

008/2006
(EX 04)
المكتبة

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE POPULAIRE
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE DE BLIDA

Institut d'aéronautique



MEMOIRE DE FIN D'ETUDE

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

OPTION : PROPULSION

THEME

**ETUDE ET CARACTERISATION EXPERIMENTALE DES
ALLIAGES D' ALLUMINIUM AERONAUTIQUE (SERIE
2024 ET 7075) SOUDES PAR LE PROCEDE TIG.**

➤ *Proposé et dirigé par: Mr : AISSANI Mouloud*

➤ *Réalisé par:*

- ↓ *BELDJILALI Ibrahim*
- ↓ *BENNOUI Farid*

PROMOTION :(2005-2006)

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ

الرَّحِيمِ

DEDICACES

Je dédie ce modeste travail :

A mes très chers parents qui m'ont encouragé le long de mes études et soutenu par leur amour et leur tendresse.

A mes frères.

A mes sœurs.

Et a toutes la famille BELDJILALI.

A MON binôme Farid.

A tous mes fidèles amis.

A tous ce que j'ai connu, et qui me mon soutenus et que me sont chers.

B. IBRAHIM

Je dédie ce modeste travail :

A ma Très chère mère.

A mon très cher père.

A mes frères.

A ma sœur.

Et a toutes la famille BENNOUI

A MON cher binôme IBRAHIM

A tous mes fidèles amis.

A tous ce que j'ai connu, et qui me mon soutenus et que me sont chers.

B. FARID

REMERCIEMENTS

*Ce travail a été effectué au centre de recherche scientifique et technique en soudage et contrôle de Chéraga, sous la direction de notre promoteur M_r: **AISSANI Mouloud** chercheur au C.S.C, qui nous tenons à exprimer notre profonde reconnaissance, pour l'attention et l'aide permanente qu'il a manifesté et pour la confiance qu'il a fait preuve à notre égard.*

*Notre profond respect et remerciements aux personnel de laboratoire de métallurgie de C.S.C surtout à M_r: **BETTAHAR K-E**.*

*Notre profond respect et remerciements aux personnel de L' E.R.M.A surtout à M_r: **AJROUM HMIDA**.*

Nous adressons, également nos sincères remerciements à tous ceux qui nous ont aidé de près ou de loin.

Enfin, nous présentons notre remerciement les plus distingués et nos salutations les plus chaleureuses à l'ensemble des enseignants de l'I.A.B, spécialement à ceux qui ont acceptés d'être membres de juré.

SOMMAIRE

RESUME
REMERCIEMENTS
DEDICACES
LISTE DES FIGURES

INTRODUCTION GENERALE.....1-2

CHAPITRE I : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

I-1/GENERALITES SUR LES ASSEMBLAGES	3
I-1-1/INTRODUCTION.....	3
I-1-2/DIFFERENTS PROCEDES D'ASSEMBLAGES	3
I-1-2-1/ INTRODUCTION.....	3
I-1-2-2/RIVETS, VIS ET BOULONS.....	3
I-1-2-3/LE COLLAGE	4
I-1-3-LE SOUDAGE	5
I-1-3-1 / DEFINITION DE SOUDAGE.....	5
I-1-3-2/ PROCEDES DE SOUDAGE.....	6
I-1-3-3/ SOUDAGE A L'ARC	8
I-1-3-3-1/ INTRODUCTION.....	8
I-1-3-3-2/ DEFINITION	8
I-1-3-3-3/PRINCIPE.....	8
I-1-3-3-4/ DESCRIPTION DU PHENOMENE DE L'ARC.....	8
I-1-3-3-5/CARACTERISTIQUES PRINCIPALES DE L'ARC ELECTRIQUE.....	10
I-1-3-3-6/LES PRINCIPAUX PROCEDES DE L'ARC.....	10
I-1-3-3-6-1/ SOUDAGE A L'ARC AVEC ELECTRODE ENROBEE.....	11
I-1-3-3-6-2/ LE PROCEDE M.I.G/M.A.G.....	11
I-1-3-3-6-3/ SOUDAGE AU PLASMA	13
I-1-3-3-6-4/ SOUDAGE PAR RESISTANCE ELECTRIQUE.....	15
a) Soudage Par Point.....	15
b) Soudage A la Molette.....	15
c) Soudage Par Brassages.....	15
d) Soudage En Bout.....	15
I-1-3-3-6-5/ SOUDAGE A ELECTRODE REFRACTAIRE T.I.G.....	15
a) Principe.....	16
b) Électrodes utilisées	17
c) Généralités de courant de soudage.....	18
I-1-3-3-6-6/ PROPRIETES ENERGETIQUES DE L'ARC.....	21
A) ENERGIE NOMINALE.....	21
B) ENERGIE DISSIPEE DANS LE JOINT SOUDE.....	21
C) LE RENDEMENT DE L'ARC.....	21
D) TEMPERATURES DANS LA COLONNE D'ARC.....	22
E) LES CYCLES THERMIQUES DU SOUDAGE.....	22

b) CARACTERES GENERAUX DU CYCLE THERMIQUE ET DE REPARTITION...22

1-3-4/QUELQUES APPLICATIONS DE SOUDAGE EN AERONAUTIQUE	25
1-2/L'ALUMINIUM ET SES ALLIAGES	27
1-2-1/PRINCIPALES CARACTERISTIQUES DE L'ALUMINIUM.....	27
1-2-2/ETATS METALLURGIQUES	28
1-2-2-1/ <i>Traitement thermique</i>	28
1-2-3/ALLIAGES CORROYES.....	32
1-2-3-1/ <i>Désignations des alliage</i>	32
1-2-3-2/ <i>Alliages sans durcissement structural</i>	32
1-2-3-3 <i>Alliages à durcissement structural</i>	34
1-2.4 ALLIAGES DE FONDERIE	35

CHAPITRE II : *TECHNIQUES EXPERIMENTALES*

II-1/INTRODUCTION	37
II-2/CARACTERISTIQUES DU METAL DE BASE	37
II-2-1/METAL DE BASE	37
II-2-1-2/ <i>PROPRIETES MECANIQUES</i>	38
II-2-1-3/ <i>PROPRIETES PHYSIQUE</i>	38
II-3/L'OPERATION DE SOUDAGE.....	38
II-3-1/DESCRIPTION DU MATERIEL UTILISEE	38
II-3-1-1/ <i>Machine TIG</i>	38
II-3-1-1-1/Description	39
II-3-1-1-2/Avantages	39
II-3-1-1-3/ Electrodes utilisées.....	39
II-3-1-1-4/Gaz de soudage.....	39
II-3-1-1-5/Défauts rencontrés.....	39
II-3-1-1-6/Choix des paramètres de soudage	40
II-4/CARACTERISATION DE SOUDAGE	40
II-4-1/ CARACTERISATION THERMIQUE	40
II-4-1-1/Implantation des thermocouples	41
II-4-1-2/Représentation de positionnement des thermocouples	41
II-4-2/ CARACTERISATION METALLOGRAPHIQUE	45
II-4-2-1/ <i>caractérisation non destructifs</i>	45
A-Contrôle radiographique.....	45
B. méthodes d'examen métallographiques.....	46
a) macrographie.....	46
b) <i>Micrographie</i>	48
II-4-3/CARACTERISATION MECANIQUE	49
II-4-3-1/ESSAI DE MICRODURETE.....	49
B) <i>Mesure de la dureté en zone affectée thermiquement(ZAT)</i>	49
C) <i>Choix de la méthode de mesure de dureté</i>	49
D) <i>Choix de la charge</i>	50
E) <i>Domaine d'application</i>	50
➤ ESSAIS VICKERS	50
II-4-3-2/ESSAI DE TRACTION.....	51
II-4-3-2-1/ <i>Définition</i>	51
II-4-3-2-2/ <i>Détermination après essai</i>	51
II-4-3-2-3/ <i>Principe</i>	52
II-4-3-2-4/ <i>TYPES D'EPROUVETTES DANS LE CAS DE MINCES</i>	56
II-4-3-2-4-1/ <i>PREPARATION DES EPROUVETTES</i>	57

CHAPITRE III : RESULTATS ET INTERPRETATIONS :

III-1/INTRODUCTION	58
III-2/ IDENTIFICATION DES MATERIAUX	58
ANALYSE DE LA COMPOSITION CHIMIQUE.....	58
III-3/CYCLES THERMIQUES.....	58
III-4/CONTROLE RADIOGRAPHIQUE.....	61
III-5/CARACTERISATION METALLOGRAPHIQUE	63
III-5-1/ANALYSE MACROGRAPHIQUE.....	63
III-5-2/ANALYSE MICROGRAPHIQUE	64
III-5-2-1/Détermination des dimensions expérimentale de la ZAT et ZF.....	68
📌 <i>Interprétation de l'analyse métallographique et radiographique</i>	69
III-6/CARACTERISATION MECANIQUE	69
III-6-1/Essais de micro dureté	69
📌 <i>Constations graphiques</i>	70
III-6-2-Interprétation de la micro dureté.....	74
III-6-2/Essais de traction	75
III-6-2-1/Résultats d'essais de rupture par traction	75
📌 <i>Constations graphiques</i>	76
III-6-2-2Interprétation des résultats	79
CONCLUSION GENERALE.....	81

LES ANNEXES

BIBLIOGRAPHIE

LISTE DES FIGURES :

- Fig (I-A) : Mécanisme de l'émission électrique dans les arcs électriques libres**
- Fig (I-B) : chute de tension dans l'arc électrique**
- Fig I-1 : soudage à l'arc avec électrode enrobée**
- Fig I-2: procédé M.I.G**
- Fig 1-3 : Procédé TIG**
- Fig I-4 : cycles thermiques le long du cordon de soudure.**
- Fig I-5 : les différentes zones dans une soudure avec le cycle thermique**
- Fig I-6 : soudage du carter de l'avion (moteur équipant MI-8)**
- FigI-7 : soudage des longerons**
- Fig I-8 : soudage de la jambe de train d'atterrissage (B737)**
- Fig I-9 : soudage de l'entrée d'air du réacteur (moteur équipant B777)**
- Fig I-10 : LE FOUR DU TRAITEMENT THERMIQUE (CSC)**
- Fig II-1: Machine TIG (CSC)**
- Fig II-2 les thermocouples collés sur la plaque A-8**
- Fig II-2-A: La position des thermocouples sur la plaque A 3**
- Fig II-2-B: La position des thermocouples sur la plaque A 5**
- Fig II-2-C: La position des thermocouples sur la plaque A 8**
- Fig II-3 : Soudeuse des thermocouples.**
- Fig II-4 : enregistreur thermique**
- Fig (II-5) : équipements de radiographie -CSC**
- Fig (II-6) : duromètre -CSC**
- Fig (II-7) : polisseuse -CSC**
- Fig (II-8) : Echantillon a l'état miroir**
- Fig (II-9) : microscope optique -CSC**
- Fig (II-10) : représentation schématique de l'essai de Vickers**
- Fig (II-11) : Caractéristiques de l'essai de traction**
- Fig (II-12) : Machine de l'essai de traction (CSC)**
- Fig (II-13) : Eprouvette d'essai de traction**
- Fig (III-1) : Cycles thermiques de chaque thermocouple implanté dans la tôle -3**
- Fig (III-2) : Cycles thermiques de chaque thermocouple implanté dans la tôle -5**
- Fig (III-3) : Cycles thermiques de chaque thermocouple implanté dans la tôle -8**
- Fig (III-4) : Cycles thermiques de chaque thermocouple implanté dans la tôle -10**
- Fig (III-5) : Représentation radiographique du cordon de soudure de la tôle A-3**
- Fig (III-6) : Représentation radiographique du cordon de soudure de la tôle A-5**
- Fig (III-7) : Représentation radiographique du cordon de soudure de la tôle A-10**
- Fig (III-8) : Représentation radiographique du cordon de soudure de la tôle A-10**
- Fig (III-9-1) : Représentation macrographique du cordon de soudure (A-3)**
- Fig (III-9-2) : Représentation macrographique du cordon de soudure (A-8)**
- Fig (III-10) : Représentation micrographique(x200) de métal de base A-5(2024)**
- Fig (III-11) : Représentation micrographique(x200) de métal de base A-8(7075)**
- Fig (III-12) : Représentation micrographique(x200) de métal de base A-10(2024)**
- Fig (III-13) : Représentation micrographique(x50) des 3 zones A-5(2024)**
- Fig (III-14) : Représentation micrographique(x200) de ZAT A-5(2024)**
- Fig (III-15) : Représentation micrographique(x200) de ZF A-5(2024)**

Fig (III-16) : Représentation micrographique (x200) de ZL A-5(2024)
Fig (III-17) : Représentation micrographique(x50) des 3 zones A-8(7075)
Fig (III-18) : Représentation micrographique(x200) de ZAT A-8(7075)
Fig (III-19) : Représentation micrographique(x200) de ZF A-8(7075)
Fig (III-20) : Représentation micrographique(x200) de ZL A-8(7075)
Fig (III-21) : Représentation micrographique(x50) des 3 zones A-10(2024)
Fig (III-22) : Représentation micrographique(x200) de ZAT A-10(2024)
Fig (III-23) : Représentation micrographique(x200) de ZF A-10(2024)
Fig (III-24): Représentation micrographique(x50) de ZL A-10(2024)
Fig (III-25): Dureté du métal de base A-1
Fig (III-26): Représentation micrographique de la variation de la microdurete
Fig (III-27): Représentation de la microdurete de métal de base
Fig (III-28): Représentation de la microdurete de A-8 soudée
Fig (III-31): Représentation de la microdurete de A-10 soudée
Fig (III-30): Rupture après traction
Fig (III-31): Défauts de soudage
Fig (III-32): Epreuve A3 (2024)

Résumé

Dans ce présent travail, une étude expérimentale est faite sur le comportement mécanique, métallographique et thermique d'un joint de soudure obtenu par le procédé de soudage à l'arc électrique TIG « Tungsten-InertGaz » réaliser sans métal d'apport de deux plaques minces rectangulaires d'alliage d'aluminium aéronautique.

Pour ce faire, nous avons utilisé un appareillage de mesure pour la représentation de la distribution de la température dans la plaque et pour prise des résultats d'essais mécaniques et métallographique pour savoir la possibilité de soudage des ces alliages aéronautiques.

Ce travail permettra la caractérisation mécanique et métallurgique d'assemblages obtenues et aussi de délimiter les différentes zones concernées, les dimensions de la zone fondue (ZF) et de la zone affectée thermiquement (ZAT).

Abstract

In this present work, an experimental study is made on the mechanical and thermal behavior of a joint of welding obtained by the process of arc welding TIG "Tungsten-Inert Gaz" to realize without filler of two rectangular thin aeronautical aluminium alloy sections.

With this intention, we used a measuring equipment for the representation of the distribution of the temperature in the plate and for catch of the mechanical test results to arrive at the comparative study with the results of the digital simulation.

This work will allow the mechanical and metallurgical characterization of assemblies obtained and also of delimit the various zones concerned, dimensions of the molten zone (ZF) and thermically affected zone (ZAT).

INTRODUCTION
GENERALE

INTRODUCTION GENERALE

Grâce au développement de nouvelles techniques dans la première moitié du XX^e siècle, l'homme toujours cherche de développer l'assemblage des métaux dans un but pratique ou tout simplement esthétique. Au début, la méthode d'assemblage des pièces métalliques faisaient appelle à des moyens simples comme les cordes et l'emboîtement. Ces moyens évoluèrent pour donner les assemblages boulonnés ou rivetés et finirent par aboutir au « soudage» qui permet d'obtenir des assemblages continus et plus homogènes.

La technique du soudage remplace presque tout les autres types d'assemblage dans la construction aéronautique; les avions géants qui sont de plus en plus utilisés pour le transport des passagers • les grand navires, indispensable au transport international des marchandises ; les hauts buildings en acier seraient plus massifs et présenteraient beaucoup moins d'espace utilisables. Ces quelques exemples, qu'ont pourrait d'ailleurs multiplier, montrent à suffisance que le soudage est un des facteurs importants qui conditionnent le fonctionnement de notre monde moderne.

L'assemblage ainsi réaliser est soumis à des contraintes résiduelles dangereuses. La connaissance de ces sollicitations nous permet de mieux prévoir le comportement physique de la soudure, pour qu'elle puisse travailler dans des bonnes conditions de sécurité. C'est dans ce but qu'on réalise une étude expérimentale du champ de température dans l'assemblage afin d'estimer les zones à risque expérimentalement et évaluer leur étendus.

Le travail présenté dans ce mémoire consiste a étudier expérimentalement Le champ de température, lors d'une opération de soudage de deux plaques métalliques minces, sans métal d'apport et par le procédé T.I.G (Tungsten Inert Gaz), et la caractérisation thermique, mécanique et métallurgique du cordon de soudage.

Donc, La réalisation expérimentale de l'opération de soudage a une alternative intéressante. En effet, en permettant une meilleure compréhension des mécanismes de formation du cordon de soudure, et permet d'établir les liens de cause à effet entre le mode opératoire et les caractéristiques résultantes du joint soudé. De plus, le modèle expérimental permet de capitaliser les connaissances acquises par l'expert scientifique et de vérifier la faisabilité d'une séquence de soudage. à travers l'établissement de certaines essais mécaniques, micro dureté et analyse micrographiques.

Pour parcourir à ce travail, notre présent mémoire est structuré de la manière suivante :

- Le chapitre (I), comporte des généralités sur les procédés d'assemblages et le soudage, et expose un aperçu sur le matériau utilisé.

- Le chapitre (II), a été consacré pour l'étude expérimentale, le matériel utilisé et l'ensemble d'essais mécanique et métallographique (micro dureté et l'analyse micrographiques).

- Le chapitre (III), on a présenté les résultats obtenus et leurs interprétations pour les différents application ; une caractérisation mécanique, métallographique et discussion.

Enfin, une conclusion générale clôtura le travail.

Chapitre I

Etude bibliographique

CHAPITRE I :

ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

I-1/GENERALITES SUR LES ASSEMBLAGES :

I-1-1/INTRODUCTION :

Depuis que l'homme a découvert les métaux, il a toujours cherché un moyen de les assembler, dans un but pratique ou tout simplement esthétique et au fur et à mesure que l'industrie est développée ; l'assemblage constitue une étape incontournable dans la fabrication de la majorité des produits. Il comprend différentes techniques et technologies.

L'assemblage est toujours aussi présent dans les préoccupations des chercheurs .son amélioration permet de réduire le nombre de pièces utiles, donc la quantité de matière et le coût opérationnel. Comme dans l'aéronautique mène des recherches amont visant un saut qualitatif dans les différents procédés d'assemblage

Dans un cadre de plus en plus économique, la technologie conduit à des recherches très diversifiées visant à réduire les coûts, garantir la sécurité et développer l'efficacité globale des structures assemblées.

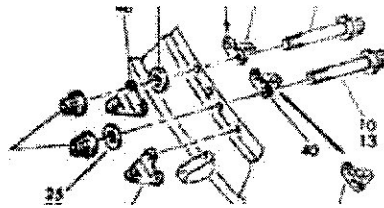
I-1-2/DIFFERENTS PROCEDES D'ASSEMBLAGES :

I-1-2-1/ INTRODUCTION :

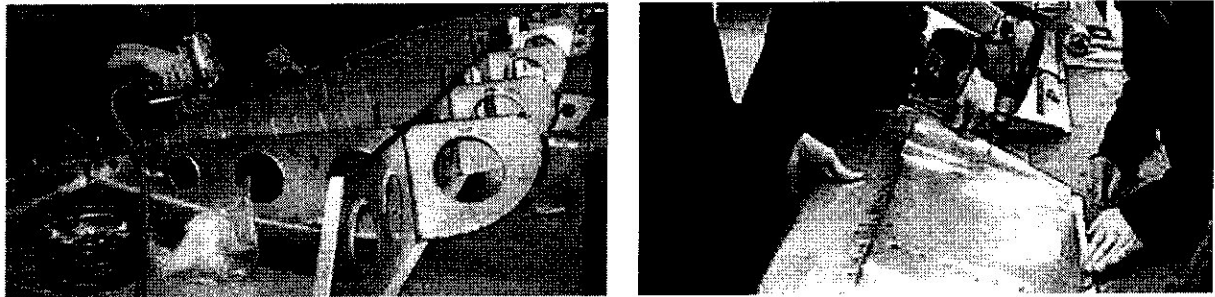
Quand on parle d'assemblage, on peut penser au montage sur une chaîne de fabrication. En fait, il y a de l'assemblage dans la plupart des produits ou des composants, Pour certains produits, l'assemblage prend la forme de quelques opérations simples. Pour d'autres, comme le domaine aéronautique il est plus complexe, il s'agit d'assembler avec un maximum de précision, des milliers de pièces en suivant des instructions détaillées.

I-1-2-2/RIVETS, VIS ET BOULONS :

Ce sont les éléments basiques de l'assemblage. Généralement utilisé dans le cas de pièces de faible épaisseur, le rivetage a tendance à disparaître au profit du soudage. Quant à l'assemblage réalisé au moyen de vis et de boulons, il est principalement utilisé pour des pièces qui doivent pouvoir être facilement démontées dans le cadre d'une réparation ou d'opérations de maintenance.



Exemple de boulonnage dans le réacteur



Exemple de Rivetage de l'aile gauche.

I-1-2-3/LE COLLAGE :

Aujourd'hui le collage intervient dans de nombreux types d'assemblage. Il permet d'obtenir des joints à la fois légers, isolants, étanches et très résistants. En même temps, les pièces collées conservent une élasticité qui offre une bonne résistance aux vibrations. C'est ce qui explique, par exemple, que le collage soit utilisé dans l'assemblage des ailes d'avion.

Autre raison qui explique sa généralisation : ses coûts sont inférieurs à ceux d'autres techniques.

Avantages :

- Assemblage de pièces de différentes épaisseurs.
- Assemblage de matériaux différents ; ex : bois métal, métal plastique.
- Assemblages pouvant être étanches et isolants.
- Si la colle est souple, bonne résistance et bonne fatigue
- Assemblage a froid

Inconvénient :

- Préparation de surfaces : graissage, traitement mécaniques.
- Résistance limitée, pièces mécanique sous utilisée.
- Assemblage encore peut fiable dans le temps.
- Assemblage sensible à la dilatation et aux coefficients de dilatation différents, contrainte dans le joint.
- Si la Résistance à la traction est élevée, sensible aux chocs
- Mise en œuvre parfois délicate.

LA REDUCTION DU TEMPS D'ASSEMBLAGE :

Pour tous les industriels, l'assemblage constitue l'une des étapes de la fabrication qui permet de réaliser des gains de temps et donc d'augmenter la productivité. Et souvent, cette volonté de rationaliser la production bénéficie aux techniciens qui officient sur les chaînes de production : l'amélioration de l'ergonomie des postes de travail contribue en effet à la réduction des délais de fabrication... Se soucier du confort de travail des opérateurs, c'est donc améliorer la production !

I-1-3-LE SOUDAGE :

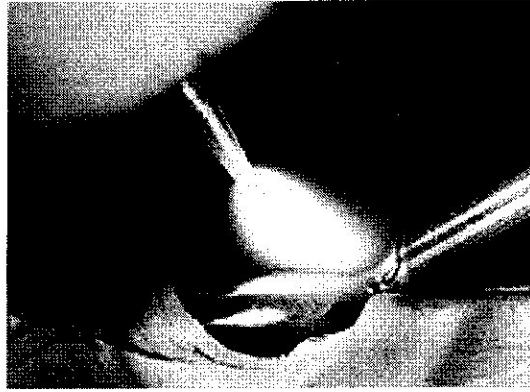
I-1-3-1 / DEFINITION DE SOUDAGE :

Le soudage c'est une opération consistant à réunir deux ou plusieurs parties constitutives en permanence d'un assemblage, de manière à assurer la continuité entre les parties à assembler (continuité de la nature des matériaux assemblés : matériau métallique, matériau plastique, etc.), soit par chauffage, soit par intervention de pression, soit par l'un et l'autre, avec ou sans emploi d'un produit d'apport dont la température de fusion est du même ordre de grandeur que celle du matériau de base.

Il compte de multiples procédés. Dans tous les cas, sa mise en oeuvre consiste à assembler deux pièces. Il s'agit essentiellement de pièces métalliques ou des matériaux composites. Sur les chaînes de fabrication, une grande partie des opérations de soudage est réalisée par des robots. C'est le cas lors de la réalisation construction aéronautique.

Une soudure idéale et celle qui assure une continuité parfaite au point de vue des propriétés mécaniques, métallurgiques et physiques entre les pièces assemblées, de telle sorte qu'on ne puisse pas distinguer le joint du métal qui l'entoure. Le soudage est une opération de métallurgie très complexe au cours de laquelle il faut prendre en compte:

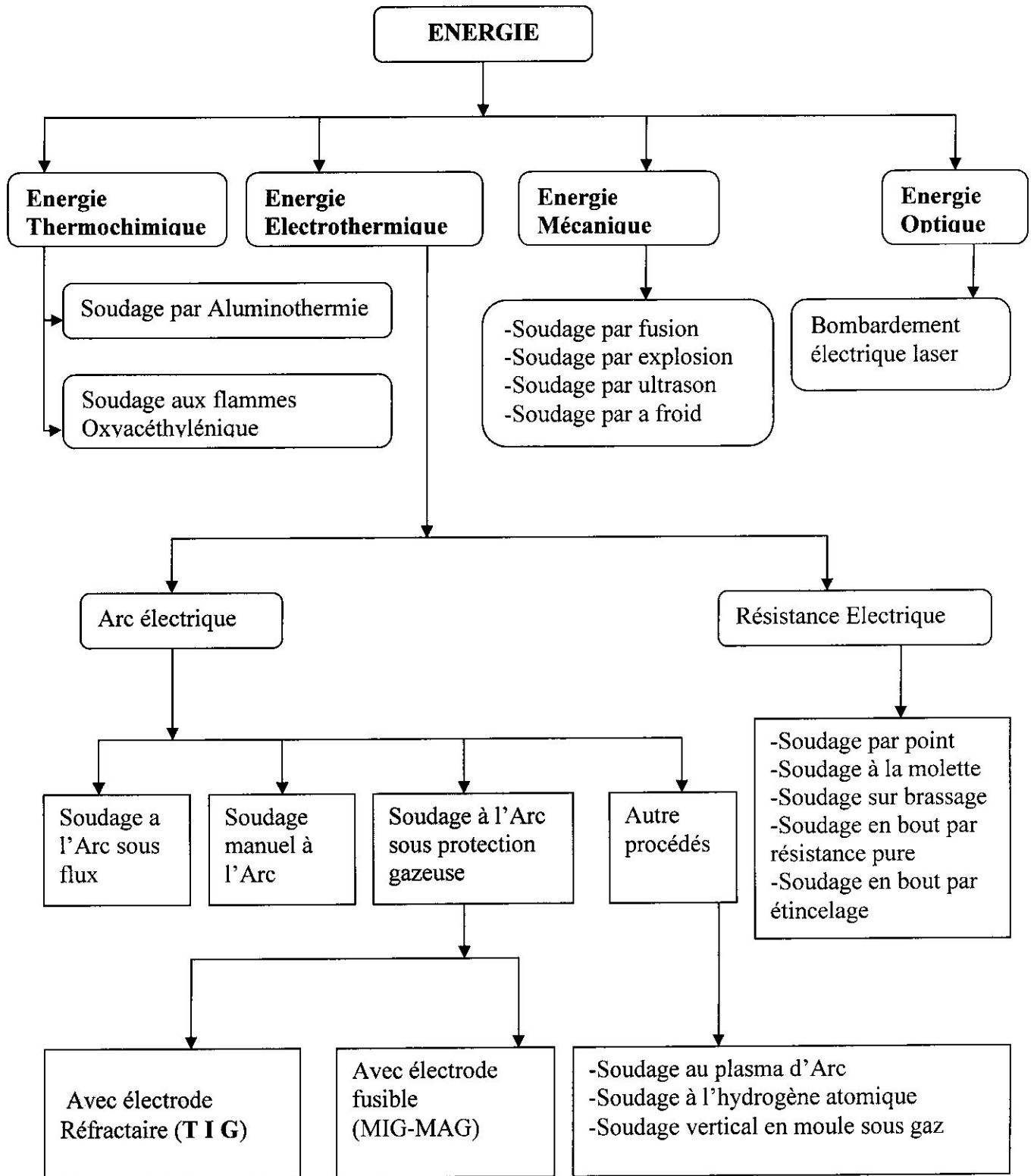
- Le métal de base choisi en fonction de la pièce à réaliser pour ses particularités mécaniques, chimiques,...
- Le couple métal d'apport -gaz de soudage, qui contribue à la composition chimique de la zone fondue. Le métal d'apport sera choisi en fonction de la qualité et des caractéristiques que la soudure devra présenter.
- L'énergie de soudage qui régit le cycle thermique induisant la structure de la zone fondue et de la zone thermiquement affectée.



