, la rupture peut être produite au niveau du cordon de soudure (représentée par la couleur rouge dans les figures). Par exemple, et pour le cas du déplacement, le déplacement atteint le maximum et ceci est représenté par la couleur rouge.

Ainsi, et en appliquant les mêmes contraintes que celles appliquées dans la partie expérimentale, nous constatons une légère différence dans les deux résultats. Le tableau suivant représente les résultats expérimentaux pour notre échantillon d'épaisseur = 2 mm.

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

Tableau IV,7 résultat expérimentaux d'épaisseur=2mm

Cette différence est peut être due à :

- Le logiciel est plus précis,
- Lors de la simulation, nous avons pris un module de Young constant,
- Les deux conditions de travail (expérience et simulation) sont différentes dont la partie expérimentale est moins précise. Lors de l'expérience, il se peut que l'échantillon ait été mal préparé.

Le programme total du logiciel est représenté dans l'annexe.

**Pour l'essai de résilience :**

On a obtenu les résultats suivants pour respectivement la partie expérimentale et la partie de modélisation

Pour une épaisseur 2.5 mm et pour des températures de 15° C, ambiante et 30°C, on a la résilience suivante :

Partie expérimentale	Partie modélisation
	4.58833
4.72	4.22667
3.23	3.86500
4.14	3.50333
	3.14167

Tableau IV,8 les résultats

La partie modélisation montre bien (Figure IV.13) que le pas entre les différentes réponses est petit : 4.58833, 4.22667, 3.86500, 3.50333 et 3.14167. Ce qui confirme que l'essai de résilience s'est bien déroulé.

La résilience dont l'énergie nécessaire est exprimée en joules par centimètre carré a montré que le cordon de soudure représente de bonnes caractéristiques mécaniques. Aussi, cela montre le procédé de soudage TIG s'est bien déroulé malgré les différentes contraintes (selon notre recherche bibliographique, l'alliage d'aluminium 7075 T6 est difficile à souder).

## Conclusion générale

Ce travail effectué complète les travaux déjà faits sur certains points bien précis traités par des études concernant le soudage des alliages d'aluminium 7075 T6 du fait qu'en pratique, il est difficile de souder ces alliages et surtout par le procédé de soudage TIG.

A travers cette étude, nous avons utilisées des essais mécaniques tels que l'essai de résilience et de traction pour caractériser notre matériau.

Par la suite, et ayant pris connaissance au travers des chapitres précédents des différents phénomènes liés au procédé de soudage TIG ainsi que les conséquences thermiques, métallurgiques et mécaniques sur notre matériau à savoir l'alliage d'aluminium 7075 T6, nous nous sommes intéressés 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.

Les résultats obtenus ainsi que l'application de la méthode des plans d'expériences dans ce domaine nous a permis de déduire que :

- Les essais réalisés se sont bien déroulés du fait que lors de l'essai de traction, la rupture s'est faite au niveau du cordon de soudure ce qui prouve que le procédé de soudage TIG s'est bien déroulé,
- La partie numérique appliquée à l'essai de résilience ne fait que confirmer d'une manière générale.
- Conformément à la recherche bibliographique, le procédé de soudage TIG offre plus d'avantage et moins d'inconvénients que les autres assemblages (rivetage et boulonnage). C'est dans ce cas que le procédé de soudage TIG pourrait être une technique d'assemblage concurrente.

## Références

- A.Deschamps, Thèse de doctorat, Influence de la prédéformation et des traitements thermiques sur la microstructure et les propriétés mécaniques des alliages Al-Zn-Mg-Cu, 1997
- K.Wilfried, Introduction à la science des matériaux, 2<sup>ème</sup> édition presses polytechniques et universitaires romandes, 1991
- B.Dubost and P.Sainfort, Techniques de l'Ingénieur, 1991
- Bertaux, Les assemblages mécaniques structuraux en aéronautique civile, fixations et procédés d'assemblages, Compte rendu de conférence Mecamat, Aussois, 20-24 Janvier, 2003
- J.L.Fanchon, Guide de mécanique, Sciences et technologie industrielles, Edition Nathan, Paris, 2008
- A.Dhooge, Techniques d'assemblage : le soudage ; Métallerie 65, spécial soudage, avril 2004
- Rocardier, Cours technologie, Cours de soudure TIG, 2009
- CETIM, Mécanosoudage, ISBN 2-85400-146-X, 1989.
- R.Blondeau, Procédés et application industrielle du soudage, Hermès science publication, 66.+Paris, 2001
- Rocardier, Cours de soudure TIG, cours technologie, 2009
- B.Paul and Dickerson, Welding of aluminum, aluminum company of America, ASM Handbook Volume 6, Welding, Brazing, and Soldering (ASM International), 1993
- G.A.Taylor, M.Hughes, N.Strusevich and K.Pericleous, Finite volume methods applied to the computational modelling of welding phenomena, Applied mathematical modelling, vol 26, pp 309-320, 2002
- M.G.Vigier, Pratique des plans d'expérience, les éditions d'organisation, pp 190, 1988

- Jacques Goupy, Plans d'expériences pour surfaces de réponse, Edition Dunod, 2001