I-1-3-2/ PROCÉDES DE SOUDAGE:

Un procédé de soudage est défini comme étant une technique d'assemblage permanente caractérisée par la source d'énergie mise en oeuvre.

En général, nous pouvons classer les différents procédés de soudage par leur modes (fusion, sans fusion) ou bien par un classement basé sur les sources d'énergie (comme : arc électrique, résistance électrique) et sur les moyens de protection mis en œuvre contre la contamination atmosphérique ; actuellement, il existe des dizaines des procédés plus ou moins utilisés. Nous pouvons schématiser sur un organigramme les différents procédés de soudage avec un classement basé sur les sources d'énergie.



ORGANIGRAMME DES DIFFERENTS PROCEDES DE SOUDAGE

I-1-3-3/ SOUDAGE A L'ARC :**I-1-3-3-1/ INTRODUCTION :**

La première application de l'arc électrique pour le soudage est sans conteste celle qui correspond au brevet pris par CHARLES DE MERITENS en 1881 qui concerne « un mode de soudure autogène par l'électricité ». Bernanos en 1887 puis Kjellberg (1914) utilise le pouvoir de fusion d'un arc électrique en vue de réaliser la soudure des métaux. L'énergie est fournie par un banc d'accumulateurs et le soudage s'exécute au moyen d'une électrode qui va fondre au fur et à mesure, puis va se solidifier en un dépôt qui s'associe intimement au métal des pièces en formant une liaison continue. Le procédé se développe essentiellement grâce à la mise au point d'une électrode enrobée en cellulose qui, du fait de sa vaporisation formant écran de protection, réalise l'impérative condition, pour obtenir des soudures saines, de soustraire les métaux en fusion à l'action de l'air. Les principes fondamentaux de tous les procédés de soudage à l'arc par électrode fusible sont dès lors posés, de même que dans une certaine mesure le principe des procédés à électrode réfractaire.

I-1-3-3-2/ DEFINITION :

On appelle arc de soudage une décharge électrique de longue durée, qui se produit dans un mélange de gaz et de vapeur ionisé entre deux électrodes et qui est caractérisé par une densité de courant élevé et par une faible différence de potentiel.

Cette opération peut être assimilée à une opération locale d'élaboration métallurgique et à une opération locale de traitement thermique, donnant une structure cristalline dépendant à la fois de la composition chimique élaborée et du traitement thermique.

I-1-3-3-3/PRINCIPE:

Le principe du processus de la soudure par fusion à l'arc électrique en est fort simple et repose sur le phénomène suivant : Un courant électrique de caractéristique définies, nature et intensité, fait jaillir sous une tension donnée un arc entre deux électrodes, à travers une colonne de gaz ionisé appelé plasma d'arc. La quantité de chaleur dégagée par l'arc électrique permet une fusion instantanée des bords des pièces à souder et du métal d'apport.

I-1-3-3-4/ DESCRIPTION DU PHENOMENE DE L'ARC :

Dans un arc électrique libre, on distingue trois zones:

- . Zone cathodique
- . Zone anodique
- . La colonne d'arc

Les électrons heurtent les molécules des gaz atmosphériques ou les gaz protecteurs fournis par l'enrobage ou canalisent autour de l'électrode, par le choc avec les molécules de ces divers gaz (oxygène, azote, argon, etc. . . .), et si l'énergie des électrons est suffisante, il y aura formation d'ions, qui sont des particules porteuses de charges, soit positives ou négatives, le gaz s'ionise. En plus, des électrons en provenance de la cathode et allant bombarder l'anode.

Il y a donc deux autres déplacements de particule dans un arc de soudage:

Un courant d'ions positifs vers la cathode et un courant d'ions négatifs vers l'anode. Cependant, la mobilité des électrons étant environ cent fois plus grande que celle des ions, la majorité du courant est transportée par les électrons. Les chutes de potentiel entre la cathode et l'arc (chute cathodique) et entre l'arc et l'anode (chute anodique), représentent ensemble les deux tiers de la chute totale de tension entre la anode et cathode. Les gradients de tension ainsi que la somme des chutes des tensions anodiques et cathodiques sont pratiquement indépendants de l'intensité du courant de soudage. [1]

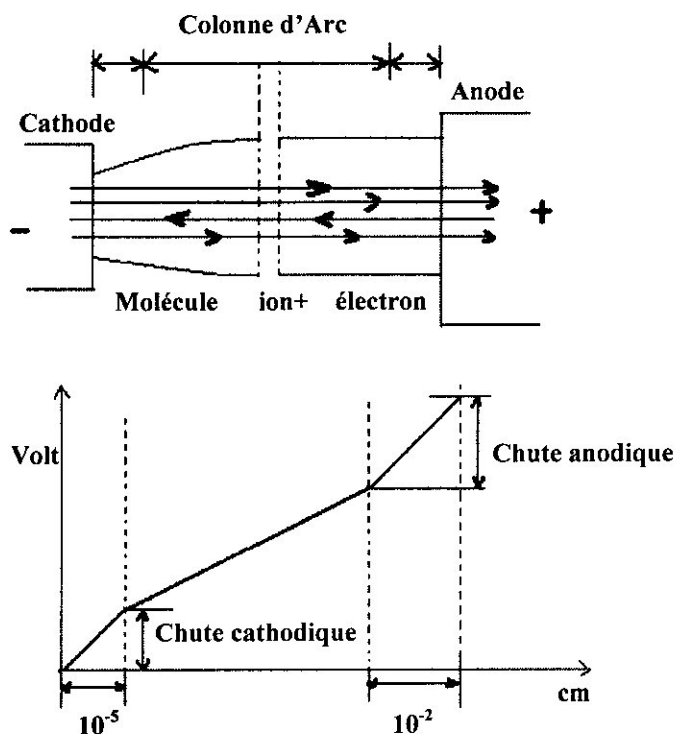


Figure (I-A) : Mécanisme de l'émission électrique dans les arcs électriques libres

I-1-3-3-5/CARACTERISTIQUES PRINCIPALES DE L'ARC ELECTRIQUE :

Les deux principales caractéristiques de la région de l'arc sont:

- le champ électrique et thermique élevé.
- la densité de courant élevé au niveau de la colonne.

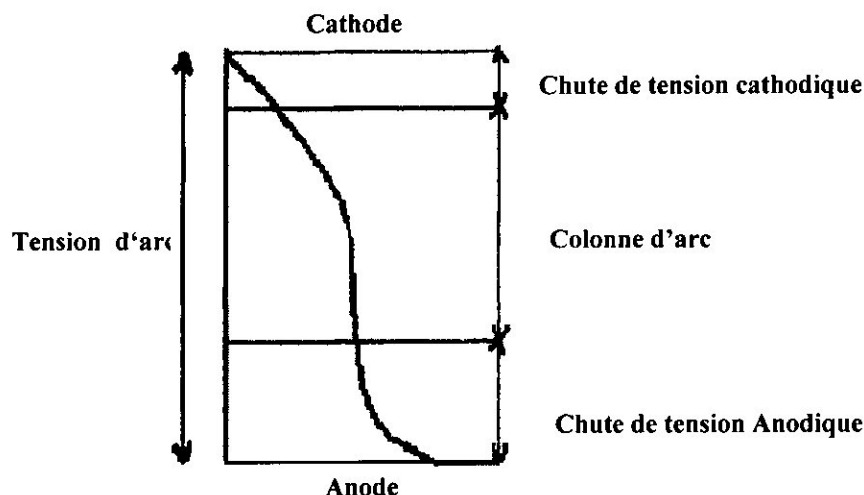


Figure (I-B) : chute de tension dans l'arc électrique

Il est très difficile de faire une estimation sur l'ampleur de champ électrique et thermique, bien qu'il ait été prouvé la possibilité de mesurer la chute de potentiel dans la cathode avec un degré de précision raisonnable, et d'estimer la chute de potentiel de l'anode [Gracov 1967], la chute de potentiel cathodique étant supérieure à celle de l'anode. [2]

Les températures aux différents points de l'arc sont très variables, elles dépendent beaucoup du milieu environnant. Elles sont de l'ordre de 2500 C° à la cathode, 3500 C° à l'anode et 5000 C° dans la colonne par un arc de soudage avec électrodes enrobées. En soudage Plasma, on relève dans des conditions normales, des températures allant de 8000 à 25000 C° dans la colonne d'arc. [1].

I-1-3-3-6/LES PRINCIPAUX PROCÉDES DE L'ARC :

Comme nous intéressons au soudage à l'arc, nous allons définir ces différents procédés en se basant :

- Nature de l'électrode : baguette, fil fusible ou réfractaire.
- Nature du milieu : gaz ou vapeurs, dans lequel s'établit la décharge électrique et qui doit avoir des propriétés protectrice, vis-à-vis de l'atmosphère ambiante. [3]

I-1-3-3-6-1/ SOUDAGE A L'ARC AVEC ELECTRODE ENROBEE:

Dans ce procédé, une électrode métallique est enrobée et reliée à un générateur alternatif ou continu. Le métal à souder est relié à l'autre borne de cette même source de courant. [4]

La chaleur intense de l'arc fait fondre les deux parties à souder, ainsi que la pointe de l'électrode métallique qui fournit le métal d'apport pour la soudure (figure I-1), la vitesse de soudage est relativement élevée et le refroidissement est assez brutal.

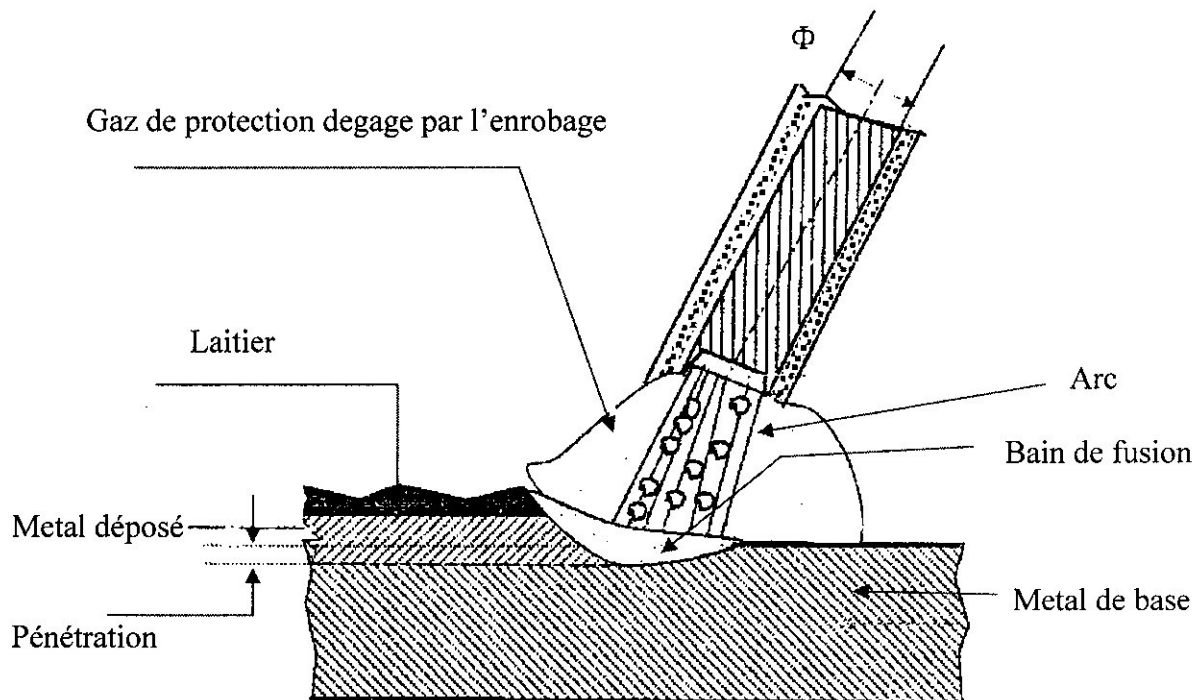


Fig I-1 soudage à l'arc avec électrode enrobée

I-1-3-3-6-2/ LE PROCEDE M.I.G/M.A.G:

L'emploi d'un fil électrode fusible dévidé automatiquement en remplacement de l'électrode réfractaire dans le procédé T.I.G. a donné naissance au procédé M.I.G/M.A.G.

Dans le procédé M.I.G. (métal inerte gaz) l'atmosphère de protection est inerte ; par contre dans le procédé M.A.G (métal active gaz) elle est active. Les principaux gaz ou mélanges de gaz utilisés sont l'argon et l'hélium en soudage M.I.G et le CO₂ ou l'argon-CO₂ en soudage M.A.G. La fusion du fil, ou plus exactement le transfert du métal dans l'arc, peut se faire de trois manières : avec courts-circuits, en grosses gouttes, ou en pulvérisation axiale (Voir figure I-3), le mode de transfert dépend principalement de la nature du gaz utilisé et de la densité du courant électrique.



Le soudage à l'arc avec électrode fusible sous atmosphère inerte (MIG - pour métal inert gaz) et active (MAG - pour métal active gaz), est la méthode de soudage la plus répandue en Europe, aux Etats-Unis et au Japon. La facilité de mise en œuvre, manuelle ou automatique, ainsi que l'obtention de hauts taux de dépôts.

Le MIG et le MAG sont des procédés de soudage à l'arc sous protection gazeuse avec fil continu fusible, dans lesquels le bain de fusion et le métal de base sont protégés de l'air ambiant par une enveloppe de gaz.

Le gaz est canalisé par une buse, peut être inerte : Argon ou Hélium par exemple (MIG), ou actif : mélanges Argon/CO₂ ou Argon/Oxygène par exemple (MAG). Ce procédé est aussi communément appelé " semi-automatique " .

Avantages spécifiques :

- Une gamme de gaz adaptées à toutes les configurations d'assemblages.
- favorise l'environnement du soudeur en réduisant la formation d'ozone, tout en garantissant d'excellent résultats de soudure.
- Procédés rapide, en favorisant de forts taux de métal déposé, permettent de gagner en productivité.

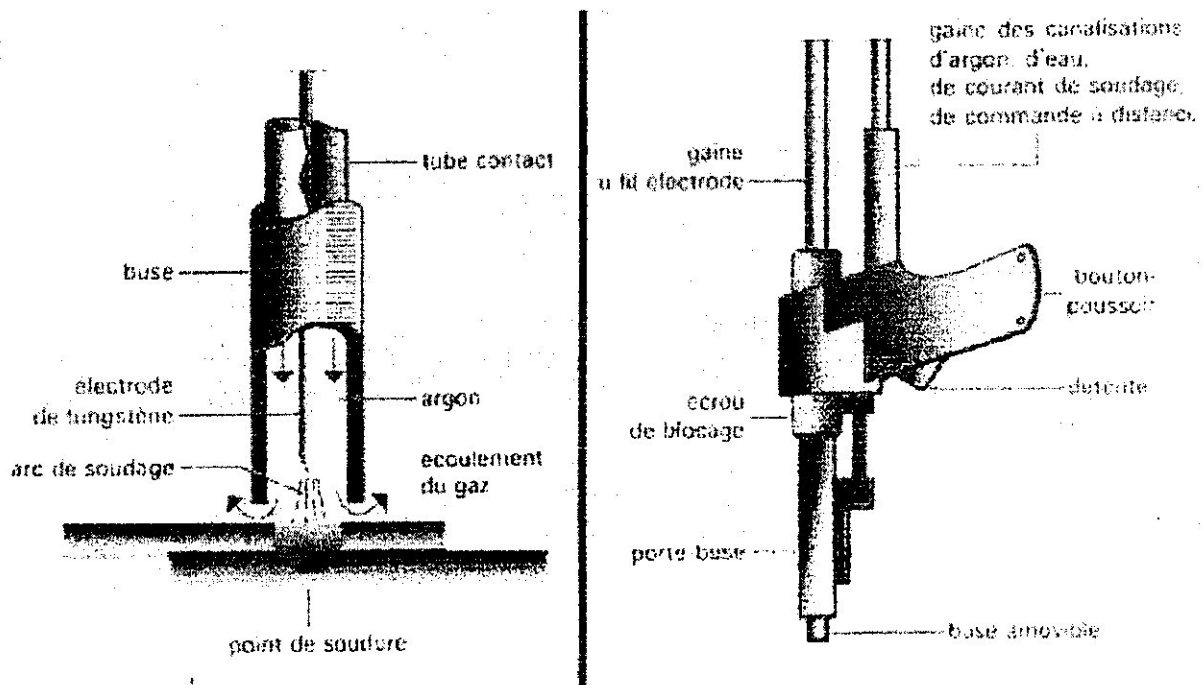


Fig-I-2 procédé M.I.G

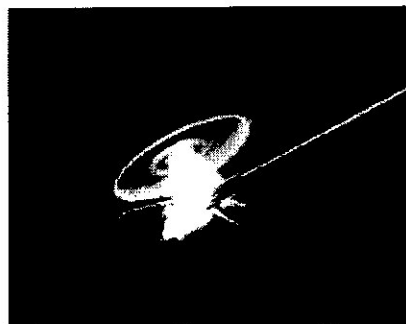
Caractéristiques du fil d'apport:

Fils pleins ou fils nus dans le procédé MIG (protection par Argon ou Argon-Hélium) et dans le procédé MAG (protection par CO_2 ou Argon - CO_2 « gaz binaire » ou Argon CO_2 - O_2 « gaz ternaire », etc. . . .)

Fils fourrés avec ou sans gaz : le fil électrode fourré a une structure tubulaire rempli d'un flux interne qui remplace le gaz lors de la fusion de certains de ses éléments et qui peut à l'aide de l'électrode enrobée d'apporter des améliorations métallurgiques au métal déposé. [8]

I-1-3-3-6-3/ SOUDAGE AU PLASMA :

Le procédé « plasma » s'apparente au procédé TIG (réfractaire en tungstène, atmosphère gazeuse protectrice) mais utilise un arc électrique étranglé.



A la sortie de la tuyère, le gaz (argon, mélange argon -hydrogène) forme un dard extrêmement brillant, dont la température varie de 15000 à 20000 C°, et dont la concentration d'énergie est très importante. Ce dard permet de fondre rapidement tous les métaux et alliages avec un grand pouvoir de pénétration, en raison de sa longueur et de sa rigidité due à sa grande vitesse. [8]

Le soudage plasma à arc transféré est le plus répandu pour le soudage des métaux. On peut le décrire comme un procédé TIG amélioré. La principale différence c'est un arc plus rigide et plus énergétique obtenu grâce à des tuyères spéciales et à une protection par un gaz auxiliaire. Le jet plasma est assuré mécaniquement et pneumatiquement par la tuyère, ce qui permet d'obtenir une plus grande puissance spécifique de la colonne plasma, et donc des zones fondues très étroites. Jusqu'à une épaisseur de matériau d'environ 3 mm, le soudage plasma et le soudage TIG sont comparables, mais lorsqu'il s'agit de matériaux plus épais, il se forme en soudage Plasma, du fait de la concentration d'énergie, un trou appelé " Key Hole " qui traverse complètement le joint et qui est constamment maintenu lors de l'opération de soudage.

Ce phénomène favorise les pénétrations et les vitesses de soudage. A la fin du soudage, on diminue le débit de gaz plasmagène, l'arc devient alors identique à un arc TIG et peut donc être évanoui comme dans ce procédé.

Si l'on a recours à des gaz dans le soudage Plasma, c'est pour trois raisons différentes :

- Le gaz Plasmagène est le milieu qui forme le plasma entre l'électrode et la pièce à usiner. On utilise souvent de l'argon ou des mélanges argon / hydrogène avec les aciers inoxydables, et des mélanges argon / hélium avec les métaux non ferreux.
- Un gaz annulaire est nécessaire et s'écoule autour du jet de plasma pour protéger le bain de fusion ; il influe également sur le mouillage et l'aspect du cordon, ainsi que sur la vitesse de soudage.

Un gaz identique ou différent du gaz plasmagène peut :

- Un gaz auxiliaire peut être utilisé avec un traînard ou en protection envers. Le traînard sert à protéger de l'air les matériaux sensibles (titane, zirconium ...) pendant leur refroidissement, la protection envers empêche l'oxydation de la pénétration, notamment pour les aciers inoxydables.

I-1-3-3-6-4/ SOUDAGE PAR RESISTANCE ELECTRIQUE:

Dans le soudage par résistance, la chaleur provient par l'effet joule produit par un courant électrique qui traverse le métal. On fixe des électrodes sur les cotés des pièces à souder, puis on exerce une forte pression sur les pièces en y appliquant brièvement un courant élevée, le point ou les deux métaux se touchant, crée une résistance électrique qui fait fondre les métaux et forment la soudure. [8]

On distingue quatre procédés de soudage par résistance électrique:

a) Soudage Par Point:

Dans ce mode, les deux électrodes sont des barreaux de révolution à extrémités en tronc de cône ou en calotte sphérique et sont placées bout à bout de part et d'autre des deux pièces à souder. On réalise ainsi des soudures discontinues.

b) Soudage A la Molette:

Dans ce mode, les deux électrodes sont des grands disques, à axes parallèles, placées de part et d'autre des deux pièces à souder, et roulant sans glisser sur celle-ci, ce procédé peut donner de soudures soit par point espacés soit une soudure continue.

c) Soudage Par Brassages:

Il permet de réaliser des assemblages continus ou discontinus par superposition ; mais il se distingue du soudage par points ou à la molette en ce que la localisation du courant et de l'effort sur la zone de soudage n'est pas obtenue par les électrodes, mais par la géométrie des pièces à souder elles-mêmes.

d) Soudage En Bout:

Le soudage bout à bout peut s'effectuer simultanément sur deux sections distinctes, c'est ainsi qu'il permet la réalisation d'anneaux de forte section pour la fabrication de chaînes. On peut réaliser la fermeture d'anneaux de grands diamètres par une seule liaison, c'est le cas des jantes de roues de voitures.

I-1-3-3-6-5/ SOUDAGE A ELECTRODE REFRACTAIRE T.I.G:

Le premier brevet TIG (Tungstène Inerte Gaz) fut déposé aux USA en 1924, et à partir de 1942 qu'il fut utilisé pour le soudage des sièges d'avions en magnésium.

Le procédé TIG est aujourd'hui employé sur n'importe quel matériau, du magnésium aux inox, en passant par tous les aciers, les cuivreux et autres alliages d'aluminium. Le

principal domaine d'utilisation du TIG couvre des épaisseurs faibles, il est, en effet, très rare de souder en TIG des épaisseurs supérieures à 6 mm.

Le TIG est un procédé de soudage à l'arc avec électrode infusible dans lequel un gaz inerte protège l'électrode, le bain de fusion et le métal de base. Il est possible d'utiliser ou non un métal d'apport.

Un arc électrique est généré dans une veine de gaz inerte entre l'électrode en tungstène et la pièce à assembler. La chaleur dégagée fait fondre les bords de la pièce et éventuellement le métal d'apport pour former le cordon de soudure.

Les gaz protecteurs les plus utilisés sont l'argon et l'hélium, ou un mélange de ces deux gaz. Un apport d'hydrogène peut également s'avérer bénéfique sous certaines conditions.

Il est recommandé dans certains cas d'assurer une protection. Ce gaz de protection peut être le même que celui de la torche de soudage, ou parfois de l'azote.

La nature du courant électrique est fonction des matériaux à assembler :

- * Courant continu avec l'électrode au pôle négatif pour le soudage de l'ensemble des matériaux hormis les alliages d'aluminium.
- * Courant alternatif pour le soudage des alliages d'aluminium, l'effet mécanique de l'inversion des polarités du courant favorise l'élimination de la couche d'alumine (Al_2O_3), qui recouvre toujours ces alliages et qui est difficile de fondre.

Le soudage TIG est le procédé noble par excellence, et est couramment utilisé pour les opérations de soudage précises et de très grande qualité (nucléaire, industrie alimentaire, ...), garantissant à chaque fois une soudure exempte de défauts.

Avantages spécifiques :

- Une gamme de gaz industrielle adaptée au soudage TIG de tous les matériaux, et à toutes les typologies de joints.
- favorise l'environnement du soudeur en réduisant la formation d'ozone, tout en garantissant d'excellents résultats de soudure.

a) Principe:

Le terme TIG est l'acronyme de Tungsten Inert Gaz où le terme Tungstène désigne le métal constitutif de l'électrode et le terme de gaz inerte est le type de gaz plasmagène utilisé. Ce procédé de soudage rentre dans la catégorie des procédés de soudage à l'arc

avec une électrode non fusible. L'arc se crée entre l'électrode réfractaire et la pièce sous un flux gazeux, de 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 (pole - 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 du magnésium où l'on soude en polarité alternée (pendant un laps de temps, l'électrode est reliée au pole + du générateur). Il est important de noter que souder de façon continue lors du (pole + relié à l'électrode) détruit cette électrode en la faisant fondre.

La chaleur nécessaire au soudage est produite par un arc électrique jaillissant entre une électrode en tungstène et les pièces à souder. Le tungstène ne fond que au delà 3500 C°. L'arc et le bain de fusion sont protégés par une atmosphère inerte, jet d'argon ou par fois Argon + hélium. Le métal d'apport est indépendant de la torche de soudage et se présente sous forme de baguette tenue par l'opérateur ou sous forme de fil dans le cas du soudage automatique. [6]

Dans le procédé T.I.G. (tungsten inert gaz), l'arc est établi au sein d'une atmosphère neutre (argon ou hélium) entre la pièce à souder et une électrode métallique réfractaire non consommable en tungstène pur. Le flux de gaz inerte protège de l'air environnant l'électrode, le bain de fusion, et l'extrémité du fil d'apport (figure I-2). Utilisé de façon courante dans l'industries nucléaire, aérospatiale, alimentaire, chimique ou pétrochimique, le procédé T.I.G. permet le soudage de tous les métaux et alliages, même les plus délicats, tels que le titane, le zirconium, etc. la simplicité des paramètres et la faible usure de l'électrode ont permis la mise au point d'installations automatiques pour le soudage en toutes positions (AUTOMATISATION, ROBOTS), mais, du fait de la limitation des énergies mises en jeu, sa productivité n'atteint pas d'autre procédé. Les principales variantes du procédé sont le T.I.G. pulsé, le T.I.G. multi cathode, le T.I.G. avec fil chaud et le T.I.G. double flux. [5]

b) Électrodes utilisées :

Les électrodes employées sont majoritairement constituées de Tungstène à plus de 99% en masse auquel on ajoute des oxydes de Thorium sous forme ThO₂ dispersés dans la phase W. Ces oxydes augmentent l'émissivité électronique de l'électrode et donc le rendement, étant donné la radioactivité naturelle du Thorium, des électrodes cériées (présence de Cérium) sont développées. On trouve également des électrodes en Tungstène pur, la couleur de l'anneau ceignant l'électrode renseigne sur la quantité et la nature d'élément d'addition présent. Les électrodes sont affûtées de sorte que les stries d'affûtage soient orientées de la pièce vers l'électrode.

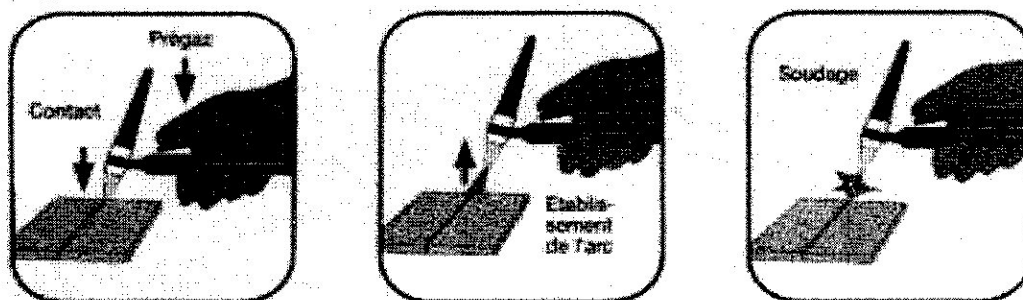
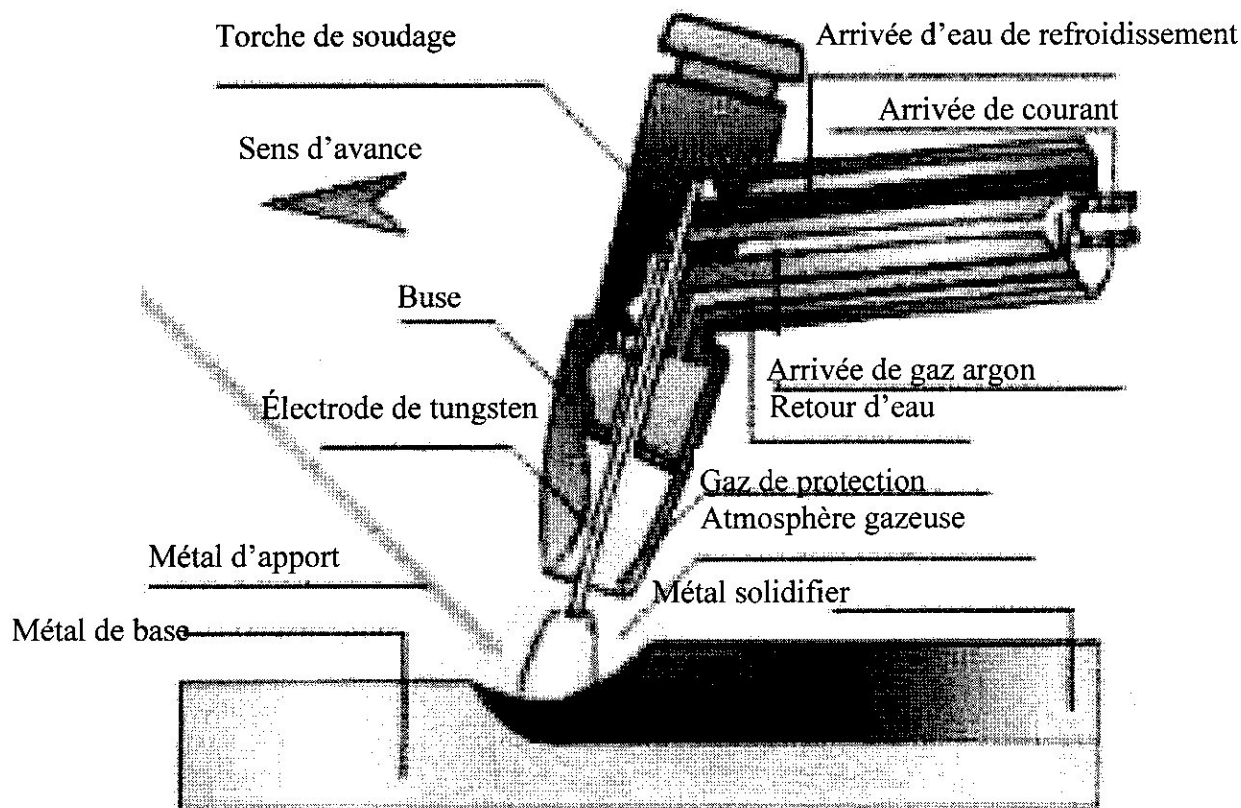


Fig 1-3 Procédé TIG

c) Généralités de courant de soudage:

Ils ont des caractéristiques externes, comme ceux du soudage à l'arc avec électrode enrobée.

A / Courant alternatif :

Il est indispensable pour le soudage de l'aluminium et de ces alliages. L'alternance du courant a en effet une action mécanique à l'intérieur du métal en fusion, et à briser

la couche d'alumine. Un dispositif permet de stabiliser l'arc et d'amorcer à distance afin d'éviter la pollution du bain de fusion. On utilise en générale un générateur à haute fréquence et l'électrode est un tungstène pur ou de 0.3 à 0.5% de zirconium. [6]

B/Courant continu :

L'électrode est toujours au pôle négatif afin d'éviter sa dégradation par le bombardement d'électrons émis par la pièce. Le courant continu est utilisé pour le soudage des aciers, des aciers inoxydables et du cuivre. L'addition de thorium permet une densité de courant plus élevée. [6]

C /Métal d'apport et pièces à souder:

Le métal d'apport doit être d'une grande pureté et de composition chimique proche de celle du métal de base des pièces à souder. Le métal d'apport ainsi que les bords à souder doivent être décapés et exempts de toute souillure (oxydes, graisses, contamination par des particules d'autres métaux, etc. Au-delà d'une certaine épaisseur des pièces à souder pour l'aluminium et ces alliages et pour les aciers inoxydables et réfractaires, le procédé MIG est le plus avantageux. [6]

D /Les gaz de protection pour soudage TIG:

Les gaz employés dans l'immense majorité des cas peuvent être de l'Argon, de l'Hélium ou un mélange des deux. Ces gaz influent sur la facilité d'amorçage de l'arc (plus facile sous Argon car sa tension d'ionisation est plus faible que celle de l'Hélium), la forme du cordon, la profondeur de pénétration, la vitesse de soudage (les vitesses élevées sont plutôt réservées aux mélanges majoritaires en Hélium). [7]

E/ Domaine d'application du procédé:

Le procédé TIG permet le soudage des métaux et alliages ferreux et non ferreux en particulier l'aluminium, le cuivre et le nickel, en toutes positions. En raison de la limitation des énergies mises en jeu, il s'applique surtout aux faibles épaisseurs $e \leq 10$ mm. Dans certains cas, on utilise pour le soudage multi passes des pièces épaisses pour l'exécution de la passe de fond. Pour les épaisseurs supérieures à 5 mm, le procédé « plasma », en développement, remplace avantageusement le procédé TIG. [6]

F/ Avantages du procédé TIG:

La qualité visuelle d'une soudure TIG est excellente, le procédé convient à tous les métaux. La compacité de la torche permet de souder dans des endroits difficilement accessibles pour d'autres procédés.

Les joints réalisés sont de très haute qualité. On peut effectuer le soudage avec ou sans métal d'apport. Le procédé est excellent pour les faibles épaisseurs 0.2 à 0.8 mm. L'état de surface du cordon de soudure est de très bel aspect (propre et brillant) et le bain de fusion n'est pas pollué au cours du soudage. [6]

G/Inconvénients du procédé TIG:

La préparation des bords à souder doit être soignée, les chanfreins exécutés avec une grande précision, le métal et les pièces découpées, d'où un prix de revient élevé. Le rendement énergétique de l'arc est peu élevé 60%. [6]

Problèmes de soudage :

Les contaminants susceptibles de poser un problème dans le soudage à l'arc de gaz, qui sont l'oxygène, l'azote, l'hydrogène et l'humidité. Dans certains cas, l'azote et l'hydrogène ne sont pas considérés comme des contaminants.

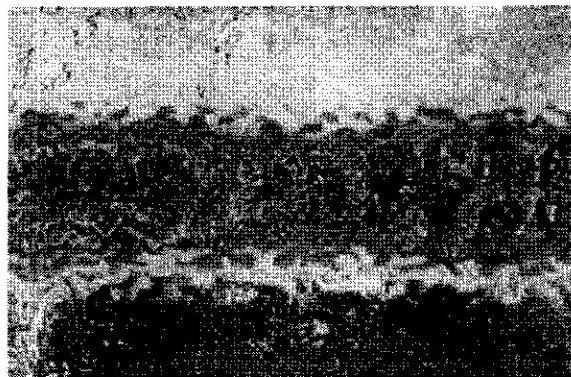
Ces contaminants proviennent rarement, en général, c'est l'air qui contamine le bain de soudure, le flux de protection gazeuse étant trop ou pas assez important.

L'humidité et les divers revêtements à la surface du métal de base (huile d'usinage, calamine...) ou du métal d'apport (graisse de tréfilage) peuvent eux aussi contaminer le bain.

Une mauvaise utilisation des moyens de mise en œuvre des gaz et des matériels d'application peut également contaminer les gaz de protection.

La contamination des gaz de protection peut engendrer des problèmes plus ou moins graves dans les assemblages soudés. Ce peut être des porosités, des fissures, des diminutions des caractéristiques mécaniques de dureté ou de traction et une baisse de la résistance aux différentes corrosions.

La sensibilité d'un élément à un contaminant est variable d'un matériau à l'autre.



I-1-3-3-6-6/ PROPRIETES ENERGETIQUES DE L'ARC:**A) ENERGIE NOMINALE:**

C'est l'énergie (E_n) fournie au niveau de l'arc pour exécuter une soudure.

Nous pouvons la calculer avec la formule suivante :

$$E_n = \frac{UI}{V_s} \quad (\text{I-1})$$

Ou :

U : la tension d'arc en Volts (V).

I : l'intensité du courant électrique en Ampère (A).

V_s : vitesse du soudage en (m/s).

B) ENERGIE DISSIPEE DANS LE JOINT SOUDE:

L'énergie fournie au niveau de l'arc n'est pas entièrement transmise aux pièces à souder en raison des pertes par rayonnement et par convection de la colonne d'arc. [4]

Pour l'énergie dissipée dans un cordon de soudure (E_d), on aura :

$$E_d = E_n \cdot \eta \quad (\text{I-2})$$

Avec η : le rendement d'arc.

C) LE RENDEMENT DE L'ARC:

Dans le but de calculer le taux de chaleur consommée, par les pièces à souder, qui est basé sur les valeurs mesurées de tension et du courant, il est nécessaire de connaître la proportion de l'énergie d'arc qui est transférée à la pièce. Cette quantité est connue par « le rendement d'arc ' η ' » que nous pouvons le calculer comme suite :

- Dans le cas d'électrode fusible : $\eta = 1 - [(1-n)Q_p + mQ_a] / U.I$
- Dans le cas d'électrode non fusible : $\eta = 1 - [Q_t + (1-n)Q_p + mQ_a] / U.I$

Ou :

Q_t : la chaleur transmise à l'électrode.

Q_p : la chaleur émise par convection et par rayonnement par la colonne d'arc.

Q_a : celle transmise à la pièce à souder.

n : la proportion de la chaleur produite par la colonne.

m : la proportion de la chaleur perdue par rayonnement.

Avec : $Q_t + Q_p + Q_a = Q_{arc}$ qui est la chaleur produite par l'arc.

Le rendement énergétique de l'arc varie en fonction :

- Du procédé de soudage.
- De la nature du courant.
- Du matériau.
- De l'épaisseur des pièces à souder.

D) TEMPERATURES DANS LA COLONNE D'ARC:

La majorité des mesures de température dans la colonne ont été faites par spectroscopie ; ces mesures montrent que l'augmentation du courant de soudage engendre un élargissement du champ des isothermes au niveau de la surface de l'anode (d'après OLSEN 1957).

La température au voisinage de la cathode est d'environ 2.10^4 K et ne varie pas beaucoup même avec un courant de soudage allant jusqu'à 400 A (d'après KO BAYASHI et SUGA 1979 et JACKSON 1960).

L'effet de composition des gaz de protection à base d'argon sur la température de la colonne d'arc a été étudié par KEY et AL (1983). Tous ces gaz produisent la même température maximale.

E) LES CYCLES THERMIQUES DU SOUDAGE :

a) DEFINITION :

Au cours de l'opération de soudage, la pièce est soumise à un certain cycle thermique, la zone qui se trouve aux environs de la soudure subit un échauffement jusqu'à une température maximale, suivi par un refroidissement rapide après le passage de la source chaude. En chaque point de cette région la température varie en fonction de temps suivant une certaine loi qui dépend de :

- Procédé de chauffage.
- Nature de métal.
- Forme de la pièce.

b) CARACTERES GENERAUX DU CYCLE THERMIQUE ET DE LA REPARTITION :

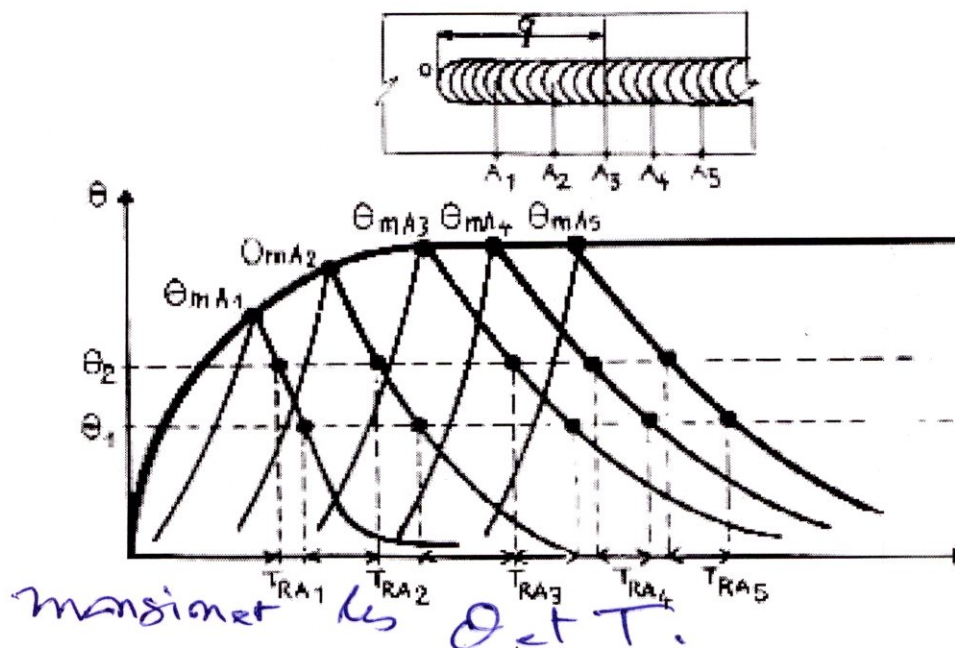
• Notion d'état quasi- stationnaire :

Si nous relevons au moyen thermocouples, les courbes $\theta = f(t)$ en des points A1, A2....etc, situés à la même distance d'un cordon de soudure à l'arc et à des distances croissantes de l'origine O de ce cordon, supposé amorcé en plaine tôle, nous obtenons pour chaque parcours expérimenté, par rapport à l'origine O du cordon, la disposition décrite par figure (I-5) qui conduit aux remarques suivantes :

-La température maximale atteinte θ_m croit avec la distance parcourue à partir du début du cordon, puis se stabilise à une valeur qui devient constante, tant que la source de chaleur progresse à une vitesse uniforme (l'énergie demeurant uniforme).

- En même temps, les lois de refroidissement mesurées par le temps de refroidissement entre deux températures deviennent identiques.

Autrement dit, les courbes $\theta = f(t)$ deviennent superposables dès que la source de chaleur a franchi un certain parcours (q).



FigI-4 : cycles thermiques le long du cordon de soudure.

• Facteurs influençant la répartition thermique :

Le métal de base : la nature des pièces à souder influe sur le processus thermique du soudage par leurs propriétés, leurs caractéristiques thermiques (conductivité et donc de résistivité), par leurs masses, leurs formes, leur disposition, et enfin par la température initiale de ces pièces.

Les conditions de soudage : l'influence des conditions de soudage peut s'exprimer en fonction de l'énergie mise en jeu durant l'opération, d'autres part, l'environnement et ses paramètres ont un important impact sur la répartition thermique (la pression et la composition de l'entourage direct de l'arc électrique).

• Différentes zones dans une soudure :

On définit la zone affectée thermiquement (ZAT), la zone fondue (ZF) et le métal de base la figure I-5 montre ces trois zones

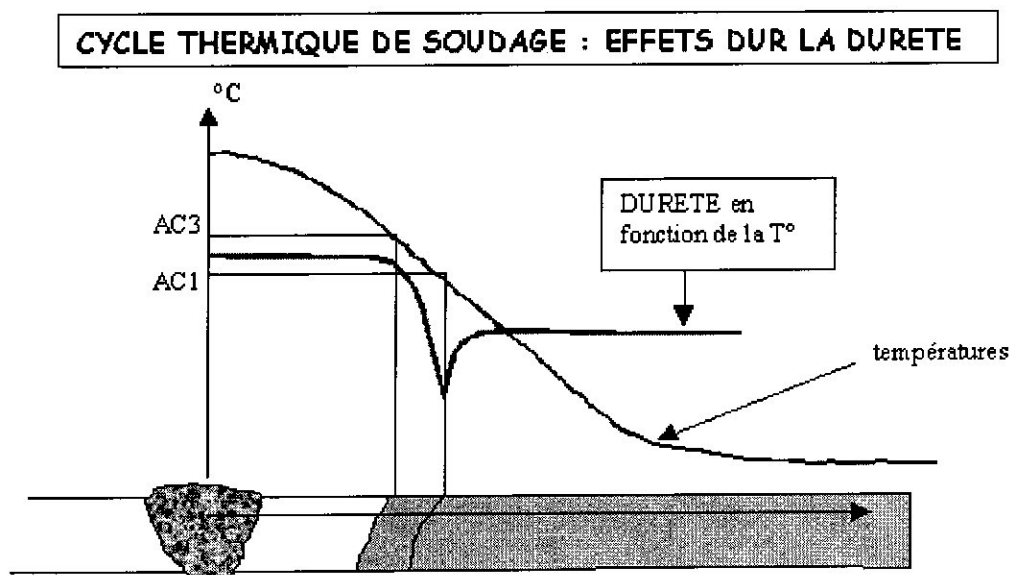


Fig I-5 : les différentes zones dans une soudure avec le cycle thermique et la dureté.

Zone fondue (ZF) :

Elle est principalement composée de métal d'apport fondu, auquel s'ajoute les parties (régions) qui fusionnent du métal de base. Autrement définie, la zone fondue n'est autre que le cordon de soudure. Cette région, au passage de l'arc, atteint des températures très élevées qui sont même supérieures à la température de fusion de métal de base. La zone fondue est caractérisée par une structure à grains fins.

Zone affectée thermiquement (ZAT) :

Dans laquelle, la température reste inférieure à la température de fusion, mais suffisante pour modifier la constitution ou la structure métallographique.

Une troisième zone peut exister, souvent très réduite, de fusion partielle où la température a atteint l'intervalle de solidification de l'alliage (ZL).

• Effet de soudage sur la dureté :

Durant le soudage, l'abond de la zone fondue est à des températures intermédiaires entre T° fusion et T° métal de base.

Cette zone affectée par la chaleur est divisible en deux zones différentes.

- Une partie partiellement transformée très dure du fait de sa forte teneur en carbone.
- Une partie adoucie (soudo-revenue) qui voit sa dureté chuter de part le cycle de soudage

Si on chevauche les passes de manière appropriées, on peut donc adoucir une ZAT en profitant de ce soudo-revenue et obtenir par la même un effet de détente après soudage.

Limiter la dureté en ZAT permet de :

- Réduire les risques de fissuration.
- Eliminer les points durs si la soudure est conservée à l'état brut de soudage.

I-3-4-/ QUELQUES APPLICATIONS DE SOUDAGE EN AERONAUTIQUE :

Parmi les domaines industriels où on trouve des applications interne des soudures, est l'aéronautique, (qui nous intéressants notre formation et dans notre recherche).

Alors, on cite à titre d'exemple des zones soudées dans l'avion, composantes structuralles et dans le moteur.

- Avion (plancher, jambes des trains d'atterrissage

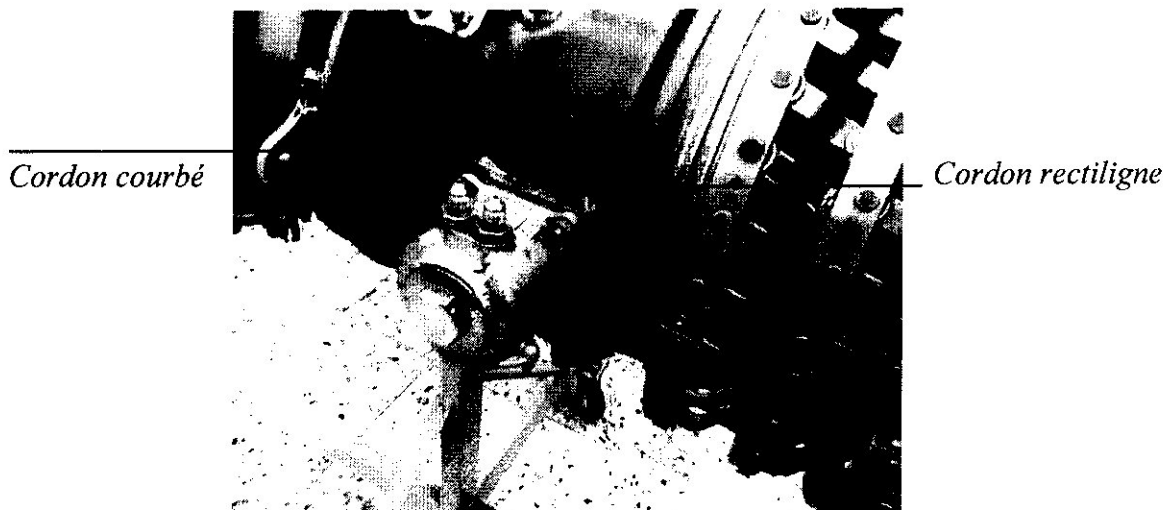


Fig I-6 : soudage du carter de l'avion (moteur équipant MI-8)

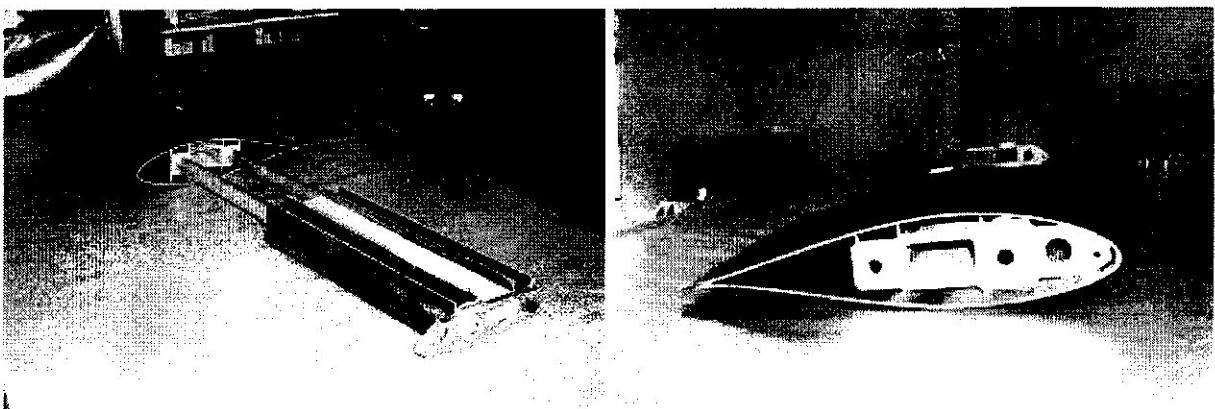


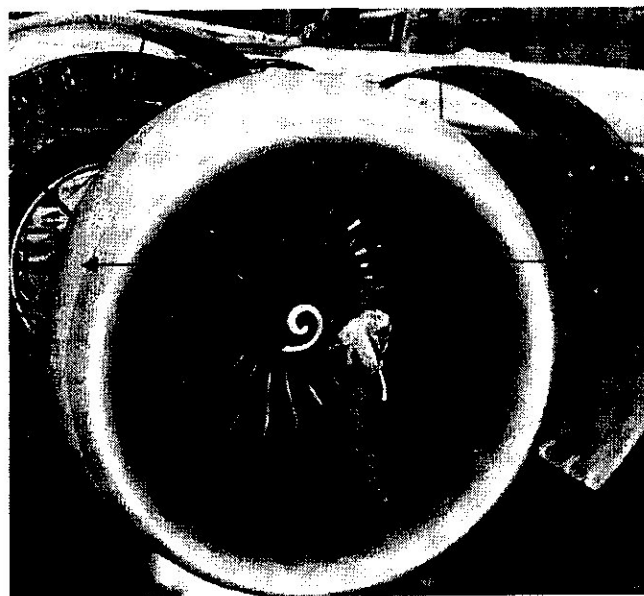
Fig I-7 : soudage des longerons.



Cordon rectiligne

Cordon courbé

Fig I-8 : soudage de la jambe de train d'atterrissage (B737)



*Cordon courbé
(Sous peinture)*

Fig I-9 : soudage de l'entrée d'air du réacteur (moteur équipant B777)

I-2/L'ALUMINIUM ET SES ALLIAGES :

I-2-1 /PRINCIPALES CARACTERISTIQUES 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 a pris cette place grâce à un ensemble de propriétés qui en lui font un matériau remarquable.

- **Masse volumique :**

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

- **Résistance à la corrosion :**

Grâce à la couche d'oxyde qui se forme en surface, les alliages d'aluminium résistent à la corrosion. L'aluminium et ses alliages peuvent alors être utilisés sans protection supplémentaire comme revêtements extérieurs. 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.

- **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.

- **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 (CFC). Ils font donc preuve, à l'état recuit, d'une excellente ductilité à toute température.

- **Propriétés de mise en forme :**

L'aluminium a une température de fusion relativement basse, d'environ 660° . Il en résulte une facilité de fusion qui présente un avantage certain pour les opérations de

fonderie. L'aluminium est très ductile, on peut aisément le mettre en forme à l'état solide, par déformation plastique.

Les alliages peuvent être mis en forme selon deux techniques.

- *Mise en forme par corroyage :*

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

- *Mise en forme par fonderie :*

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

Tableau I-1 : les méthodes d'amélioration des propriétés mécaniques.

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

La principale méthode de durcissement par traitement thermique est donc le durcissement structural. La méthode par traitement mécanique est l'écrouissage.

I-2-2/ETATS METALLURGIQUES :

On peut obtenir des alliages d'aluminium en divers états: recuits, écrouis ou trempés et vieillis. On désigne le plus souvent ces différents états par des symboles. Ces désignations s'appliquent aussi bien aux alliages corroyés qu'aux alliages de fonderie

I-2-2-1/ Traitement thermique :

Le traitement thermique d'une pièce consiste à lui faire subir des transformations de structure grâce à des cycles prédéterminés de chauffage et de refroidissement afin d'en améliorer les caractéristiques mécaniques : dureté, ductilité, limite d'élasticité, ...



FigI-10 : LE FOUR DU TRAITEMENT THERMIQUE (CSC)

Les traitements thermiques jouent également un rôle important dans le domaine de la métallurgie.

• **La trempe :**

La trempe s'effectue après une mise en solution de certains composés : Il s'agit de maintenir le matériaux à tremper à une température suffisante et suffisamment longtemps. On plonge ensuite la pièce dans un liquide (bain d'huile ou d'eau) ou un gaz (azote, air).

Dans le cas des aciers, le but est d'éviter la précipitation de certains composés et ainsi augmenter la dureté du matériau. Pour d'autres métaux, la trempe peut avoir l'effet inverse, par exemple avec certains alliages d'aluminium ou aciers inoxydables.

- **Cas des alliages d'aluminium :**

Les alliages d'aluminium, comme les aciers, voient leurs caractéristiques augmentées par un traitement thermique.

En ce qui concerne les pièces de fonderie, les deux grandes familles d'alliages sont les AS (Aluminium-Silicium) et les AU (Aluminium-Cuivre) pour lesquels le cycle de traitement thermique est différent.

- Cas des AS : La trempe (température de mise en solution de l'ordre de 540°C, durée 5 à 12h, suivant l'alliage et la masse de la pièce), trempe à l'eau, est suivie d'un revenu (170°C environ) pendant 3 à 10h.
- Cas des AU : La trempe, mise en solution à une température légèrement inférieure et toujours à l'eau est suivie d'une maturation de plusieurs jours à température ambiante.

Dans tous les cas, les cycles précis sont donnés par des normes ou des spécifications particulières, en fonction de l'alliage.

La vitesse de refroidissement peut provoquer la formation de contraintes internes.

On observe souvent une déformation des pièces lors de la trempe. Ce qui oblige à intercaler une opération appelée le redressage entre la trempe et le revenu (ou juste après la trempe dans le cas de certains AU). Cette opération, qui est réalisée sur un *marbre* en fonte, à l'aide de maillets, marteaux, masses ou même des presses pour les grandes pièces. Pour obtenir la bonne géométrie, l'opérateur utilise souvent un calibre de redressage ou des règles.

Cette opération doit être effectuée le plus rapidement possible car au bout de quelques heures, il y a risque de casser la pièce à cause de la l'augmentation de la dureté provoqué par la maturation de l'alliage.

A titre d'exemple, sur un alliage AS7G06 (environ 7% de Silicium, 0,6% de Magnésium),

- une pièce de fonderie non traitée aura pour caractéristiques mécaniques (environ)
 $R_m \sim 210\text{MPa}$, $R_{p0.2} \sim 160\text{MPa}$, $A \sim 1\%$ pour une dureté de l'ordre de 80HB (Alliage EN AC-42200 SF).
- alors que le même alliage trempé-revenu donnera des résultats de l'ordre de
 $R_m \sim 280\text{MPa}$, $R_{p0.2} \sim 250\text{MPa}$, $A \sim 2\%$ pour une dureté supérieure à 95HB (alliage EN AC-42200 ST6).

Pour certains alliages d'aluminium, la trempe a pour effet de diminuer la dureté au lieu de l'augmenter. Après trempe, par phénomène de maturation, les caractéristiques mécaniques augmentent naturellement à la température ambiante. Certains alliages peuvent atteindre leurs caractéristiques mécaniques d'usages. Ce phénomène est utilisé lors de la pose des rivets.

●Le revenu :

Le revenu se pratique après une trempe, par chauffage à une température inférieure à celle de la trempe. Il permet d'améliorer la résistance mécanique des pièces traitées en diminuant la dureté et les contraintes thermiques internes obtenues lors de la trempe. On chauffe à une température inférieure à celle d'austénitisation, puis on refroidit plus ou moins rapidement. Dans certains cas (alliages à durcissement structural) le revenu permet après trempe d'augmenter les caractéristiques mécaniques.

●Le recuit :

Le recuit se fait après un traitement mécanique, une opération de soudage, etc. afin de rendre plus homogène le matériau et lui rendre ses propriétés antérieures. On chauffe jusqu'à austénitisation totale de la pièce, puis on laisse refroidir lentement, ce qui lui fait retrouver ses anciennes propriétés.

-Courbes de refroidissement :

Pour aider les métallurgistes et concepteurs à la réalisation de pièces destinées à la trempe, il existe des abaques de refroidissement qui permettent de savoir en fonction de la teneur en carbone, du temps et du type de refroidissement (huile, eau...), de connaître les constituants métallographiques présent lors de la transformation, et une fois la pièce froide, ce qui permet de s'assurer que les caractéristiques obtenues correspondent à celles recherchées.

• Symbolisation des traitements métallurgiques :

On désigne :

-l'état métallurgique de base par une lettre : F, O, H ou T.

- le moyen principal d'obtention par un ou plusieurs chiffres placés derrière cette lettre

F:Brut de fabrication

O:Recuit

H:Ecroui

T:Traité thermiquement

W:Trempé et non stabilisé

Les états F et O n'ont pas de subdivisions, au contraire des états H et T. Subdivisions de l'état H : elles sont décrites par au moins deux chiffres. Le 1^{er} indique le traitement post-écrouissage, le second l'état de dureté de l'alliage, (voir Tableau2) :

Tableau I-2: subdivisions de l'état écroui.

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

I-2-3/ALLIAGES CORROYES :**I-2-3-1/ Désignations des alliages :**

Nous désignerons les alliages d'aluminium corroyés suivant l'association des Etats-Unis des normes. Ces normes affectent à chaque type d'alliage un nombre de quatre chiffres qui permet de les classer en séries. Nous traiterons des alliages non trempants des séries 1000, 3000 et 5000. Ensuite, les alliages à durcissement structural des séries 2000, 6000 et 7000 seront vus du Tableau I-3, Les alliages de la série 4000 sont peu utilisés, nous les négligerons.

Tableau I- 3 : le classement en séries de l'Aluminium (Association des Etats-Unis)

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

I-2-3-2/Alliages sans durcissement structural :

- **Série 1000 :**

Les alliages de cette série sont essentiellement des aluminiums dont la pureté commerciale est d'au moins 99% Al. A l'état recuit, leurs propriétés mécaniques sont faibles, mais on peut les améliorer par écrouissage.

Ils se prêtent facilement à la mise en forme par déformation plastique à froid, notamment l'emboutissage et la chaudronnerie. Ils font preuve d'une excellente tenue en atmosphère humide et marine. Cette qualité est utilisée, par exemple, après placage par laminage, pour protéger des alliages d'aluminium sensibles à la corrosion.

Grâce à la grande conductibilité électrique de certains alliages de cette série, on peut utiliser ceux-ci comme conducteurs électriques. Ces alliages sont également recherchés pour leur conductibilité thermique élevée. Cette propriété est utilisée pour les tubes d'évaporateurs et de radiateurs. Ils ont aussi une excellente tenue aux très basses températures. Cette propriété est utilisée dans l'industrie cryogénique.

• **Série 3000 (Al/Mn) :**

La solubilité maximale du manganèse dans l'aluminium diminue rapidement avec la température, Elle est de 1,8% à 659°C. Le manganèse se combine à l'aluminium pour former un composé intermétallique: Al_6Mn . Le durcissement de l'aluminium par des additions de manganèse est dû au composé Al_6Mn . Ce précipité est dispersé dans la matrice. Les teneurs en Mn sont maintenues inférieures à 1,5 %. On constate également une augmentation de la température de recristallisation de l'alliage. L'addition de magnésium à des teneurs inférieures à 1,2 % entraîne un durcissement secondaire par solution solide.

Les alliages Al-Mn se prêtent aisément à la mise en forme. On produit des tôles, barres, fils, profilés, tubes, etc.. Par ailleurs, ils résistent bien à la corrosion atmosphérique et sont facilement soudables. Ils remplacent l'aluminium non allié de la série 1000 chaque fois qu'on recherche une amélioration des propriétés mécaniques.

• **Série 5000 (Al-Mg):**

Les alliages de cette série ne sont pas sujets au durcissement structural. Pour les alliages écrouis, un séjour prolongé à la température ambiante ou plus élevée, provoque une précipitation. Mg_2Al_3 se forme aux joints de grains. Ceci peut entraîner des conséquences néfastes sur la résistance à la corrosion. Il y a, en effet, une possibilité de corrosion intergranulaire ou de corrosion sous tension. Pour pallier cette tendance, on soumet ces alliages, après écrouissage, à un recuit de stabilisation. Les utilisations des alliages de la série 5000 découlent de leurs principales caractéristiques, (voir Tableau I-4).

Tableau I-4 : les caractéristiques de la série 5000.

Caractéristique	Valeur
Résistance mécanique	Moyenne. On peut l'améliorer par écrouissage, aux dépens toutefois de leur ductilité
Aptitude à la transformation	Grande aptitude aux transformations à chaud (filage, forgeage) et à froid, à l'état O (emboutissage, filage, cintrage, etc.)
Soudabilité	Excellente
Résistance à la corrosion	Très bonne. On peut encore l'améliorer par anodisation
Etats de surface	Bonne après polissage et anodisation. Dans ce cas, il faut maintenir leurs teneurs en fer et en silicium à des valeurs minimales

I-2-3-3 Alliages à durcissement structural :

• Série 2000 (Al/Cu et Al/Cu/Mg) :

Les teneurs massiques en cuivre des alliages de cette série sont comprises entre 2,6% et 6,3 %. Les teneurs en magnésium varient de 0,5 à 1,5 %. Le durcissement structural de ces alliages est dû à la précipitation de composés transitoires d' Al_2Cu et $CuMgAl_2$. Ces phases leur confèrent d'excellentes propriétés mécaniques. L'addition de silicium et de manganèse améliore les propriétés de la matrice. Par contre, la présence de fer est souvent nuisible. La formation de Cu_2FeAl_7 , contenant le fer, diminue la quantité de cuivre nécessaire au durcissement structural. Cependant, si, en plus du fer, on ajoute du nickel, il y a formation du composé Al_9FeNi , qui confère à l'alliage une bonne tenue mécanique jusqu'à 230°C.

D'autre part, les alliages de la série 2000 font preuve d'une résistance médiocre (faible) à la corrosion. A l'état trempé et vieilli, la présence de précipités cathodiques crée une pile par rapport à la matrice. Par ailleurs, ces alliages sont difficilement soudables ; en effet, puisque les zones adjacentes aux cordons de soudure subissent un recuit lors du cycle thermique imposé par le soudage, leurs propriétés mécaniques s'en trouvent considérablement affaiblies.

Parmi les caractéristiques : Durcissement dû à la précipitation de formes transitoires des composés d'équilibre $CuAl_2$ et $CuMgAl_2$; Excellentes propriétés mécaniques (descendent pour les zones adjacentes aux cordons de soudure) ; En rajoutant Fe + Ni, nous obtenons une précipitation de Al_9FeNi qui nous donne une bonne tenue mécanique jusqu'à 230°C (fabrication des moteurs à turbine et structures d'avions supersoniques) ; À l'état trempé et vieilli on a une résistance médiocre à la corrosion.

• Série 6000 (Al/Mg/Si) :

Le durcissement structural des alliages d'aluminium de la série 6000 est dû à la formation du composé Mg_2Si . Quand le magnésium et le silicium se combinent en Mg_2Si le rapport massique Mg/Si est égal à 1,73. Pour la plupart de ces alliages, ce rapport est respecté. On rencontre parfois un excès de silicium qui améliore les propriétés mécaniques. Ceci se fait au détriment de la résistance à la corrosion. Certains alliages comportent en outre des additions de manganèse (< 0,8 %) et de chrome (< 0,3 %). Ces éléments ont pour effet d'augmenter leur résistance mécanique et leur ténacité, et d'affiner la taille des grains.

L'addition de cuivre améliore également les propriétés mécaniques de ces alliages, mais on limite sa teneur à 0,5 %. Il diminue leur résistance à la corrosion.

Ces alliages possèdent des propriétés mécaniques moyennes par rapport aux autres alliages d'aluminium à durcissement structural. Par contre, ils ont une excellente aptitude à la mise en forme à chaud. Les techniques de production sont le filage, le

forgeage etc. Une bonne soudabilité est également rencontrée. Par ailleurs, leur comportement aux basses températures est acceptable, mais leur résistance à chaud est limitée à 150°C. Ils font preuve d'une excellente résistance à la corrosion atmosphérique, tout en étant insensibles à la corrosion sous tension.

- **Série 7000 (Al-Zn-Mg et Al/Zn/Mg/Cu):**

De tous les alliages d'aluminium, ceux de la série 7000 présentent, après traitements thermiques, les propriétés mécaniques les meilleures. Leur teneur en zinc varie de 4 à 8 % et celle en magnésium de 1 à 3 %. Leur durcissement structural est dû principalement à la précipitation de formes transitoires (zones GP) du composé $MgZn_2$.

L'addition de cuivre, jusqu'à des teneurs de 2 %, durcit ces alliages par solution solide et par précipitation. Par ailleurs, la présence de cuivre dans les zones GP augmente leur stabilité à chaud. Le cuivre diminue toutefois la trempabilité, la soudabilité et la ténacité des alliages Al/Zn/Mg. Le chrome (< 0,3 %) améliore leur résistance à la corrosion sous tension.

Outre leurs propriétés mécaniques remarquables, les alliages de la série 7000 se prêtent facilement aux traitements thermiques. Cette qualité est due à leur grand intervalle de température de mise en solution, leur bonne trempabilité. Leurs températures de vieillissement sont relativement basses : de la température ambiante à 160°C. Grâce à cet ensemble de propriétés, les caractéristiques des joints soudés peuvent rester voisines de celles du métal de base. La soudabilité de ces alliages, favorisée par la présence de zirconium, reste moyenne.

Le principal inconvénient des alliages de cette série est leur faible résistance à chaud, dès que la température de service dépasse 120°C.

I-2.4 Alliages de fonderie :

- **Qualités recherchées :**

Les qualités qu'on recherche pour un alliage de fonderie sont différentes de celles d'un alliage corroyé. Les zones à usiner exceptées, les pièces de fonderie ont leur forme définitive après démoulage. Par ailleurs, elles ne subissent aucune déformation plastique. Les propriétés de ces alliages découlent des opérations de fonderie, parmi ces caractéristiques : Aptitude du métal liquide à bien remplir l'empreinte ; Fissuration à chaud causée par le retrait du métal ; Due au retrait qui accompagne la solidification ; Permettent d'employer des moules métalliques réutilisables (des coquilles) dans lesquels on coule le métal soit par gravité, soit sous pression.

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

temps de solidification est fonction du type de moule utilisé. Dans les moules métalliques, la solidification se produit beaucoup plus rapidement que dans les moules en sable. Il en résulte une structure plus fine (distance interdendritique, taille des composés intermétalliques) qui entraîne une amélioration des propriétés.

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

Chapitre II

Techniques expérimentales

CHAPITRE II :

TECHNIQUES EXPERIMENTALES

II-1/INTRODUCTION :

L'étude proposée traite et perfectionne la compréhension du changement des différentes caractéristiques dans le cas de soudage TIG d'un alliage d'aluminium aéronautique (AL2024, AL7075). Elle a pour but de caractériser les cordons de soudure obtenue par ce procédé. Elle permet d'établir les changements de ces nuances sur des plaques minces de différents formes de cordon selon les cycles thermiques obtenus, ainsi que la délimitation et l'observation expérimentale de la formation des différentes zones à cause du flux thermique suivi d'une étude mécanique et métallurgique.

A travers une analyse de surface qui permet d'identifier clairement les différents changements qui se résultent par la formation de cordon de soudage sans métal d'apport. Pour cela, on va présenter une synthèse sur les métaux de base et puis le matériel et les techniques expérimentales misent en jeu pour parcourir à ce but.

II-2/CARACTERISTIQUES DU METAL DE BASE :

Les résultats des tableaux ci-dessous confirment ceux indiqués par les normes :

NF A 50-105(04.1982) et 50-491(06.1981)

II-2-1/METAL DE BASE :

Le matériau que nous avons utilisé dans ce travail est un Aluminium de nuance 2024 et 7075, soudée sans métal d'apport c'est-à-dire par TIG.

II-2-1-1/ ANALYSE DE LA COMPOSITION CHIMIQUE :

TableauII-1 : composition chimique suivant la norme de l'Aluminium 2024.

élément	Cu	Fe	Si	Cr	Mg	Mn	Zn	Ti
% en masse	3.8à4.9	0.50	0.50	0.10	1.2à1.8	0.3à0.9	0.25	0.15

Avec d'autres éléments d'addition Zr +Ti 0.20%

TableauII-2 : composition chimique suivant la norme de l'Aluminium 7075 :

élément	Cu	Fe	Si	Cr	Mg	Mn	Zn	Ti
% en masse	1.2à2.0	0.50	0.40	0.18à0.28	2.1à2.9	0.30	5.1à6.1	0.20

Avec d'autres éléments d'addition Zr +Ti 0.25%

II-2-1-2/PROPRIETES MECANIQUES :

TableauII-3 : propriétés mécaniques suivant les norme.

structure	limite d'élasticité Rp(Mpa)	La dureté Hb	Module d'élasticité (Gpa)
AL 2024	75	45	73
AL 7075	105	60	72

II-2-1-3/PROPRIETES PHYSIQUE :

TableauII-4 : propriétés physiques suivant les norme.

Alliage	Masse volumique (kg/dm ³)	Intervalle de fusion (C°)	Capacité thermique massique(j/Kg.K°)	Conductivité thermiqueW/m.k	Résistivité 10 ⁻⁸ Ω.m
AL 2024	2.77	502à638	875	193	3.4
AL 7075	2.8	477à635	960	130	5.22

II-3/L'OPERATION DE SOUDAGE :**II-3-1/DESCRIPTION DU MATERIEL UTILISEE :**

Pour les différents cordons de soudure réalisés on a utilisé une machine de soudage TIG (équipement de CSC).

II-3-1-1/Machine TIG :

Fig II-1 Machine TIG (CSC)

II-3-1-1-1/Description :

Il existe une large gamme de produits répondant aux diverses attentes des utilisateurs : parmi ceux-ci une famille de postes MMA ultra-légers et surpuissants compatibles groupe électrogène ; un ensemble de postes TIG en adéquation avec les besoins en ateliers de construction aéronautique, que l'application soit sur inox, acier ou aluminium; une gamme complète de postes MIG/MAG standard permettant de couvrir de la plus fine aux plus fortes épaisseurs et enfin des solutions complémentaires de soudage micro-plasma et plasma pour une précision et un aspect exceptionnels.

Pour nos expériences, on utilise la machine TIG série 350 multifonction (alternatif et direct).

II-3-1-1-2/Avantages :

Large éventail de solutions pour tous les besoins en soudage manuel et robotisé. Grande stabilité de l'arc quelle que soit l'application. Fiabilité du matériel, garantie de 3 ans.

II-3-1-1-3/ Electrodes utilisées:

Les électrodes employées sont majoritairement constituées de Tungstène à plus de 99% en masse auquel on ajoute des oxyde de Thorium sous forme ThO_2 dispersés dans la phase W. Ces oxydes augmentent l'émissivité électronique de l'électrode et donc le rendement. Étant donné la radiocativité naturelle du Thorium, des électrodes cériées (présence de Cérium) sont développées. On trouve également des électrodes en Tungstène pur. La couleur de l'anneau ceignant l'électrode renseigne sur la quantité et la nature d'élément d'addition présent. Les électrodes sont affûtées de sorte que les stries d'affutage soient orientées de la pièce vers l'électrode.

II-3-1-1-4/Gaz de soudage :

Les gaz employés dans l'immense majorité des cas peuvent être de l'Argon, de l'Hélium ou un mélange des 2. Ces gaz influent sur la facilité d'amorçage de l'arc (plus facile sous Argon car sa tension d'ionisation est plus faible que celle de l'Hélium), la forme du cordon, la profondeur de pénétration, la vitesse de soudage (les vitesses élevées sont plutôt réservées aux mélanges majoritaires en Hélium).

II-3-1-1-5/Défauts rencontrés :

- Inclusions de Tungstène
- Porosités (surtout avec de l'Argon)
- Collages et manques de pénétration
- Oxydation si mauvaise protection gazeuse, notamment à l'envers des soudures débouchantes ("rochage")

II-3-1-1-6/Choix des paramètres de soudage :

TableauII-6 : Intensité admissible sur électrode en tungstène

Diamètre Electrode	Sous courant alternatif Tungstène pur bout vert.	Sous courant Redressé Tungstène thorium bout rouge Tungstène cérium bout gris
1	20A à 60A	10A à 70A
1.6	35 A à 90 A	50 A à 100 A
2	50A à 120A	90A à 160A
3	80A à 160A	140A à 260A

Thorium radioactif= aspiration obligatoire

- Soudage de L'Aluminium et de ses alliages :
Courant de soudage : Alternatif.

TableauII-7 : Représente une fiche technique sur le choix de l'intensité de courant de soudage en fonction de l'épaisseur.

Epaisseur Tôle	Diamètre de L'électrode	Diamètre du fil D'apport	Intensité En Ampères	Débit Argon	Diamètre buse réfractaire
1	1 ou 1,5	1.5	30A à 45A	6à7L/mn	8
1.5	2	2	60A à 70A	6à7L/mn	8 à 10
2	2	2.5	70A à 120A	6à7L/mn	10
3	3	3	120A à 150A	6à8L/mn	12

TableauII-8 : Représente une fiche technique sur le choix de l'électrode de soudage en fonction de l'épaisseur.

Ep	Type électrode	Ø électrode	Ø du fil d'apport	Type de courant	Intensité	H F	Débit argon en l/mn	Vitesse en cm/mn
0.8	Tungstène pur	1 ou 1.5	1.6	Alternatif	30-45	Maintenue	6	20-25
1.2		1 ou 1.5	1.6 ou 2		30-45			20-25
1.5	ext verte	2	2 ou 2.5		60- 70			18-20

II-4/CARACTERISATION DE SOUDAGE :

II-4-1/ CARACTERISATION THERMIQUE :

Il s'agit de prélever les cycles thermique expérimentalement.
Pour cela on a suivi les manipulations suivantes :

II-4-1-1/Implantation des thermocouples :

Les thermocouples de type (chromel-alumel) sont implantés sur l'une des plaques à soudée, supportant des températures jusqu'à 1200°C, ou on les a couverts avec une patte isolante thermiquement. Le positionnement de ces thermocouples a diffère dans chaque tôle.

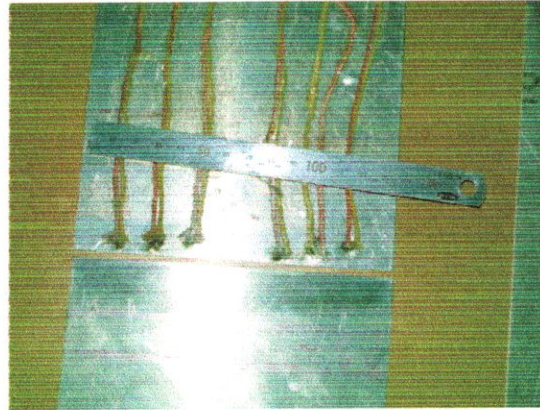


Fig II-2 les thermocouples collés sur la plaque A-8

II-4-1-2/Représentation de positionnement des thermocouples pour chaque plaque avant de souder :

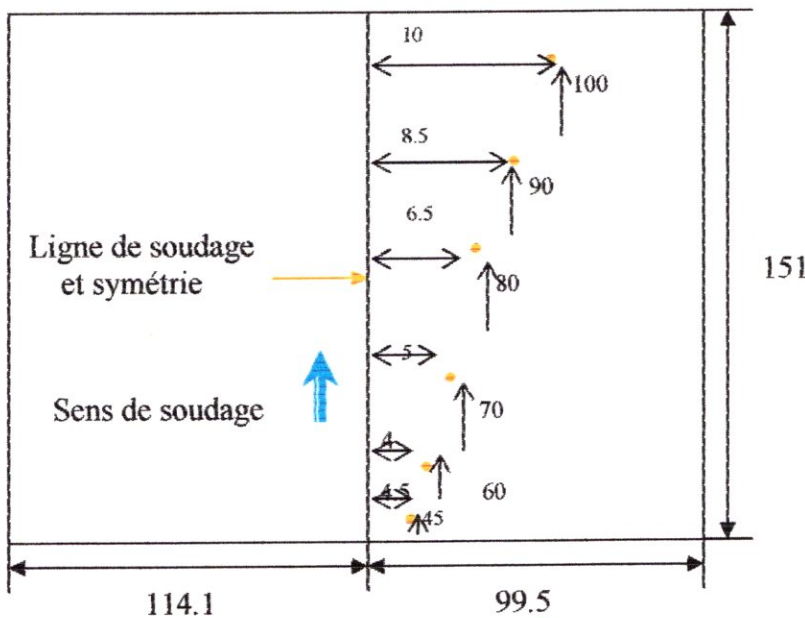
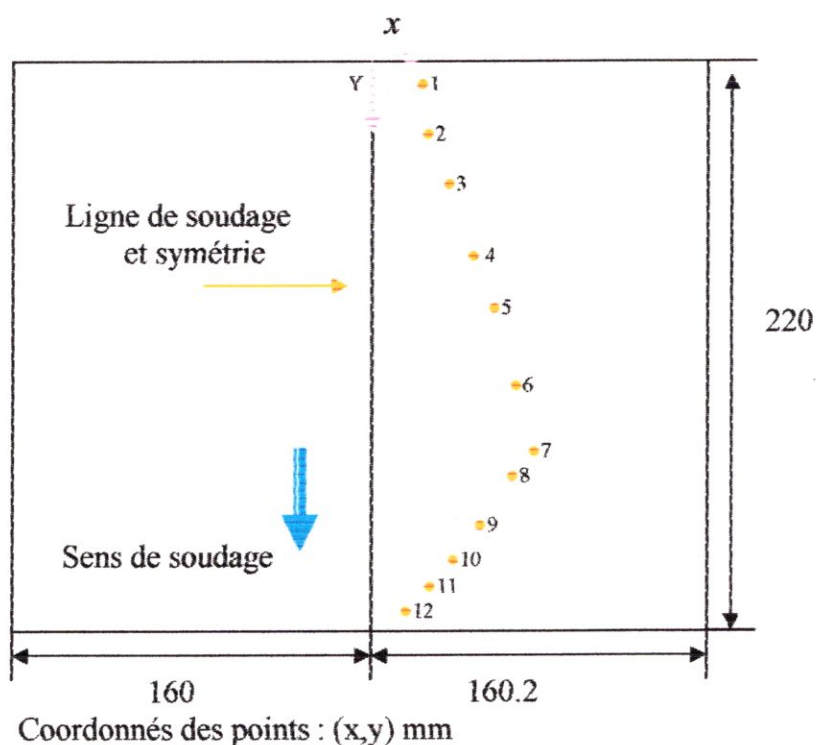


Fig II-2-A: La position des thermocouples sur la plaque A 3 avec épaisseur 3mm.

Paramètre de soudage :

Tôle N°3-2024-T3	Long.cordon (mm)	Intensité (A)	Tension (V)	Temps (sec)	Débit du gaz L/mn	Gaz de protection
1 ^{ère} Passe	145	78	15	148.82	11	Argon
2 ^{ème} Passe	140	92	12	86.50	11	Argon



1(2.5, 40); 2(3.5, 55); 3(5,71); 4(5,80); 5(6,90); 6(9,100); 7(11,120); 8(8,130); 9(5,140);

10(4.5, 150); 11(4,165); 12(3,180)

Fig II-2-B: La position des thermocouples sur la plaque A 5 épaisseur 1.94mm

Paramètre de soudage :

Tôle N°5 2024-T3	Long.cordon (mm)	Intensité (A)	Tension (V)	Temps (sec)	Débit du gaz L/mn	Gaz de protection
1 ^{ère} Passe	160	56	15	181	11	Argon
2 ^{ème} Passe	157	60	14	124	11	Argon

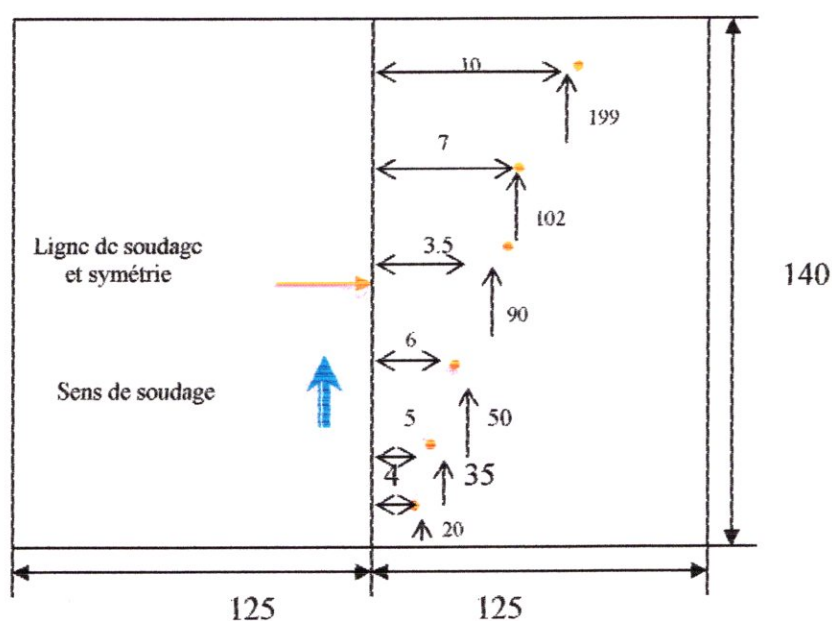


Fig II-2-C: Schéma des thermocouples sur la plaque A 8 .épaisseur 1.18mm

Paramètre de soudage :

Tôle N°8	Long.cordon (mm)	Intensité (A)	Tension (V)	Gaz de protection	Temps (sec)	Débit du gaz L/mn
7075-T6						
1 ^{re} Passe	128	56	17	Argon	104	11

• **SOUDEUSE DES THERMOCOUPLES :**

Soudeuse par résistance électrique qui a deux sortie (cathode et anode) l'un et placer sur la plaque ou l'on veut planter les thermocouples (les capteurs de température) et l'autre fixée sur le thermocouple (voir figure ci-dessous).



Fig II-3 Soudeuse des thermocouples.

• **ENREGISTREUR THERMIQUE:**

L'enregistreur thermique ELTEK, associe avec logiciel ECUREUILS serie1000

-Vue D'ensemble des boutons d'opération :

Les boutons d'opération permettent l'installation de toutes les fonctions majeures du collecteur des données

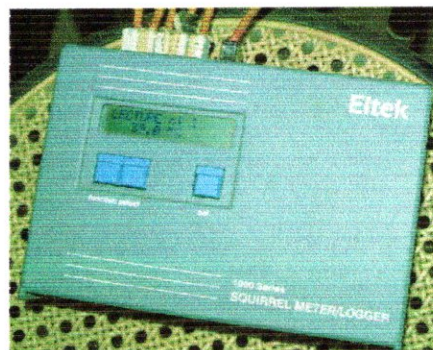


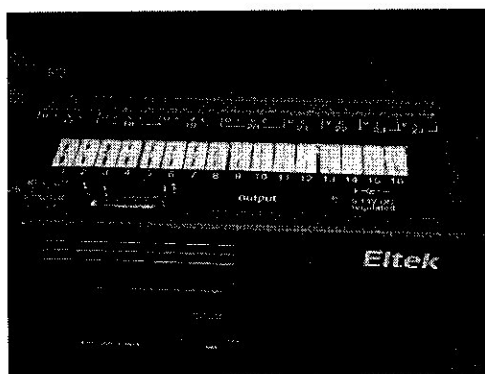
Fig II-4 enregistreur thermique

Function : sélectionne fonction

Select : sélectionne cannelles fonction

Sel : est utiliser pour charger les configuration

Les fonctions du collecteur des données :



Ces instructions sont commune pour tous les collecteurs de données de la série 1000 ; les détails des transfert de données, d'analyse et d'opération a distance ne sont pas compris des instructions distinctes sont fournie avec chaque programme d'ordinateur.

l'enregistrement :

Cette fonction vous permet de :

- afficher le nombre des mesures présentes dans la mémoire.
- effacer toute les mesures emmagasiner
- afficher le nombre d'étapes individuelles enregistrées

LECTURE : affiche la valeur des canaux sélectionnés.

HEUR/DATE : affiche l'heure et la date effectives sur deux lignes.

HEUR/ DATE DE DEPART : cette opération vous permet de régler une heur et date future de départ d'enregistrement.

INT ENR/MESURE :(intervalle enregistrement/mesure) : est utilisée pour régler les intervalles de temps lorsque les mesures sont prises et emmagasiner dans la mémoire.

SORTIE : pour la sortie de données enregistrées sur un ordinateur.

MODE : pour sélectionner le genre d'enregistrement requis c'est-à-dire l'intervalle moyenne.

CONRIGURATION CANAUX : pour sélectionne les canaux sur lesquels vous désirez enregistrer les données.

ETAT : l'information d'état suivante ; pertinente au collecteur est affichée :

- a)la tension de batterie interne

- b) le nombre de jours d'autonomie valable de la batterie en cours d'enregistrement
- c) taille de mémoire
- e) heure d'activation de la sonde (jusqu'à 60 seconde ; avant prise de mesure).
- f) configuration du format date.

II-4-2/ CARACTERISATION METALLOGRAPHIQUE :

Introduction :

En général, les opérations de formage et d'assemblage notamment le soudage, conduisent à des pièces contenant des contraintes résiduelles de fissurations.

Celles-ci peuvent modifier considérablement leur tenue ultérieure en provoquant des déformations, ou en exerçant des effets néfastes ou bénéfiques sur la fissuration. Il s'avère donc très important d'apprécier convenablement ces contraintes résiduelles.

Enfin, et surtout il faut déterminer les propriétés mécaniques des matériaux pour dimensionner les structures de façon à éviter divers modes de ruines: par flambage, la déformation plastique, la rupture brutale ou la rupture différée par fatigue, Corrosion sous contraintes ou fluage. Il est indispensable de maîtriser de mieux ces questions en raison tant des exigences accrues de sécurité, dans l'énergie nucléaire et l'énergie susceptible d'être apportée par une meilleure durabilité.

II-4-2-1/caractérisation non destructifs:

Se sont les plus employés, cependant aucun d'eux n'est parfait: chacun détecte facilement un défaut; certains (radiographie, gammagraphie par exemple) demandent une certaine expérience pour interpréter les résultats obtenus.

La bonne caractérisation nécessite des investigations qui permettent de révéler les différentes propriétés et caractéristiques, structurales et mécaniques. [11]

On a opté pour les contrôles non destructifs suivants:

- Contrôle radiographique;
- Examen métallographique;

A-Contrôle radiographique:

La radiographie est un examen non destructif de la structure des matériaux, qui relève les défauts internes engendrés par le formage, soudage.. etc., consistant à produire des images radiographiques à l'aide d'un rayonnement ionisant.

Dans notre étude nous avons fait un contrôle radiographique sur les différentes éprouvettes que nous avons préparé voir Fig (II-5).

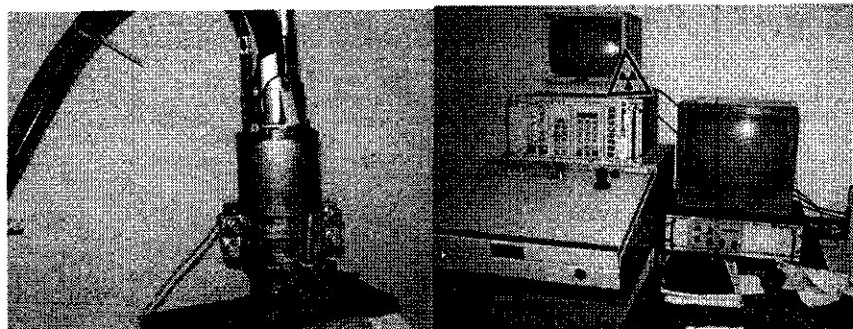


Fig (II-5) équipements de radiographie -CSC.

B. méthodes d'examen métallographiques:

La connaissance des propriétés des matériaux passe par la détermination des phases qui le composent, quand à leurs formes, leur distribution et leur qualité. Ces paramètres sont regroupés sous le nom de structure du matériau. La définition de la structure va dépendre de l'échelle (l'agrandissement) à la quelle on observe, et il est donc important de préciser, lorsque l'on parle de structure, s'il s'agit de structure macroscopique ou microscopique.

a) macrographie:

L'examen macroscopique (examen à l'oeil nu) ou macrographique (examen avec une optique comme une binoculaire) permet de relever la structure métallographique homogène ou hétérogène d'une coupe transversale d'une éprouvette soudée. Le réactif chimique appliqué sur la surface polie de l'éprouvette révèle, par dissolution à vitesse inégale, les hétérogénéités physiques et chimiques de la surface métallique examinée. Voir Fig (II-6).

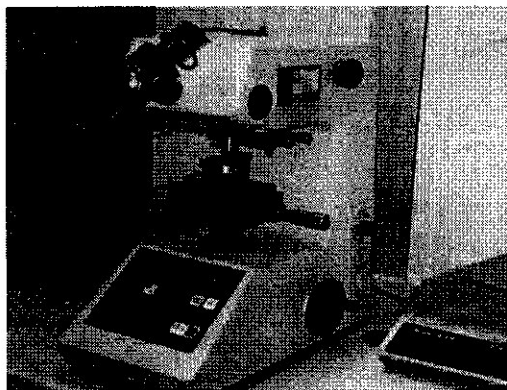


Fig (II-6) duromètre -CSC.

- **Préparation de l'échantillon d'examen :**

Les éprouvettes sont prises à partir des tôles soudées, la coupe est réalisée dans le sens transversal de la soudure, avec lubrification pour éviter l'échauffement.

La surface à examiner est d'abord la surface naturelle de la pièce, c'est-à-dire sa périphérie est les cassures éventuelles. L'examen interne visuel exige des coudes ou des cassures en laboratoire: ce sont des surfaces préparées.

- **Polissage de l'échantillon d'examen :**

Le pré- polissage de la surface à examiner est réalisé avec une polisseuse et sous eau et de disque abrasifs de granulométrie d'environ P200-P400-P600-P800-P1000-P1200. La vitesse de rotation est comprise entre 150 et 300 tours/minutes environ. L'échantillon subit une rotation de 90° à chaque changement de granulométrie pour effacer les raies précédentes de polissage. La durée de polissage est environ 2 minutes par granulométrie. voir Fig (II-7).



Fig (II-7) polisseuse -CSC.

- **Attaque chimique de l'échantillon d'examen:**

L'éprouvette est immergée dans le bain d'attaque à l'aide d'une pince de manipulation, ou bien le réactif est disposé sur la surface de l'éprouvette. L'opérateur averti doit surveiller l'évolution de l'attaque chimique et l'arrêter par neutralisation (exp. L'eau distillée) Une fois terminée. (Voir Fig II-8).

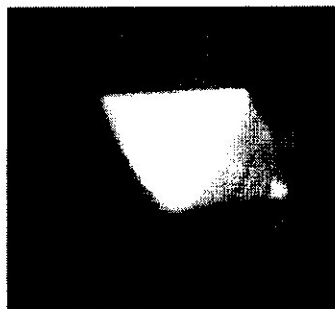


Fig (II-8) Echantillon a l'état miroir.

- **Réalisation des macrographies:**

Grâce à un appareil métallographie (marque ZEISS) du laboratoire de métallurgie du C.S.C, nous avons pris les macrographies avec un grossissement de 50 et 200, suivant l'axe (XY).

- b) Micrographie:**

Cet examen a pour but de mettre en évidence la structure de l'échantillon (les changements structuraux dus à l'échauffement dans le cas des assemblages soudés) lors de l'observation au microscope Optique. Les échantillons à utiliser sont relevés de la tôle soudée et selon l'axe (XY).

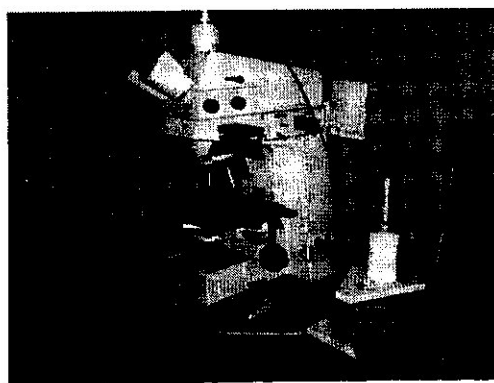


Fig (II-9) microscope optique -CSC.

- **polissage de l'éprouvette d'examen:**

Le pré-polissage de la surface à examiner est réalisé avec une polisseuse et sous l'eau et de disque abrasifs de granulométrie d'environ P-200-P400-P600 P800-P1000-P-1200. La vitesse de rotation est comprise entre 150 et 300 tours/minutes environ. L'échantillon subit une rotation de 90° à chaque changement de granulométrie pour effacer les raies précédentes de polissage. La durée de polissage est environ 2 minutes par granulométrie.

- **Attaque chimique de l'éprouvette d'examen:**

L'éprouvette est immergée dans le bain d'attaque à l'aide d'une pince de manipulation, ou bien le réactif est disposé sur la surface de l'éprouvette. L'opérateur averti doit surveiller l'évolution de l'attaque chimique et l'arrêter par neutralisation (exp. L'eau distillée) Une fois terminée.

- **Observation de l'éprouvette d'examen:**

La macrographie permet de vérifier la compacité de la coupe de la soudure, de définir les différentes zones de la soudure et la géométrie des points des soudures.

II-4-3/CARACTERISATION MECANIQUE :

II-4-3-1/ESSAI DE MICRODURETE:

A)Principe :

Que ce soit pour une dureté **Brinell**, **Rockwell** ou **Vickers**, l'essai consiste à appliquer sur une pièce à mesurer, un pénétrateur (dont la forme varie selon le type de l'essai) sous une charge F (variable).

La dureté est proportionnelle au quotient de la force " F ", par l'aire " S " de la surface déformée par le pénétrateur sur le matériau.

L'essai de microdureté est une technique idéale pour caractériser les cinétiques de durcissement structural. Elle permettra par la suite de limiter le nombre d'éprouvettes de tractions nécessaires à une caractérisation complète des propriétés plastiques des différents états de structure.

B)Mesure de la dureté en zone affectée thermiquement(ZAT) :

La mesure de la dureté est d'un emploi générale pour caractériser un matériau ;qu'il s'agit de s'assurer de sa résistance mécanique ou de vérifier l'absence de fragilité ou de fragilisation par suite des différents traitements mécaniques ou thermique qu'il a pu subir.

Une augmentation de la dureté est généralement associée à une moindre ténacité, aussi .l'accroissement de dureté observée dans les zones thermiquement affectées par le soudage peut être l'indice d'un risque de fissuration à froid sous cordon ou de corrosion sous tension ;d'où l'intérêt de la détermination de cette dureté.

Le terme«dureté sous cordon»qui est d'usage fréquent,courre aussi bien les valeurs obtenues près d'un dépôt de soudure ou sous une première passe ,que cette observée dans les zones affectées thermiquement des assemblages entièrement achèves.

Le présent document fait le synthèse de la situation dans ce domaine en évoquant et on comparant les efférentes méthodes utilisés pour la mesure de la dureté, le choix de la charge, et son domaine d'application ainsi que le prélèvement ;la préparation des échantillons destinées aux mesures ainsi que le choix le type de filiation de dureté sont également passés en revue l'influence de la charge sur la précision des mesures et l'expression des résultats sont étudiées.

C)Choix de la méthode de mesure de dureté:

Les zones thermiquement affectées qu'il est possible d'observer près de soudure ont des largeurs qui varient en fonction du procédés de soudage et de l'énergie mise en jeu pour les procédés les plus couramment utilisées ;des largeurs varient de quelques

dixième de millimètres à quelques millimètres. La mesure de dureté de ces zones doit donc se faire par des méthodes utilisant des charges qui seront par le fait même peu élevées. Les méthodes BRINNELLE donc à rejeter ; les méthodes ROCKWELL B et C, même avec des charges réduites (dureté dite : « superficielles ») ne peuvent convenir. De plus ces deux méthodes pour couvrir l'ensemble des duretés, exigent un changement d'échelle ce qui rend leur emploi peu pratique.

Par contre la méthode de Vickers convient bien en couvrant l'ensemble de duretés les plus faibles au plus élevées, de plus avec le même pénétrateur on varie les charges qui peuvent varier de quelque domaine de manière pour la micro dureté jusqu'à 100Kg.

D) Choix de la charge:

Les charges importantes donnent des valeurs globales et ne sont pas utilisables par suite de faibles dimensions, des zones à explorer, à l'opposé, les charges de quelques dizaines de grammes s'avèrent trop faibles et donnent des valeurs à l'échelle du grain.

Les charges qui sont les plus couramment retenues par les normes ou les cahiers de charges sont les suivantes : 1kgf-2.5kgf (la norme roumaine STAS 5540/577 indique la charge de 3kgf, 5kgf et 10kgf soit 29.42N, 49.03N et 98.07N).

Les précisions qu'il est possible d'attendre avec ces différentes charges sont examinées.

E) Domaine d'application:

Il s'agit de rechercher la zone la plus dure de la ZAT, la méthode s'applique principalement à des dépôts au une série passe exécutées sur tôles avec des énergies bien définies, avec ou sans préchauffage pour les cas par exemple de recherches des meilleurs paramètres de soudage. [10]

➤ ESSAIS VICKERS :

L'essai consiste à imprimer dans la pièce un pénétrateur en forme de pyramide droite à base carrée d'angle au sommet 136° sous une charge F, et à mesurer les diagonales d₁ d₂ sur la surface après enlèvement de la charge. La dureté Vickers est proportionnelle au rapport F/S. S = surface de l'empreinte considérée comme pyramide droite.

● Symboles et désignations :

- angle au sommet du pénétrateur : 136°.

F : charge d'essai en newtons à ± 1%.

d : diagonale moyenne de l'empreinte en mm.

$$d = (d_1 + d_2) / 2 \quad HV = 0,189 F/d^2.$$

● Conditions d'essais :

- L'essai est effectué à température ambiante.

-La charge est appliquée progressivement sans chocs, ni vibrations et maintenue à sa valeur finale pendant 10 à 15 s.

-On a choisi Hv0.2 (200 g) et Hv0.05 (50g).

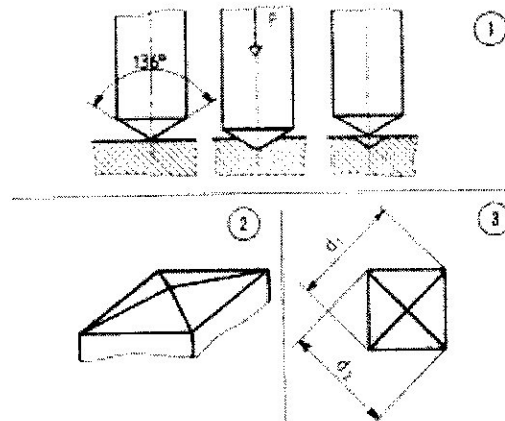


Fig (II-10) représentation schématique de l'essai de Vickers

II-4-3-2/ESSAI DE TRACTION :

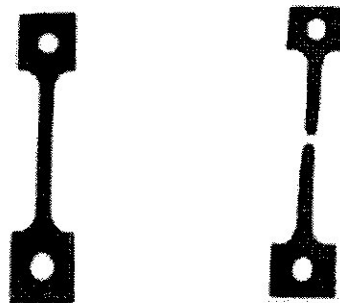
II-4-3-2-1/Définition :

Solliciter une éprouvette en traction uniaxiale jusqu'à rupture pour déterminer ses caractéristiques mécaniques.

Résistance à la traction, caractéristiques d'élasticité, capacité d'allongement

II-4-3-2-2/Détermination après essai :

F_m = charge maximale de l'essai
 F_e = charge apparente à limite d'élasticité
 F_u = charge ultime à l'instant de rupture
 L_u = Longueur ultime entre repères



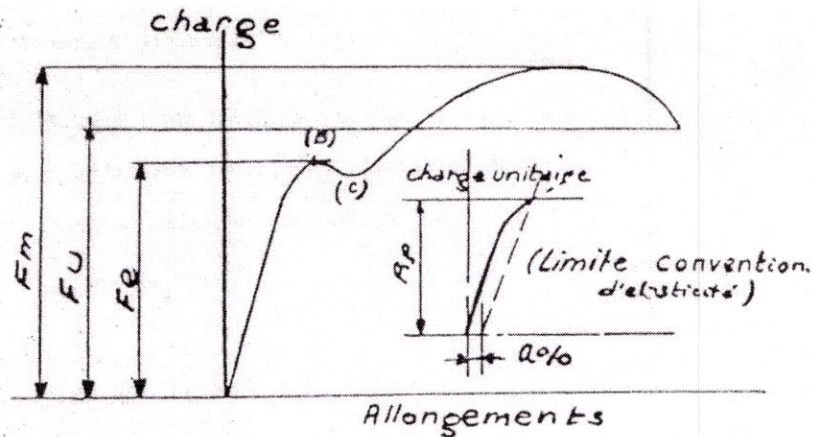


Fig (II-11) Caractéristiques de l'essai de traction

d (mm) : Diamètre de la section, lorsque l'éprouvette est à section circulaire, ou dans le cas d'autres sections, diamètre du plus petit cercle circonscrit à la section ~~(2)~~.

a (mm) : Epaisseur de l'éprouvette plate.

b (mm) : Largeur de l'éprouvette plate.

L_0 (mm) : Longueur initiale entre repères.

S_0 (mm²) : Section initiale de la partie calibrée.

L_U (mm) : Longueur ultime entre repères.

S_U (mm²) : Section minimale après rupture.

F_E (N) : Charge à la limite apparente d'élasticité.

R_e (N/mm²) : Charge unitaire à la limite apparente d'élasticité.

R_{eH} (N/mm²) : Limite supérieure d'écoulement, (B) sur la courbe.

R_{eL} (N/mm²) : Limite inférieure d'écoulement, (C) sur la courbe.

F_m (N) : Charge maximale.

R_m (N/mm²) : Résistance à la traction (F_m/S_0).

F_u (N) : Charge ultime, ou charge à l'instant de la rupture.

$L_u - L_0$ (mm) : Allongement rémanent après rupture.

A (%) : Allongement pour-cent après rupture $L_u - L_0/L_0 \cdot 100$.

ZC (%) : coefficient de striction $(S_u - S_0)/S_0 \cdot 100$.

Z_U (%) : Allongement de striction $S_u - S_0/S_U \cdot 100$.

R_p (N/mm²) : Charge unitaire à la limite conventionnelle d'élasticité. [9]

II-4-3-2-3/Principe :

Principe de l'essai. (L'essai de traction) est exécuté sur une éprouvette de forme et de dimensions déterminées. Un effort croissant, de façon continue, est exercé suivant l'axe de cette éprouvette, jusqu'à rupture.

Une éprouvette de traction se compose d'un corps prismatique de section circulaire ou rectangulaire, prolongé à ses extrémités par deux têtes permettant de la saisir dans les systèmes d'amarrage de la machine de traction. [9]

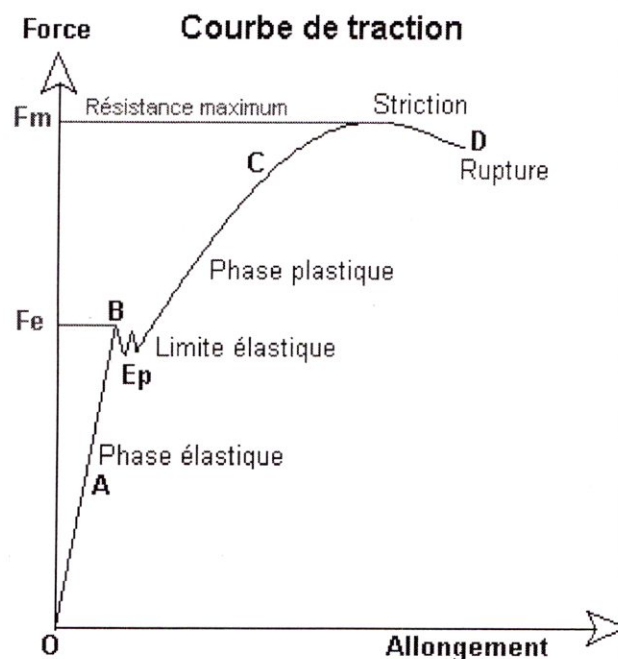
Une machine de traction se compose

- d'un organe de fixation de l'éprouvette comportant deux parties, l'une fixe et l'autre mobile
- d'un organe producteur de l'effort agissant sur la partie mobile
- d'un organe mesureur et enregistreur.

Caractéristiques assurées et phénomènes observés au cours de l'essai.

L'organe enregistreur fournit un diagramme effort-déformation (fig. III-11) sur lequel on observe une partie rectiligne correspondant à une déformation donnant lieu à un allongement proportionnel à la charge, ou allongement élastique, jusqu'à une valeur de la charge P_0 qui est la limite d'élasticité vraie, puis une partie curviligne BC représentant une déformation au cours de laquelle il y a allongement plastique ou permanent. [9]

Entre ces deux parties, on constate parfois l'existence d'un palier AB correspondant à une charge P_1 appelée limite apparente d'élasticité ou limite d'écoulement.



Fig(2,12) Le diagramme conventionnel de traction.

La **phase élastique** est représentée par la ligne **OB**. L'éprouvette se déforme sous l'action de la charge et revient approximativement à sa longueur initiale si la charge est supprimée.

La **phase plastique** est représentée par la ligne **BC**. Les déformations de l'éprouvette sont permanentes et irréversibles.

La **phase de striction** est représentée par la courbe entre **F_m** et **D**. La **rupture** de l'éprouvette est représentée par la lettre **D**.

↓ **Remarques générales :**

Dans le cas des matériaux fragiles comme les aciers bruts de trempe et les fontes dites grises, il n'y a pas de déformation plastique, R_e et R_m sont confondues et l'allongement est nul.

L'essai de traction définit un ensemble de caractéristiques dont les principales sont

1 : La résistance à la traction R charge unitaire maximum atteinte au cours de l'essai, exprimée en newtons par millimètre carré de la section initiale.

2 : L'allongement après rupture exprimé en pourcent de la longueur initiale entre repère L_0 par le rapport : $L_u - L_0/L_0 \cdot 100$.

L_u : Longueur entre repères en fin d'essai.

3 : La limite d'élasticité dite de proportionnalité charge maximum, par millimètre carré de section, à partir de laquelle les déformations cessent d'être proportionnelles aux efforts.

4 : La limite conventionnelle d'élasticité à 0.2%

Dans certains cas, la limite d'élasticité ne peut pas être déterminée d'une façon certaine sur le diagramme. On définit alors la limite conventionnelle d'élasticité à 0,2 % comme étant la charge correspondant à un allongement permanent de 0,2 %.

Mode opératoire :

Il est indispensable de procéder périodiquement, ou à la suite de toute réparation, à l'étalonnage des machines.

Il est nécessaire que le mode d'attache de l'éprouvette soit tel que celle-ci subisse l'effort uniquement suivant son axe, afin d'éliminer l'influence de toute flexion parasite.

En général, les machines possèdent des rotules qui supportent des mordaches, de telle sorte que l'éprouvette se place suivant la direction de l'effort. [9]

• *L'usinage des éprouvettes :*

L'usinage des éprouvettes sera fait en évitant tout écrouissage et tout échauffement, et sera terminé par des petites passes enlevant de 2 à 3 dixièmes de millimètre d'épaisseur, en tenant compte des tolérances indiquées. Au besoin, l'usinage sera parfait par un polissage au papier abrasif.

La vitesse linéaire de traction doit être aussi constante et aussi uniforme que possible, pour que les résultats soient comparables au cours d'essais sur un même lot d'éprouvettes.

Les valeurs de résistance mécanique ou charge de rupture :

La valeur de résistance mécanique d'un matériau peut varier de 80 N/mm² pour certains aluminiums à 2000 N/mm² pour certains aciers spéciaux.

Rappel: 1 MPa = 1 N/mm² = 0,102 Kgf/mm²

Les vitesses d'essai de traction :

- **Acier** : Vitesse inférieure à 0,15 Lo (mm/min) ou inférieure à 30 Mpa / s
- **Cuivre** : Vitesse inférieure à 0,006 Lo (mm/min) ou inférieure à 10 Mpa / s

Aluminium : Vitesse inférieure à 0,009 Lo (mm/min) ou inférieure à 10 Mpa / s

Détermination de l'allongement A en % :

L'allongement est la capacité d'un matériau à se déformer et à s'allonger sans rupture (ductilité du matériau). La longueur de référence est déterminée par deux coups de pointe réalisés avant la traction. La distance entre repères est généralement de 5 x d (d est le diamètre calibré de l'éprouvette cylindrique)

Si la distance initiale entre repères est de 50 mm et la distance mesurée, après traction, est de 70mm, nous pouvons en déduire que l'allongement du matériau est de 40%.

$$\text{Allongement (\%)} = ((L_u - L_o) / L_o) \times 100 = ((70 - 50) / 50) \times 100 = 40\%$$

A partir des mesures ci-dessus, il est possible de déterminer **R_m** la résistance mécanique à la traction, **R_e** la Limite élastique, **A%** l'Allongement...

Mais il est aussi possible de réaliser des essais de traction à chaud, de flexion, de compression, de cisaillement...

Machines présentes au laboratoire :

Les essais peuvent être effectués sur des machines de 500 N à 100 KN

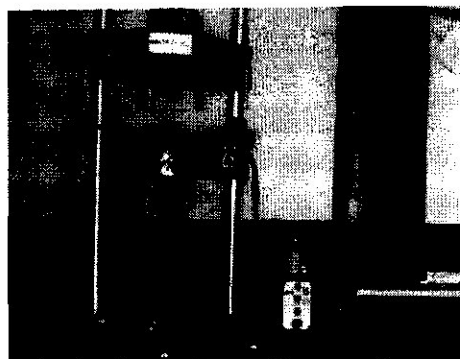


Fig (II-12) Machine de l'essai de traction (CSC).

II-4-3-2-4/TYPES D'ÉPROUVETTES À EMPLOYER DANS LE CAS DE PRODUITS MINCES :

Tôles, feuillards et plats d'épaisseur comprise entre 0.1mm ET 3mm.
Des précautions particulières peuvent être nécessaires pour les produits d'épaisseur inférieure à 0.5mm.

● DIMENSIONS ET FORME DE L'ÉPROUVETTE :

L'éprouvette présente, en règle générale, des têtes d'amarrage plus large que la partie calibrée. la longueur doit être raccordée à ces têtes par un conge des rayon au moins égale à 12mm (voire FigII-11). la largeur de ces têtes doit être de 20mm au moins de 40mm au plus.

L'éprouvette peut aussi consister en une bonde a cotes parallèles pour les produits ayant une largeur inférieure ou égale à 20mm. la largeur de l'éprouvette peut être celle du produits.

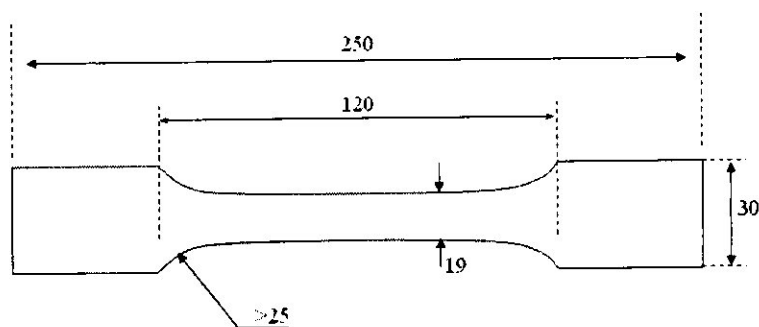


Fig (II-13) Eprouvette d'essai de traction.

II-4-3-2-4-1/ PREPARATION DES EPROUVETTES :

La préparation des éprouvettes doit être réalisée de manière à ne pas porter atteinte aux caractéristiques du métal .en particulier, les zones éventuellement écrouies par le découpage à la cisaille ou à la presse doivent être enlevées par usinage.

Pour les matériaux de très faible épaisseur,il est recommande que les bandes de même largeur soient coupées et reconstituées avec des couches intermédiaires en papier résistant à l'huile de coupe . Il est recommandé d'assembler chaque petit paquet de bande plus épaisse de chaque coté avant de l'usiner à la dimension définitive de l'éprouvette.

II-4-3-2-4-2/ DETERMINATION DE L'AIRES DE LA SECTION INITIALE (S_0) :

L'aire de la section initiale est calculée à partir des mesures des dimensions de l'éprouvette.

L'erreur dans la détermination de l'aire de la section initiale ne doit pas dépasser ± 2 %.étant donné que la grande partie de cette erreur provient normalement de la mesure de l'épaisseur de l'éprouvette,l'erreur sur la mesure de la largeur ne doit pas dépasser ± 0.2 %.



Chapitre III

Resultats et interpretations

CHAPITRE III : RESULTATS ET INTERPRETATIONS

III-1/INTRODUCTION :

Des essais ont été effectués à l'atelier du C.S.C (Alger) par un soudeur homologué. Le procédé était le soudage TIG sans métal d'apport des tôles minces d'aluminium (nuances 2024 et 7075) de différentes dimensions.

Afin d'étudier l'effet de ce type de procédé de soudage sur la qualité et les propriétés de soudure (thermiques, métallographiques et mécaniques), les résultats obtenues sont cités et récapitulés dans ce chapitre.

III-2/ IDENTIFICATION DES MATERIAUX :

•ANALYSE DE LA COMPOSITION CHIMIQUE :

Ces analyses sont effectuées au laboratoire de métallurgie C R D de Annaba, en utilisant la fluorescence X.

Tableau III- 1 : composition chimique réelle

Aluminium 2024 :

élément	<i>Cu</i>	<i>Fe</i>	<i>Si</i>	<i>Cr</i>	<i>Mg</i>	<i>Mn</i>	<i>Zn</i>	<i>Ti</i>
% en masse	4.32	0.31	0.11	0.02	1.31	0.56	0.10	0.04

Tableau III- 2 :

Aluminium 7075 :

élément	<i>Cu</i>	<i>Fe</i>	<i>Si</i>	<i>Cr</i>	<i>Mg</i>	<i>Mn</i>	<i>Zn</i>	<i>Ti</i>
% en masse	1.53	0.22	0.10	0.19	2.50	0.03	5.63	0.04

Remarque :

L'analyse chimique présenté par ces tableaux, montre bien la correspondance de ces pourcentages avec leurs nuances.

III-3/CYCLES THERMIQUES :

Les figures ci-dessous montre les cycles thermiques enregistrés par l'appareil SQUIREL série 1000, lors de l'opération de soudage des tôles 3-5-8-10 :

Symboles des tôles	A-3	A-5	A-8	A-10
Nuance	2024-T3	2024-T3	7075-T6	2024-T3
Epaisseur (mm)	3	1.94	1.18	1.80

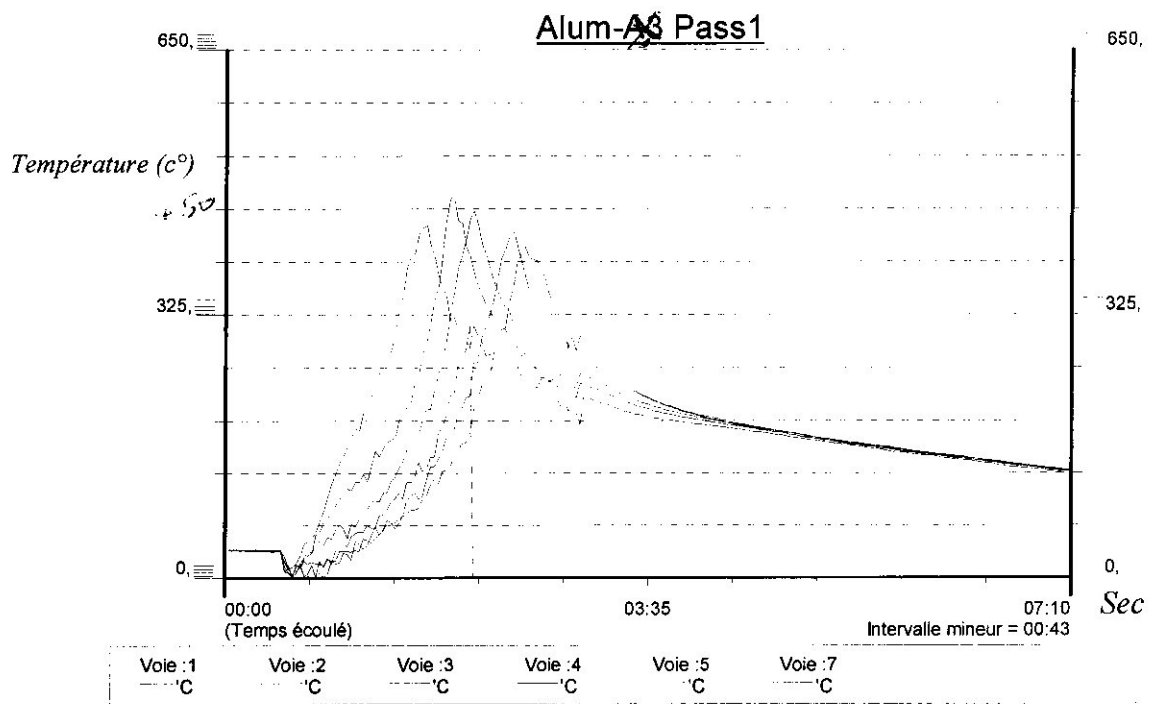


Fig (III-1) Cycles thermiques de chaque thermocouple implanté dans la tôle -3

Remarque :

On remarque dans cette courbe que la voie (4) a eu une discontinuité totale a partir de 2.01(s) a cause de la déconnection du thermocouple lors de l'opération de soudage.

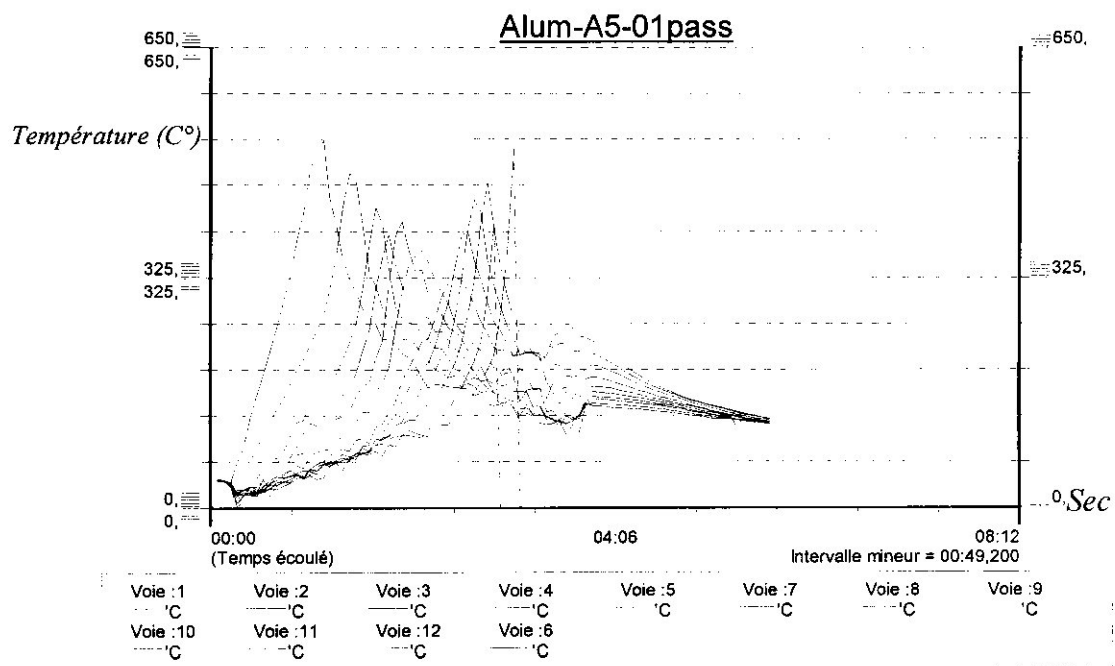


Fig (III-2) Cycles thermiques de chaque thermocouple implanté dans la tôle -5

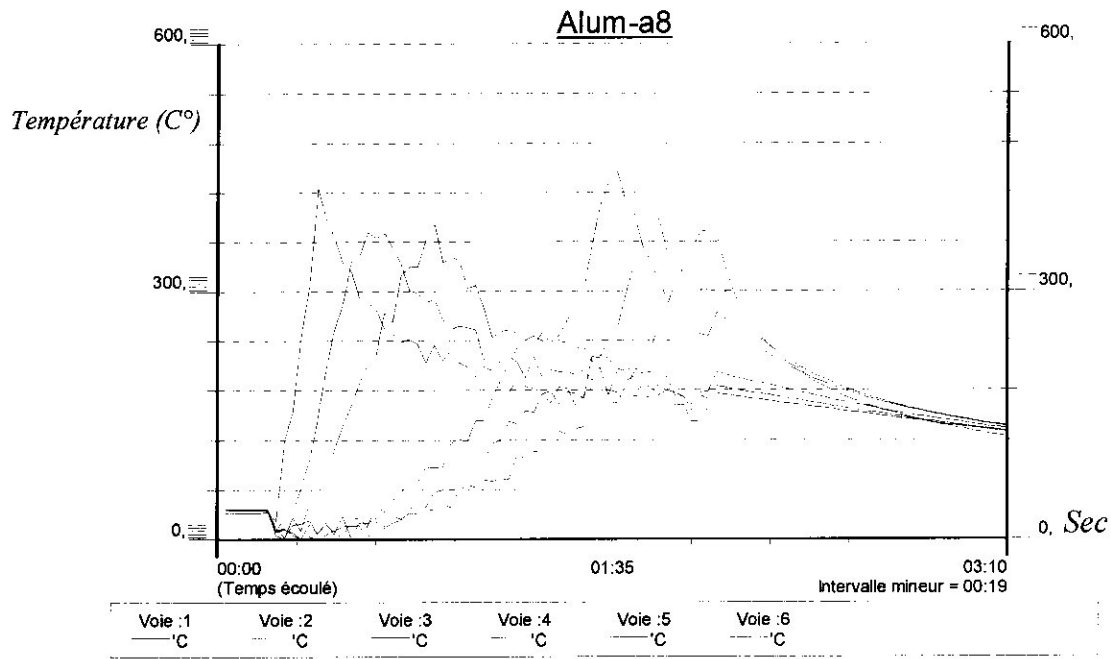


Fig (III-3) Cycles thermiques de chaque thermocouple implanté dans la tôle -8

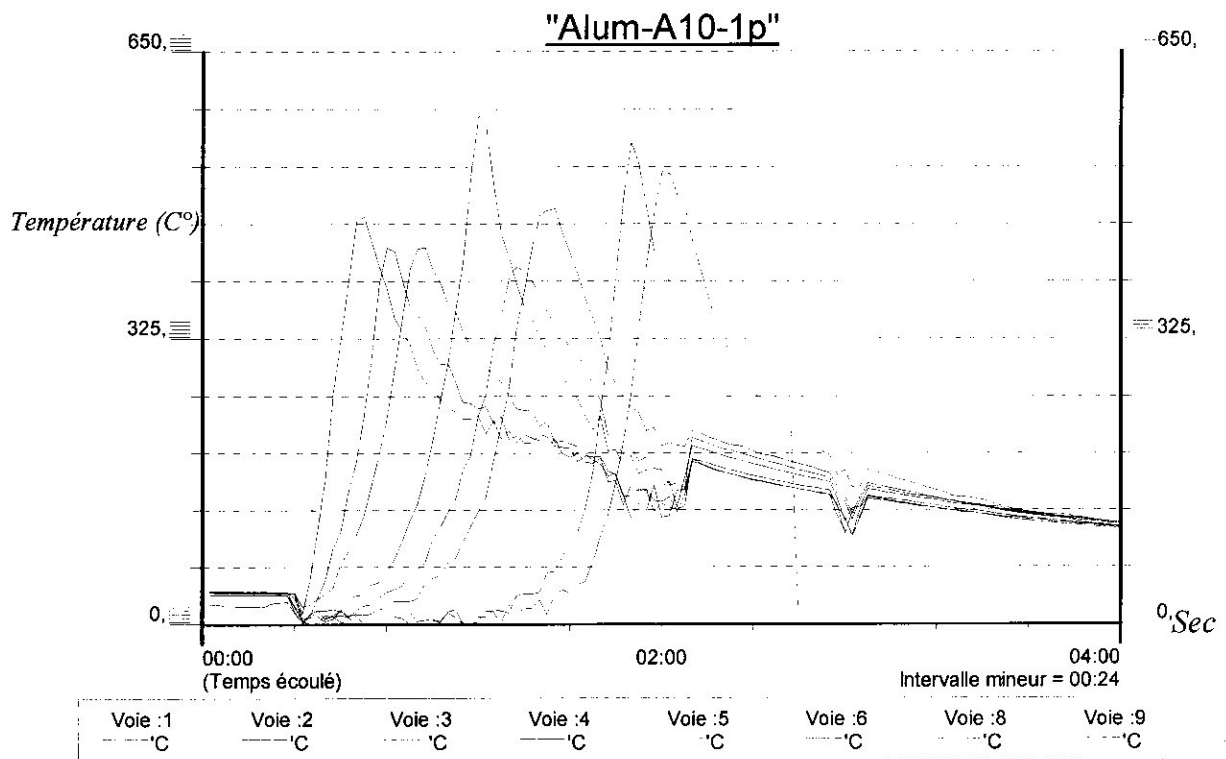


Fig (III-4) Cycles thermiques de chaque thermocouple implanté dans la tôle -10

✚ **Interprétations :**

Les courbes ci-dessus représentent les cycles thermiques de chaque point, voie : 1, 2, 3, 4,5...etc. il est clair que les points (1 et 2) atteignent un pic supérieur que les deux autres points, car leurs positions sont très proches de la ligne de soudure. Et en même

temps le point (1) atteint son pique en premier. On remarque aussi que le point (5) a le pique le plus inférieur car il est le plus éloigné par rapport au cordon.

On remarque que tous les points sont à des températures inférieures à 660 (C°), ce qui montre que la ZF est située à distance inférieure ou égale 3.5mm du centre de cordon.

Si on compare ces résultats avec les diagrammes d'équilibre des nuances, on peut estimer l'étendu de la ZAT.

III-4/CONTROLE RADIOGRAPHIQUE :

Ce contrôle nous a permis de prendre des clichés sur les différentes parties de soudure pour voir l'état de ces derniers et pour but d'éviter les défauts et de choisir des parties de cordon les plus homogènes dans l'usinage des éprouvettes.

Cordon de soudure (tôle A-3) présente des empreintes de sections faibles avec des défauts de (retassure, creux) très faibles apparents sur la zone fondue et projection du métal sur l'entourage du cordon, voir (Fig III-5).

Remarque : ZAT : zone affectée thermiquement, ZF : zone fondue, MB : métal de base.

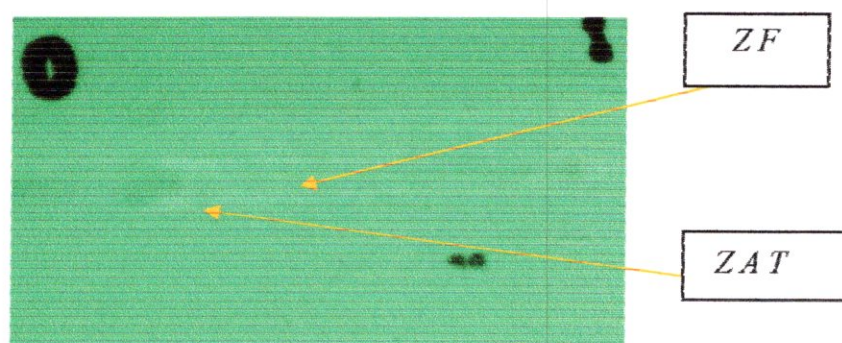


Fig (III-5) Représentation radiographique du cordon de soudure de la tôle A-3

Cordon de soudure (tôle A-5) présente des empreintes de sections grandes avec des défauts de (retassure, creux) faibles apparents sur la zone fondue et projection du métal sur l'entourage du cordon, voir (Fig III-6).

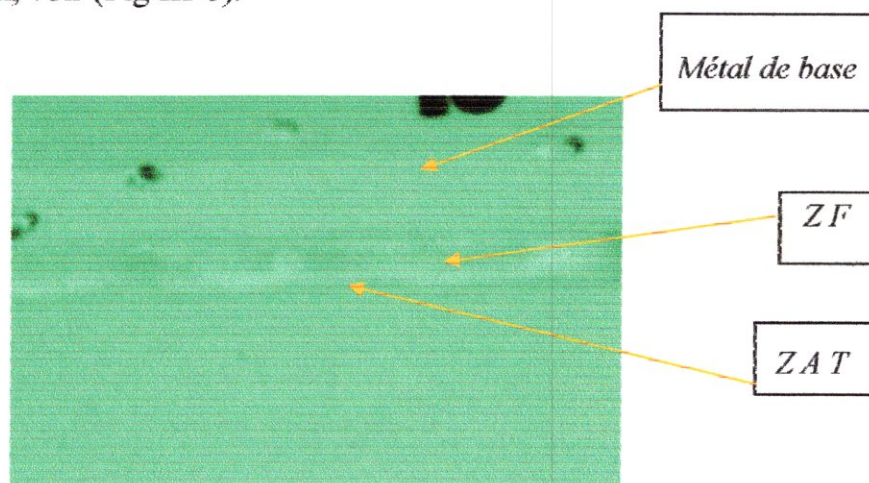


Fig (III-6) Représentation radiographique du cordon de soudure de la tôle A-5

Cordon de soudure (tôle A-10) présente des empreintes de sections très importantes par rapport aux autres cordons obtenus avec des défauts de (retassure, creux) apparents sur la zone fondue et projection du métal sur l'entourage du cordon, voir (Fig III-7).

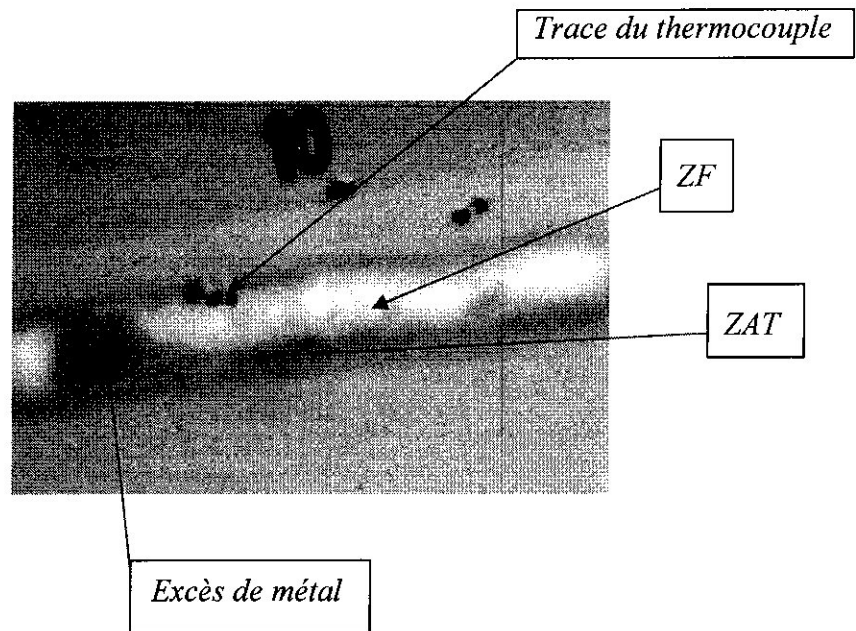


Fig (III-7) Représentation radiographique du cordon de soudure de la tôle A-10

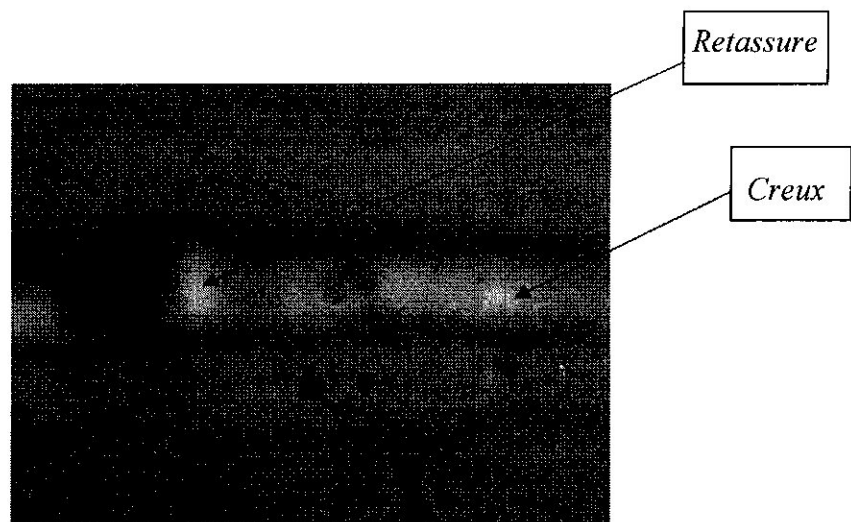


Fig (III-8) Représentation radiographique du cordon de soudure de la tôle A-10

Le choix des éprouvettes d'essais métallographiques et mécaniques est basé sur les clichés de la radiographie, on évitant les défauts rencontrés lors de l'opération du soudage (voir Fig III-7-8).

III-5/CARACTERISATION METALLOGRAPHIQUE :**III-5-1/ANALYSE MACROGRAPHIQUE :**

- Le Cordon de la tôle A-3(2024) ne présente pas de défauts au niveau de lentille (voir FigIII-9)

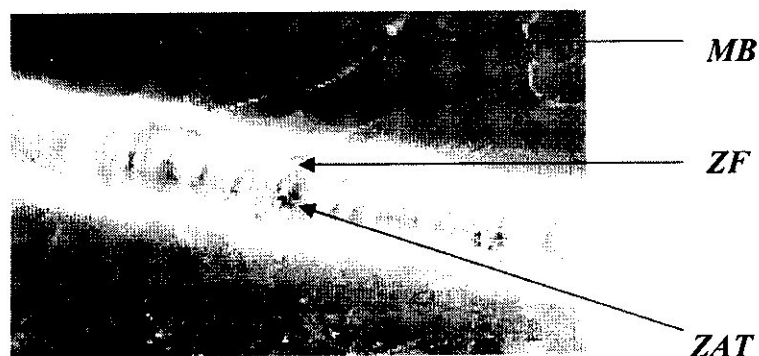


Fig (III-9-1) Représentation macrographique du cordon de soudure (A-3)

- Cordon de la tôle A-8(7075) présente un défaut à l'extrémité du cordon (une fissuration très importante) (voir FigIII-9)



Fig (III-9-2) Représentation macrographique du cordon de soudure (A-8)

- **Constataion macrographique :**

La difficulté de souder l'aluminium nuance 7075 par la méthode TIG sans métal d'apport a bien apparaît dans l'analyse macrographique présentée par une fissuration très grande sur le long du l'extrémité cordon.

III-5-2/ANALYSE MICROGRAPHIQUE :

L'analyse micrographique permet de mettre en évidence les différentes zones des joints soudés. (cet analyse fait apparaître les différentes zones d'une soudure (ZF, ZAT), et permet de calculer l'étendue moyenne de la ZAT).

Les micrographies obtenues nous ont permis au moyen d'une échelle pré-établie sur chaque photo de confirmer les dimensions des zones fondues et affectées thermiquement et ce en exploitant le contraste existant entre les différentes régions.

- L'analyse micrographique faite sur le métal de base est la suivante :

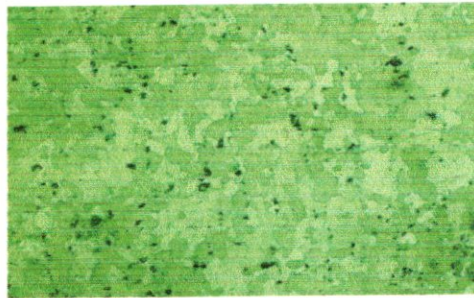


Fig (III-10) Représentation micrographique(x200) de métal de base -échantillon A-5(2024)

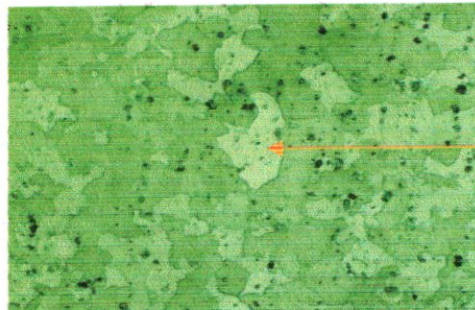


Fig (III-11) Représentation micrographique(x200) de métal de base -échantillon A-8(7075)

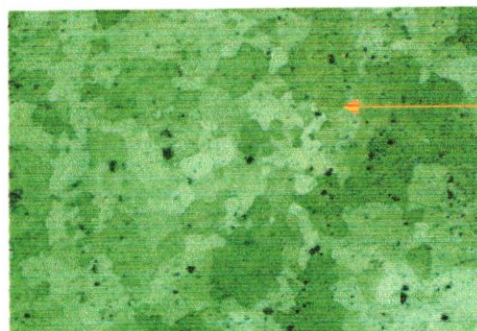


Fig (III-12) Représentation micrographique(x200) de métal de base-échantillon A-10(2024)

Les figures 10-11-12 indiquent la représentation micrographique du métal de base qui montrent une structure homogène, caractérisée par une seule phase de nos tôles (2024-7075) à l'état recuit, ainsi que la forme polygonale des grains.

On remarque aussi l'affinage des grains, que s'il y eu préalablement au traitement thermique (ecruissage suffisant)

- L'analyse micrographique faite sur la structure soudée est la suivante :

Echantillon A5 (2024) :

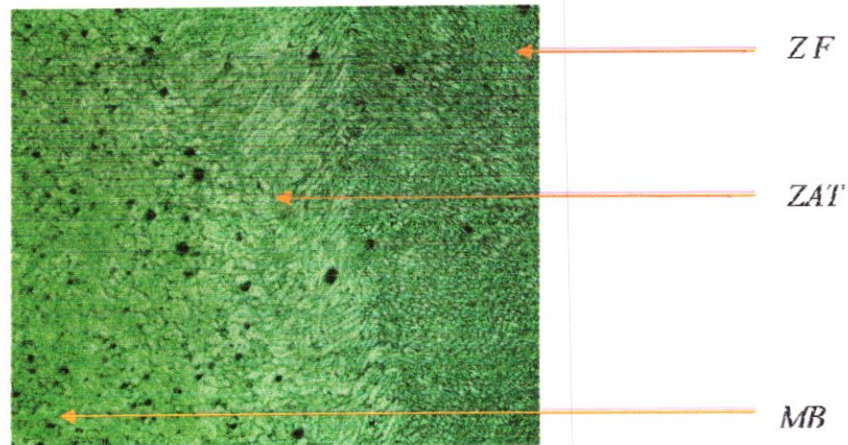


Fig (III-13) Représentation micrographique(x50) des 3 zones -échantillon A-5(2024)

La figure-13 indique la représentation de cordon de soudage, on remarque clairement l'existence de trois zones différentes MB,ZAT et ZF,ce qui rend la structure hétérogène .

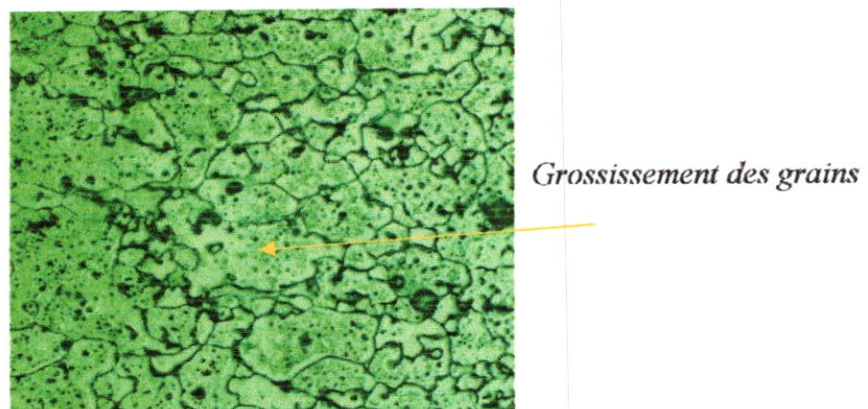


Fig (III-14) Représentation micrographique(x200) e de ZAT -échantillon A-5(2024)

On remarque aussi que les grains de tôles de métal de base 2024est plus petit par rapport à celle de la ZAT, alors l'ensemble des contraintes internes auront tendances a augmenter ; ce qui implique la l'évidence de la diminution de dureté dans la ZAT.

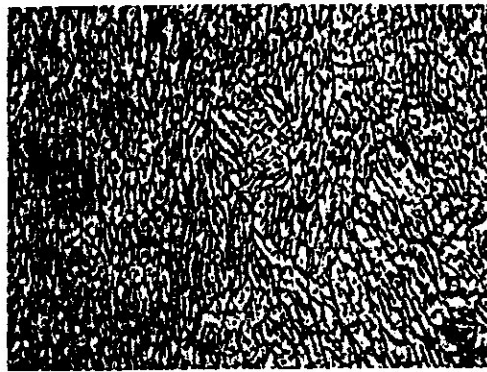
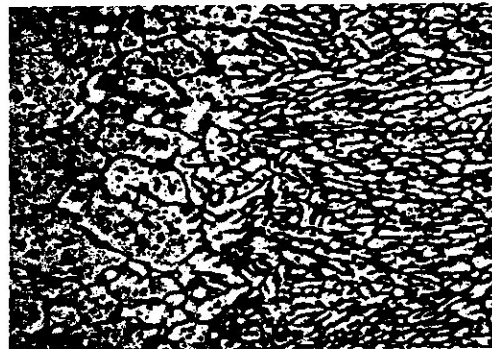


Fig (III-15) Représentation micrographique(x200) de ZF -échantillon A-5(2024)

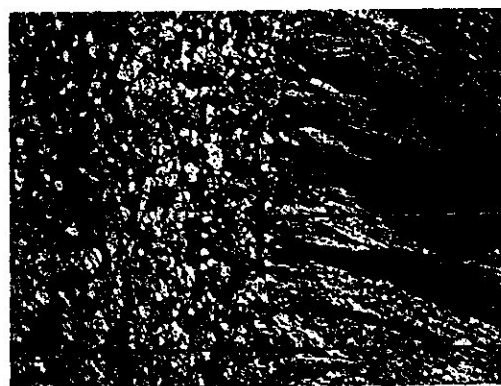


Structure hétérogène

Fig (III-16) Représentation micrographique (x200) de ZL -échantillon A-5(2024)

La figure-16 montre la cristallisation du zone fondu commence à la périphérie de la plage chauffée à T° très élevée et maintenue à cette T°. Alors la cristallisation a lieu sous forme de dendrites qui convergent vers le centre du cordon

Echantillon A8 (7075) :

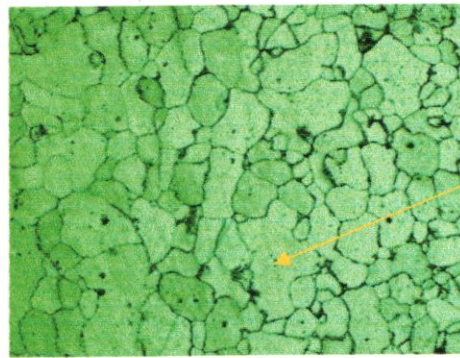


ZF

ZAT

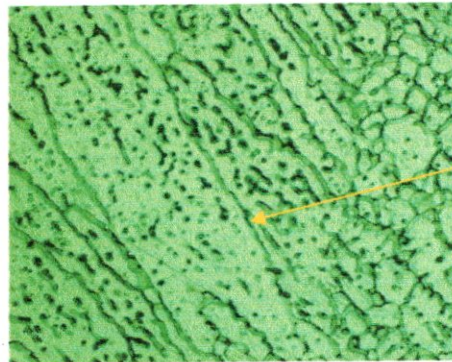
MB

Fig (III-17) Représentation micrographique(x50) des 3 zones -échantillon A-8(7075)



Grossissement des grains

Fig (III-18) Représentation micrographique(x200) de ZAT -échantillon A-8(7075)



Structure brute de solidification

Fig (III-19) Représentation micrographique(x200)de ZF -échantillon A-8(7075)

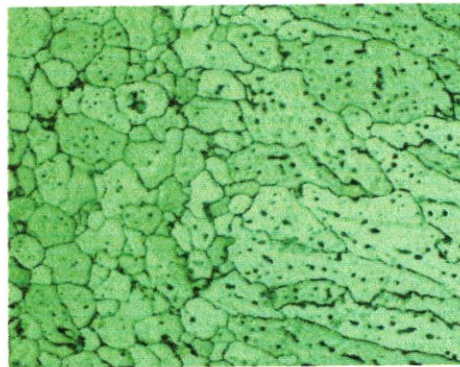


Fig (III-20) Représentation micrographique(x200) de ZL -échantillon A-8(7075)

Echantillon A10 (2024) :



ZF

ZAT

MB

Fig (III-21) Représentation micrographique(x50) des 3 zones -échantillon A-10(2024)

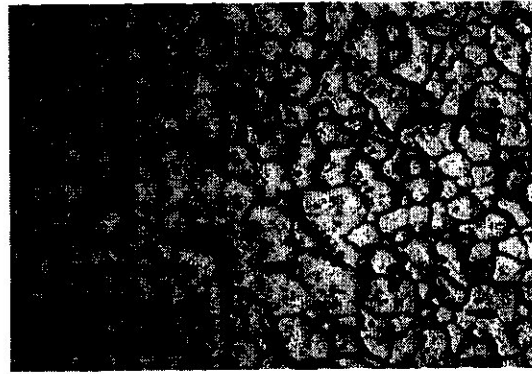


Fig (III-22) Représentation micrographique(x200) de ZAT -échantillon A-10(2024)

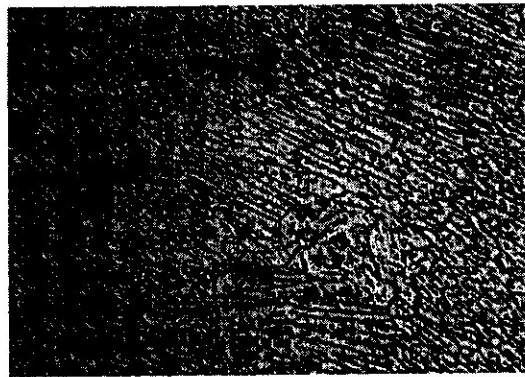


Fig (III-23) Représentation micrographique(x200) de ZF -échantillon A-10(2024)

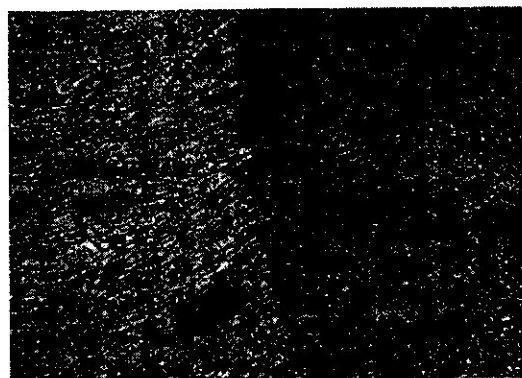


Fig (III-24) Représentation micrographique(x50) de ZL -échantillon A-10(2024)

III-5-2-1/Détermination des dimensions expérimentale (examen macrographique) de la ZAT et ZF :

- **Tableaux III-3: dimension de ZAT et ZF :**

	Tôle A-5(2024)	Tôle A-10(2024)
ZF en (mm) ≈	3.35	6.40
ZAT en (mm) ≈	1.05	1.65

✚ Interprétation de l'analyse métallographique et radiographique :

Le soudage par TIG est une véritable opération métallurgique en effet, il consiste à refroidir un volume déterminé du métal situé au contact de deux tôles à assembler. (Voir la Fig radiographie, micrographie, macrographie)

Le processus thermique suivant lequel s'accomplit la soudure et les qualités tant métallurgiques que mécaniques du cordon soudé dépendront:

- a) Des caractéristiques des métaux à souder (2024-7075).
- b) Facteurs de soudage: intensité du courant de soudage, temps de soudage, vitesse de soudage.

Période de chauffage:

Comme le montrent les macrographies et la micrographie en soudage par TIG, le passage du courant dans des conditions déterminées, donne lieu à un échauffement très localisé (cordon), qui aboutissent rapidement à la fusion d'une zone de métal appartenant aux deux tôles.

Pendant son échauffement progressif le métal se dilate, au moment où il atteint la température de fusion, cette masse liquide constitue le cordon de soudure.

Refroidissement du cordon de soudure:

La zone de métal fondu se trouve au sein d'une masse métallique refroidissante relativement importante, constituée par les tôles soudées, il peut être composé à un métal coulé qui se refroidit dans la lingotière.

Le refroidissement de zone fondu va progresser de la périphérie vers le centre, et il sera d'autant plus rapide que le gradient de températures est élevé, ce qui influe sur les propriétés métallique et mécaniques des tôles soudées (variation de dureté dans les différentes zones). ce qui justifie le problème de fissuration dans le soudage d'aluminium.

La cristallisation de la zone fondue:

La cristallisation de la zone fondu commence à la périphérie de la plage chauffée à température très élevée est maintenue à cette température ; ce qui est normale pour la formation des brutes de solidification (affinement des grains) à dans la région centrale de cordon de soudures.

III-6/CARACTERISATION MECANIQUE :

III-6-1/Essais de micro dureté :

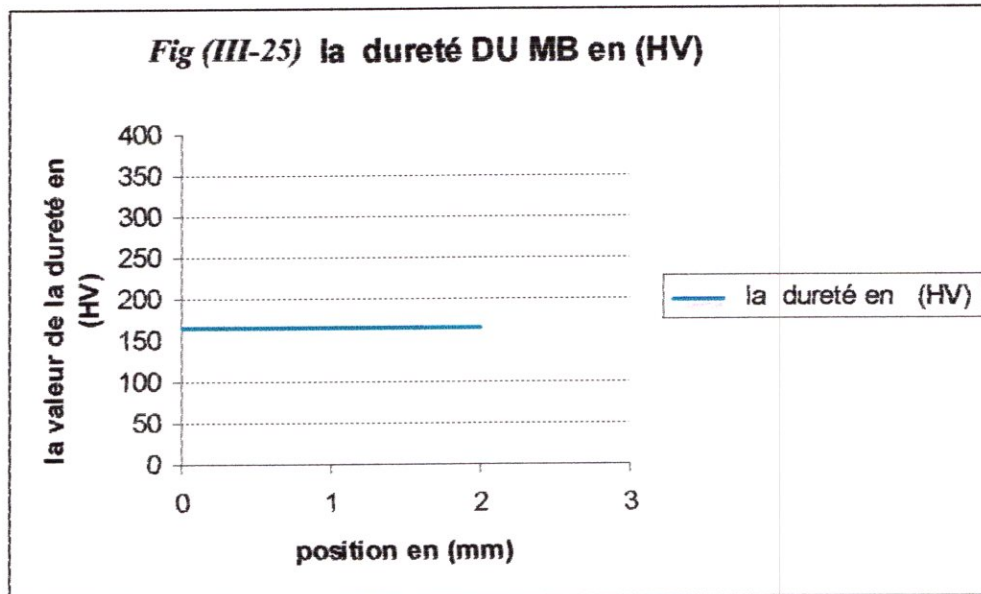
Cet essai à été effectué sur la surface du métal de base et les différentes zones (ZF et ZAT), on a relevé les résultats, voir les tableaux 4-5 :

III-6-1-1/Résultats de micro dureté des échantillons A1-2024 métal de base :

On a choisie un pas de 1 mm, 50 g Hv0.05.

Tableau III- 4 :

points	1	2	3
Position (mm)	0	1	2
La dureté(HV)	163.9	165.1	166



Constations graphiques :

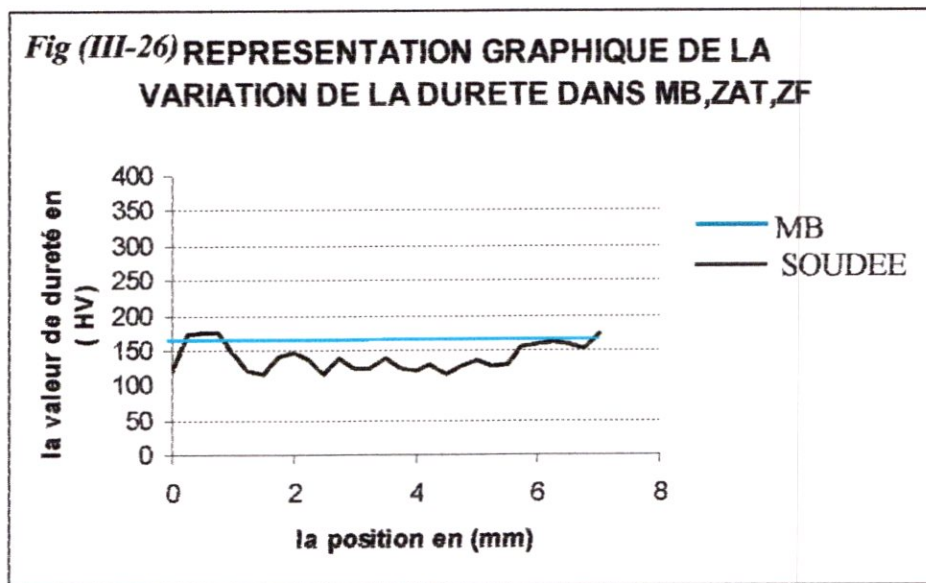
D'après le graphe de la Fig (III-25) on remarque que la dureté est constante dans toute la surface de tôles de métal de base.

III-6-1-2/Résultats de micro dureté des échantillons A1-2024 soudée :

On a choisie un pas de 0.25 mm, et de contraintes 50 g. 0.05HV.
Le tableau (5) représente les résultats de micro dureté obtenue sur une tôle soudés alors les résultats calculés indiquent les 03 zones ZAT, ZF et MB.

Tableau III-5 :

points	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Position(mm)	0	0.25	0.5	0.75	1	1.25	1.5	1.75	2
dureté(HV)	121.2	173.7	175.2	176	147.7	122.1	113.7	139.8	147.1
points	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Position(mm)	2.25	2.5	2.75	3	3.25	3.5	3.75	4	4.25
dureté(HV)	136.6	114.5	137.1	122.6	124.4	139.2	122.6	121.7	129.5
points	19	20	21	22	23	24	25	26	27
Position(mm)	4.5	4.75	5	5.25	5.5	5.75	6	6.25	6.5
dureté(HV)	116.1	125.7	135	125.5	135.5	154.4	158.9	160.3	157



📌 Constatations graphiques:

D'après le graphe de la Fig (III-26) on remarque que :

- une variation de dureté d'une position à une autre est légèrement faible ;
- l'allures des courbes de la Fig (III-26) et la Fig (III-25) sont presque semblables dans la partie MB (métal de base) la micro dureté est de ≈ 165 HV.
- puis on remarque une diminution de la dureté (position 2mm à 6mm) cette variation représente l'influence des zones ZAT et ZF sur la dureté à cause du changement métallurgique (grossissement des grains et la structure brute). (Voir Fig (III-21)).

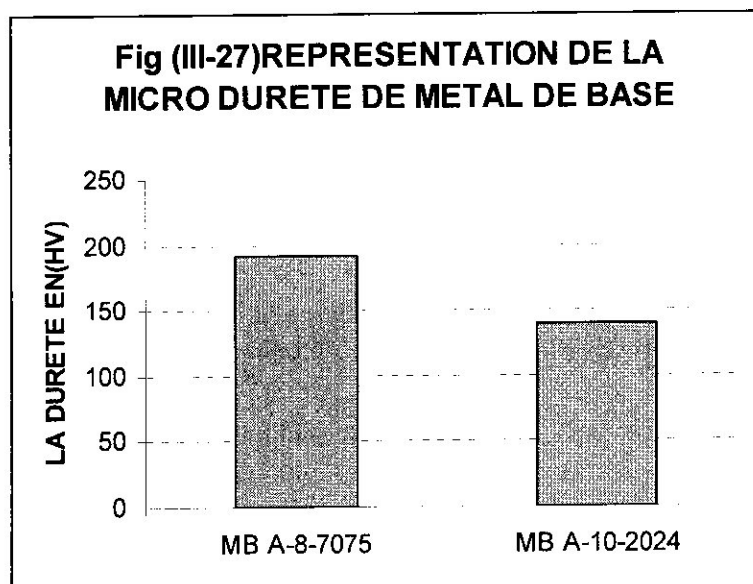
III-6-1-3/Résultats de micro dureté des échantillons de métal de base :

On a choisie une contrainte de 200 g.Hv0.2

Le tableau 6 représente les résultats de micro dureté obtenue sur des échantillons de métal de base de nuance AL 2024 et 7075.

Tableau III - 6 :

Les échantillons	A-8-7075(métal de base)	A-10-2024(métal de base)
1 ^{er} point (dureté en HV)	196.9	138.4
2 ^{eme} point (dureté en HV)	186.4	140
La moyenne (dureté en HV)	191.65	139.2



↓ **Constations graphiques :**

D'après le graphe de la Fig (III-27) on remarque une micro dureté presque constante, ce qui nous conduit à faire l'histogramme.

On remarque aussi que la micro dureté de métal de base de A-8 (7075) est plus élevée à celle de A-10(2024) à cause de la différence des éléments d'adition de ces nuances.

III-6-1-4/Résultats de micro dureté des échantillons A10-2024 et A8-7075 soudées :

On a choisie une contrainte de 200 g.Hv0.02

Les tableaux 7-8-9 représentent les résultats de micro dureté obtenue sur des échantillons de nuance AL 2024 et 7075 soudée dans les 3 zones (ZF, ZAT, MB).

Le tableau 7 représente les résultats de micro dureté obtenue sur des échantillons de nuance AL 2024 et 7075 soudée dans la zone (ZF).

Tableau III -7 :

Les échantillons	A-8-7075(soudée)	A-10-2024(soudée)
1 ^{er} point (dureté en HV)	122.6	121.2
2 ^{eme} point (dureté en HV)	114.5	118
La moyenne (dureté en HV)	118.55	119.6

Le tableau 8 représente les résultats de micro dureté obtenue sur des échantillons de nuance AL 2024 et 7075 soudée dans la zone (ZAT).

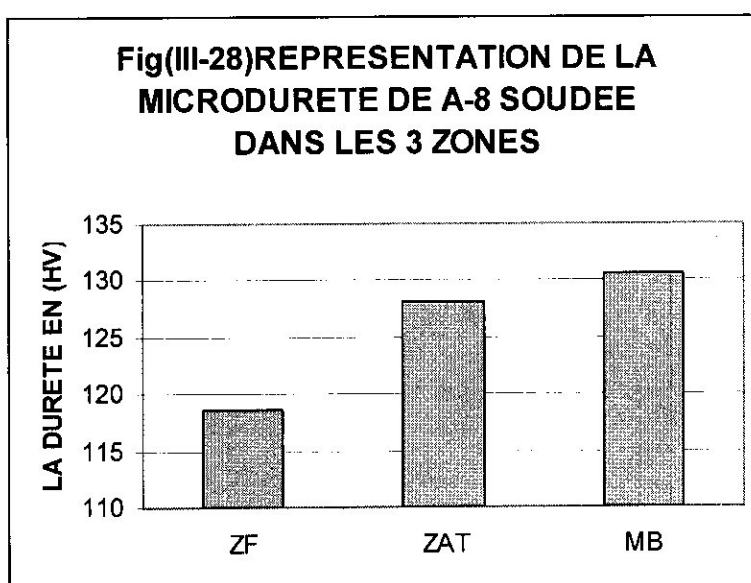
Tableau III - 8 :

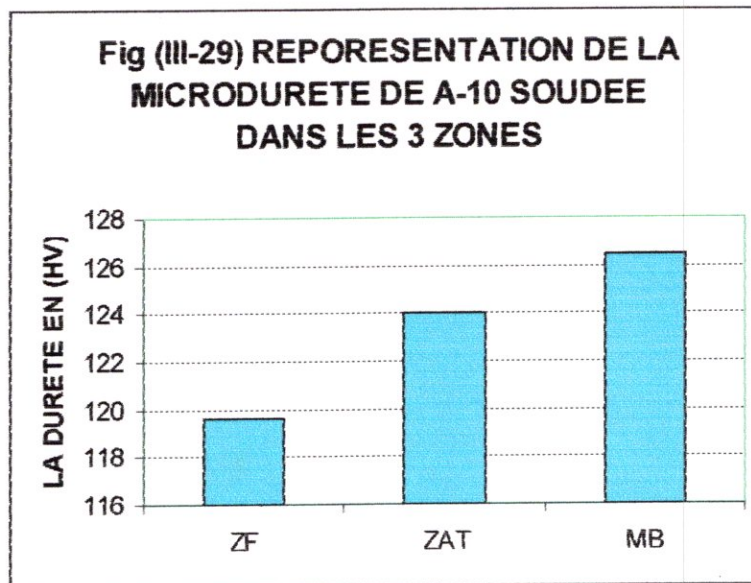
Les échantillons	A-8-7075(soudée)	A-10-2024(soudée)
1 ^{er} point (dureté en HV)	125.7	125
2 ^{eme} point (dureté en HV)	130.5	123
La moyenne (dureté en HV)	128.1	124

Le tableau 9 représente les résultats de micro dureté obtenue sur des échantillons de nuance AL 2024 et 7075 soudée dans la zone (MB) proche de zone de liaison.

Tableau III -9 :

Les échantillons	A-8-7075(soudée)	A-10-2024(soudée)
1 ^{er} point (dureté en HV)	128.7	122.6
2 ^{eme} point (dureté en HV)	132.55	130.4
La moyenne (dureté en HV)	130.62	126.5





III-6-2-Interprétation de la micro dureté:

D'après le graphe de la Fig (III-28-29) on remarque que :

-une variation de dureté d'une zone à une autre.

-l'allures des histogrammes de la Fig (III-28) et la Fig (III-29) sont presque semblables, les deux 'histogrammes passent par un minimum de dureté au niveau de la zone fondue et la zone affectée thermiquement puis ils auront une augmentation de dureté vers la zone de métal de base, cette augmentation brutale est légèrement faible dans l'échantillon Al 2024 ce qui prouve que la dureté au niveau du cordon est aussi légèrement faible a celle du métal de base.

Par contre cette variation de dureté est importante dans l'échantillon AL 7075 ce qui prouve que la dureté au niveau du cordon est aussi très faible a celle du métal de base.

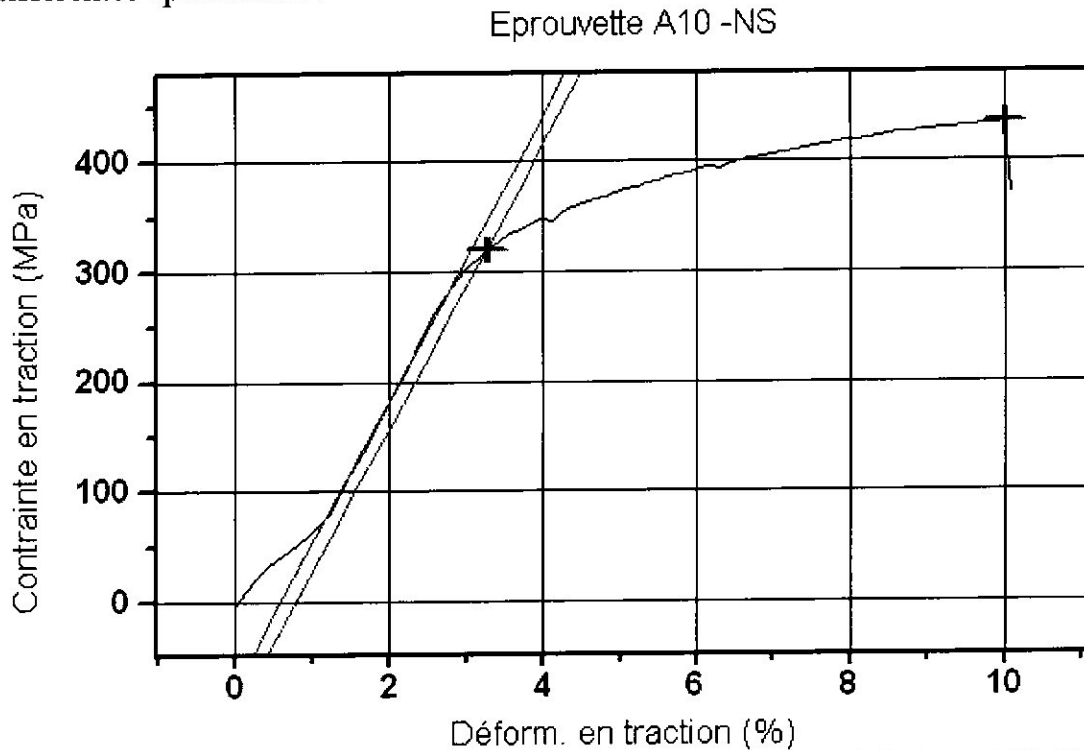
Cette diminution de la dureté est justifier théoriquement par la recristallisation de la zone fondu a la périphérie de la zone affectée thermiquement à une température élevée et maintenue à cette température par la zone fondu ce qui donne une transformation de phase.

Alors la micro dureté prouve que l'aluminium de série 7075 est moins soudable par rapport AL 2024.

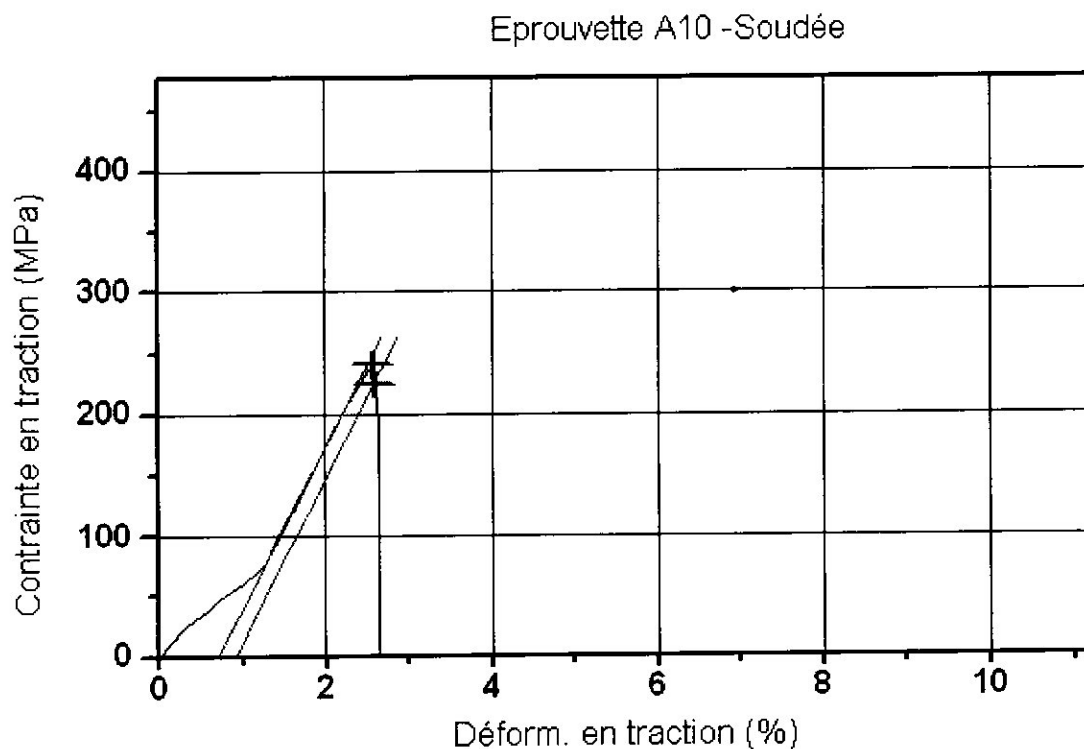
III-6-2/Essais de traction :

III-6-2-1/Résultats d'essais de rupture par traction :

Résultats d'essais de rupture par traction enregistrés par la machine de traction pour les différentes éprouvettes :



Courbe de rupture par traction pour les éprouvettes de métal de base A10-NS



Courbe de rupture par traction pour les éprouvettes soudées A10-S

↓ **Constations graphiques :**

1- Le graphe de l'éprouvette non soudée comporte une phase élastique, phase plastique et la rupture, par contre le graphe de l'éprouvette soudée comporte que la phase élastique, puis la rupture.

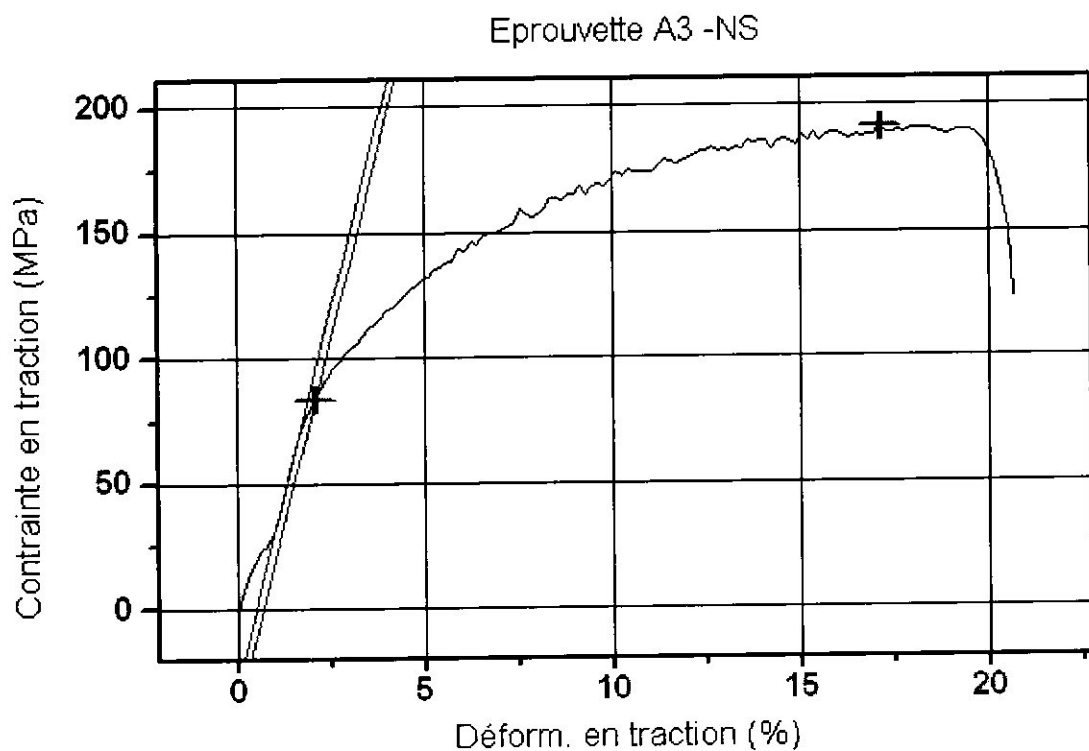
2- On doit déterminer les valeurs et les coefficients caractérisent chaque courbe Pour donner une comparaison entre les deux courbes. (Voir Tableau III -9).

Tableau III -9 :

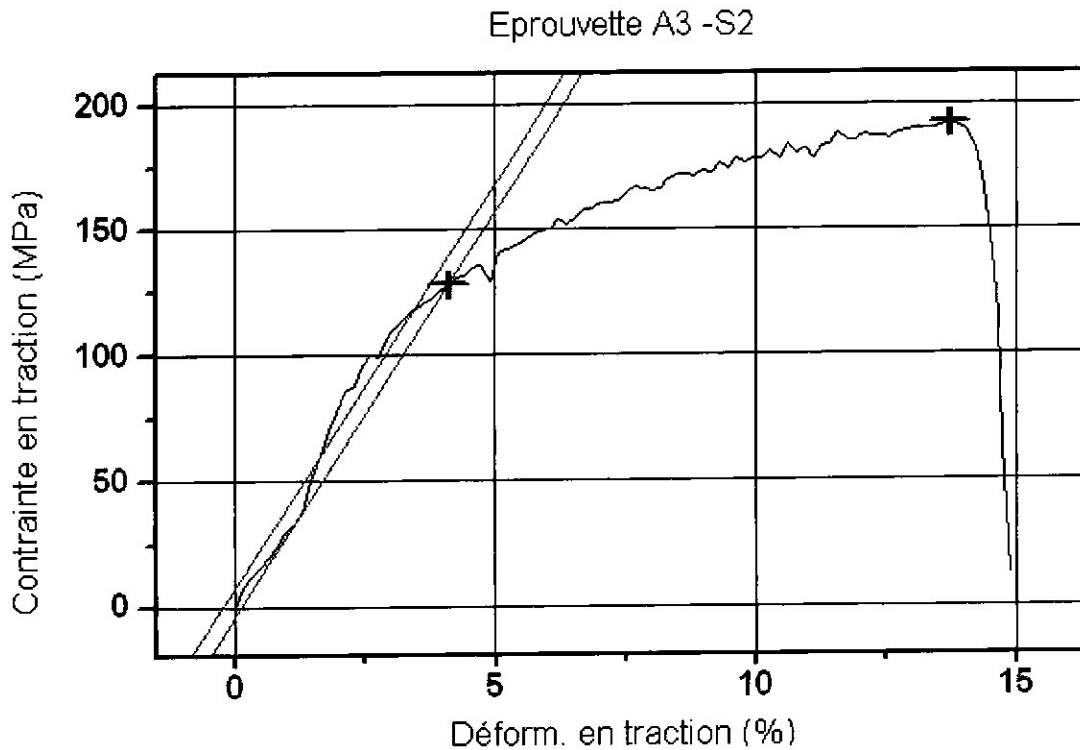
	Charge Max (KN)	Contrainte Max (MPa)	Module de Young (MPa)	Limite d'élasticité (MPa)	Déformation à la rupture (%)
A10-NS	14.75	434.61	12889.774	320.150	10.09
A10-S	8.33	240.40	13368.256	224.481	2.63

D'après ce Tableau on remarque :

- Une diminution à la résistance de la charge maximale et la contrainte maximale après le soudage.
- Une diminution de module de Young, après le soudage.
- Une diminution limite d'élasticité et la déformation à la rupture.



Courbe de rupture par traction pour les éprouvettes de métal de base A1-3-NS



Courbe de rupture par traction pour les éprouvettes soudées A1-3-S

↓ **Constations graphiques :**

1- Le graphe de l'éprouvette non soudée comporte une phase élastique, phase plastique et la rupture, de même pour le graphe de l'éprouvette soudée comporte aussi les deux phases, puis la rupture.

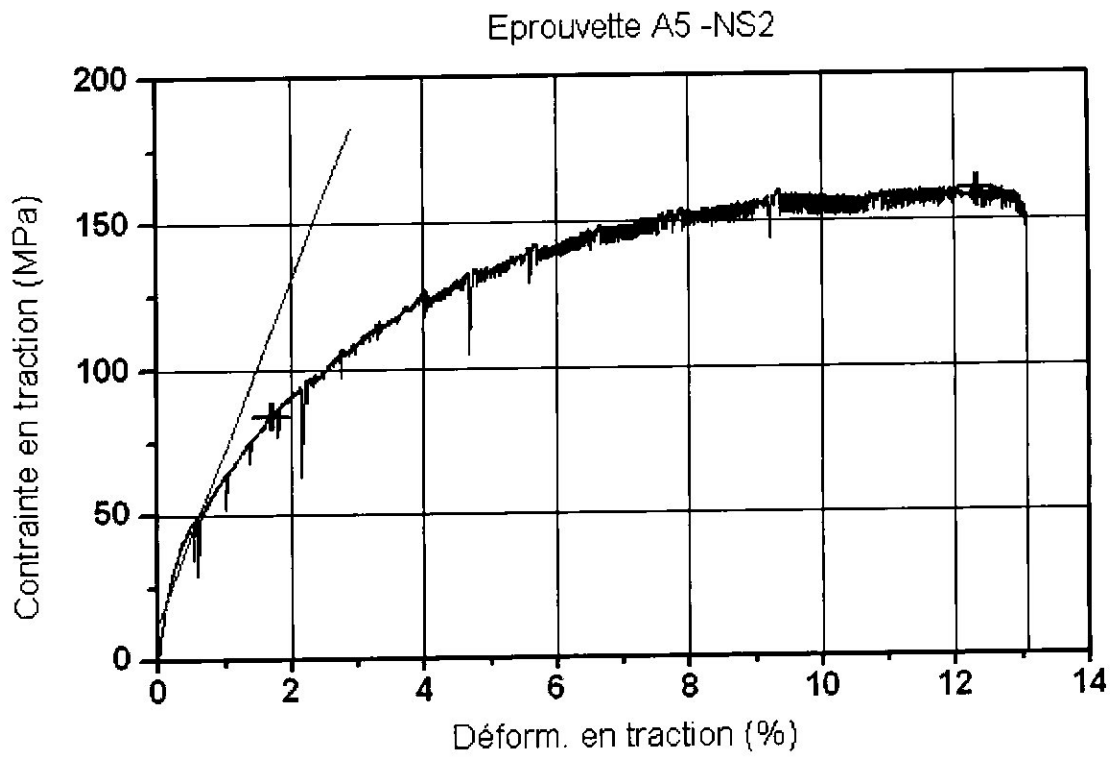
2-On doit déterminer des valeurs et des coefficients caractérisent chaque courbe Pour donner une comparaison entre les deux courbes. (Voir Tableau III -10).

Tableau III -10 :

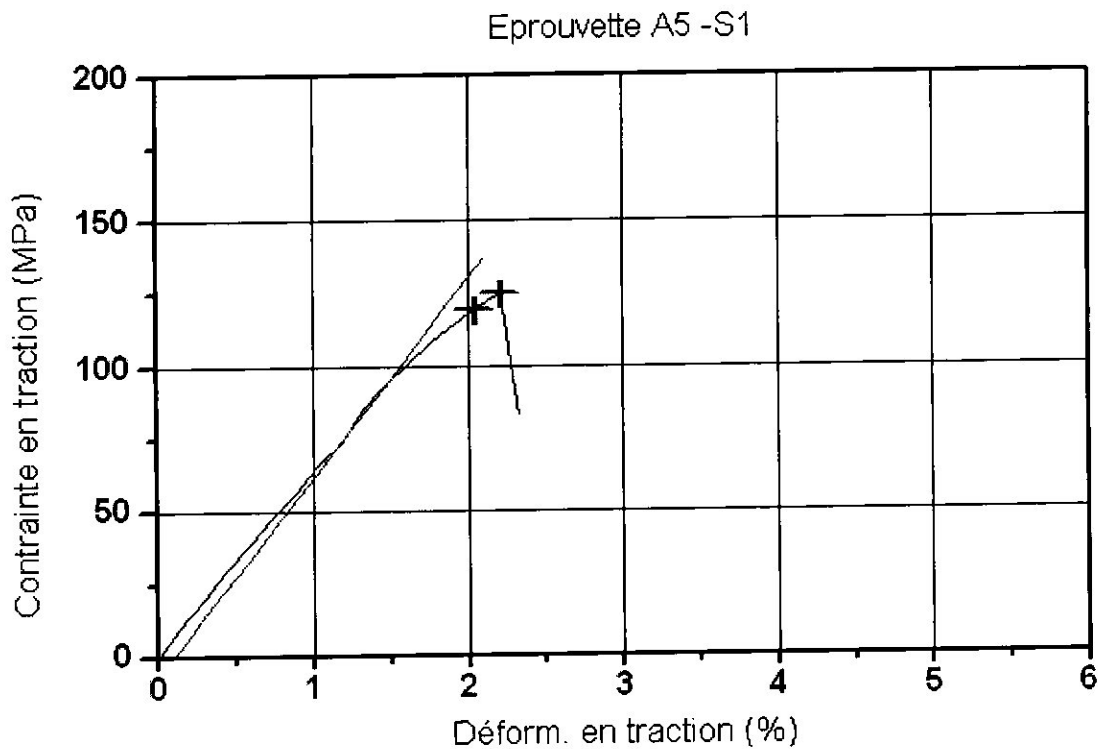
	<i>Charge Max (KN)</i>	<i>Contrainte Max (MPa)</i>	<i>Module de Young(MPa)</i>	<i>Limite d'élasticité(MPa)</i>	<i>Déformation à la rupture(%)</i>
<i>A3-NS</i>	<i>11.02</i>	<i>191.29</i>	<i>5917.916</i>	<i>83.752</i>	<i>20.67</i>
<i>A3-S</i>	<i>11.39</i>	<i>192.48</i>	<i>3223.514</i>	<i>127.990</i>	<i>14.88</i>

D'après ce Tableau on remarque :

- La résistance de la charge maximale et la contrainte maximale reste constantes après le soudage.
- Une diminution du module de Young et la déformation à la repture.
- Une augmentation de la limite d'élasticité.



Courbe de rupture par traction pour les éprouvettes de métal de base A1-5-NS



Courbe de rupture par traction pour les éprouvettes soudées A1-5-S

↓ **Constations graphiques :**

1- Le graphe de l'éprouvette non soudée comporte une phase élastique, phase plastique et la rupture, par contre le graphe de l'éprouvette soudée ne comporte que la phase élastique, puis la rupture.

2-On doit déterminer des valeurs et des coefficients caractérisent chaque courbe Pour donner une comparaison entre les deux courbes. (Voir Tableau III -11).

Tableau III -11 :

	Charge Max (KN)	Contrainte Max (MPa)	Module de Young(MPa)	Limite d'élasticité(MPa)	Déformation à la rupture(%)
A5-NS	5.98	160.92	5853.761	84.129	13.08
A5-S	4.61	124.84	6818.920	119.229	2.33

D'après ce Tableau on remarque :

- Une diminution à la résistance de la charge maximale, la contrainte maximale et la déformation à la rupture après le soudage.
- Une augmentation de module de Young et la limite d'élasticité.

III-6-2-2Interprétation des résultats :

D'après le tableau technique on peut dire que ces cordons présentent une continuité métallique si les caractéristiques mécaniques ne changent pas (avant soudage et après).

D'après la courbe brute de rupture par traction décrite par chaque éprouvette au cour de l'essai, on peut dire que ces éprouvettes obéissent à la loi de Hook.

D'après les graphes de traction de l'éprouvette A-8-7075 soudée obtenus, on constate que les éprouvettes soudées sont rompues à une faible charge ce qui nous ramène à dire que les cordons de soudure réalisés dans ces tôles ne sont pas efficaces ; et on remarque aussi que la rupture a été au milieu du cordon, a cause des fissures et des retassures (vides internes) dans le cordon.voir (FigIII-30).

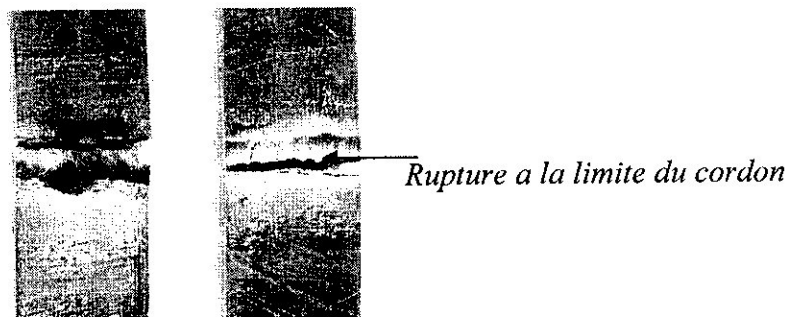


Fig (III-30) Rupture après traction

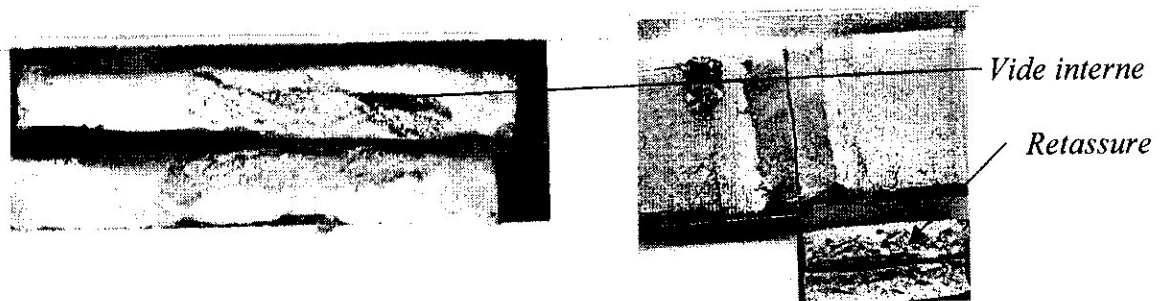


Fig (III-31) défauts de soudage

D'après les graphes de traction de l'éprouvettes A-3 -2024(soudée et non soudé) obtenus, on constate que les éprouvettes soudées sont rompues a une forte charge semblables a celle de métal de base, et on remarque aussi que la rupture a été loin du cordon ce qui nous ramène à dire que les cordons de soudure réalisés dans ces tôles sont efficaces.

Voir (FigIII-31).

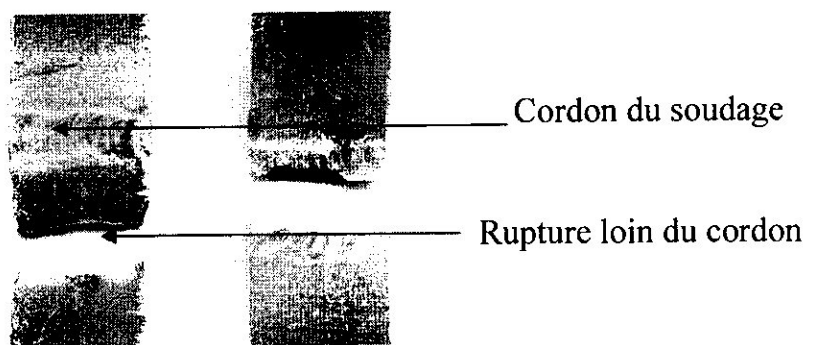


Fig (III-32) éprouvette A3 (2024)

On explique ces résultats par les points de vue suivants :

-changement des caractéristiques mécaniques du cordon par rapport au métal de base qui est une conséquence des paramètres de soudage choisis.

-les éprouvettes rompent par traction aux niveau du cordon présentent une discontinuité métallique, c'est-à-dire présente des défauts internes tel que ; les vides internes (retassures, fissure, coulage) qui sont due à l'influence de nuance de métal de base, l'insuffisance de courant, variation de vitesse de soudage, mauvais état de surface.

CONCLUSION

GENERALE

CONCLUSION GENERALE

Notre travail consiste essentiellement à étudier l'influence de soudage, sur les caractéristiques thermiques, métallographiques et mécaniques d'un assemblage en Aluminium aéronautique (de nuance 2024, 7075) par la méthode TIG.

J'après Les caractéristiques mécaniques et métallurgiques de ces alliages d'Aluminums'2024 et 7075 (par exemple ont une masse volumique légère et une dureté importante) les ont permet d'être très utilisées dans l'industrie aéronautiques.

Les essais de soudage sur des tôles d'aluminium de série différentes (2024 et 7075) et d'épaisseurs aussi variables (de 1mm à 3mm) montrent qu'il existe beaucoup de paramètres influés sur la soudure comme la tension de courant, la vitesse de soudage, l'état de surface de la plaque et la nuance des tôles.

Comme résultats techniques on a conclue que :

- La soudure par procédé TIG n'est pas efficace, sur les tôles d'AL-7075 alors on propose comme solutions :

- suivre un autre procédé de soudage (laser, à l'arc électrique enrobé...) et de faire les mêmes recherches pour savoir la possibilité qu'elles soient efficaces, sur cette série d'Aluminium (AL-7075).

- changer totalement la procédé d'assemblage (par exemple assembler par rivetage).

- La soudure par procédé TIG est difficile, sur les tôles d'AL-2024, on doit respecter quelques normes si non on risque d'avoir des mauvais résultats

Parmi ces normes : la tension de courant, la vitesse de soudage, la préparation de la surface de la plaque.

En effet, ce travail aurait plus riche si d'autres procédés de soudage et moyens de caractérisation étaient disponible, tel que les normes d'essais qui s'avèrent indispensable pour ce genre d'étude.

En fin, il est important de souligner qu'a travers ce travail il nous a été possible d'acquérir une initiation à la recherche et au travail expérimentale, dans le domaine de la mise en forme de soudage et notamment de prés des différents moyens de caractérisation et d'analyse.

ANNEXES

ANNEXES :**1- Désignation des alliages :**

Cette normalisation selon les normes de l'Aluminium est donnée dans le tableau 6. Dans ce système, les alliages d'aluminium de fonderie sont groupés par leurs éléments principaux d'addition. On utilise un nombre à quatre chiffres avec un point séparant les deux derniers.

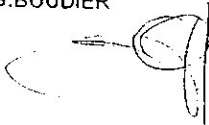
CODE	ELEMENT (S) D'ADDITION
1xx.x	Moins de 1% (aluminium à 99,00% ou plus)
2xx.x	Cuivre
3xx.x	Silicium, avec un ajout de Cuivre et/ou de Magnésium
4xx.x	Silicium
5xx.x	Magnésium
7xx.x	Zinc
8xx.x	Étain
9xx.x	Autres éléments
6xx.x	Série non utilisée

Tableau 1 : les séries d'alliage de fonderie

Tableaux des alliages

DESIGNATION	COMPOSITION CHIMIQUE (% en masse éléments principaux)							Procédé de moulage	Traitement thermique	Résistance à la traction Rm (Mpa)	Allongement A50mm%	Dureté Brinell HBS		
	Si	Fe	Cu	Mn	Ni	Zn	Ti							
Al Mg5	0,55	0,55	0,1	0,45		0,1	0,2			K	F	180	4	60
										S	F	160	3	55
Al Si7Mg0,3	6,5 à 7,5	< 0,19	< 0,05	< 0,1		< 0,07	0,08 à 0,25			K	T6	290	4	90
										K	T64	250	8	80
										S	T6	130	2	75
										K	T6	320	3	100
Al Si7Mg0,6	6,5 à 7,5	< 0,19	< 0,05	< 0,1		< 0,07	0,08 à 0,25			K	T64	290	6	90
										S	T6	250	1	85
										S	F	140	3	50
										S	T6	240	3	85
Al Si2MgTi	1,6 à 2,4	< 0,6	< 0,1	0,3 à 0,5	< 0,05	< 0,1	0,08 à 0,20			K	F	170	5	50
										K	T6	260	5	85
										S	F	160	1	50
										S	T6	220	1	75
Al Si10Mg	9 à 11	< 0,65	< 0,35	< 0,1		< 0,07	< 0,15			K	F	180	1	55
										K	T6	240	1	80
										S	F	150	4	50
										K	F	170	5	55
Al Si12	10,5 à 13,5	< 0,65	< 0,15	0,55	< 0,1	< 0,15	< 0,2			S	T4	300	5	90
										K	T4	320	8	95
Al Cu4MgTi	< 0,2	< 0,35	4,2 à 5	< 0,1	< 0,05	< 0,1	0,15 à 0,3			S	T4	300	5	90
										K	T4	320	8	95
Al Zn10Si8Mg	8 à 8,5	< 0,15	< 0,01	< 0,02	< 0,04	9,5 à 10	< 0,05			S	F	220	1	90
										K	F	280	3	105
Al Si9Cu3	8 à 11	< 1,3	2 à 4	0,55	0,55	1,2	0,25			S	F	150	1	60
										K	F	170	1	75
										D	F	240	1	80

K=coquille S=sable D=ss pression F=sans TTh T=avec TTh

TRANSMET 49 Rue Henri Vullemin 92230 GENNEVILLIERS Tel 01 47 90 74 20 Fax 01 47 90 52 19		CERTIFICAT DE CONTROLE ET DE CONFORMITE APPROVED CERTIFICATE AND RELEASE NOTE WERKS = ABNAHMEZEUGNIS UND BESCHEINIGUNG Le 10.11.2004				FICHE N° Street N° 5097 976185 Blatt NR						
NUANCE Quality / Marke ETAT DE LIVRAISON T6 Condition / Lieferzustand MODE DE FACONNAGE Manufacture / Formgebung ELABORATION ET CLASSE Melting and cast category / Herstellung und Klasse		DESIGNATION - QUANTITE - DIMENSIONS - POIDS DESIGNATION / Stuckzahl - Quantity / Menge Dimensions / Abmessungen - Weight / Gewicht Poste 07 10 Tôles dimensions 1291.2 X 3657.6 EP 0.64 MM <i>6/10</i>										
COMMANDE et SPECIFICATIONS Order / Specifications - Auftrag / Spezifikationen COMMANDE N° 2274J04 du 13.09.2004 AMS4049J - ASTM B209-02 LIVRAISON BL 16557 du 03.11.2004 Delivery / Lieferung AFFAIRE 976185		AIR ALGERIE. Direction Technique Sous-direction Approvisionnements Aéroport Houari BOUMEDIENE DAR EL BEIDA / ALGER ALGERIE										
COULEE N° Cast / Schmelze LOT 219291		C	Si	Mn	S	P	Ni	Cr	Mo	V	W	MG
			0.10	0.03				0.19		0.01		2.50
		Nb	Ti	Al	Cu	Co	Fe	Zr	B	N2	ZN	AUTRES
			0.04		1.53		0.22					0.03
ORIGINE PRELEVEMENT		TRAITEMENT THERMIQUE			TRACTION				RESILIENCE		DURETE	
Sample		Heat Treatment			Rm		Rp 0.2		A %		Z %	
Probe		Warme Behandlung			UTS		YS		E %		RA%	
					σ_B		σ_S		5 %		ψ %	
ESSAIS DE RECEPTION DE COULEE					LT	N/mm ² 540	N/mm ² 475		11.6			
		FLUAGE - Creep Test / Zustandversuch										
		Temp °C	Contrainte MPA	Durée h	Δ %		Observations					
DIMENSIONS CONFORMES												
OBSERVATIONS Nous certifions que, sauf exceptions ou dérogations énumérées ci-contre, la fourniture citée a été fabriquée conformément aux spécifications techniques de la commande et que, toutes opérations de contrôle et essais effectués, elle répond SOUS TOUS LES ASPECTS, aux spécifications particulières, aux plans, ainsi qu'aux normes en vigueur s'y rapportant		Visa du Responsable de Contrôle G. BOUDIER 										

Qualité / Marke
ETAT DE LIVRAISON
Condition / Lieferzustand
MODE DE FACONNAGE
Manufacture / Formgebung
ELABORATION ET CLASSE
Melting and cast category / Herstellung und Klass

Poste 10
15 Tôles dimensions :
1250x2500x2
262.500 kg.

COMMANDE et SPECIFICATIONS
Order / Specifications - Auftrag / Spezifikationen

AIR ALGERIE
Direction Techniquee
AEROPORT DAR EL BEIDA
ALGER
ALGERIE

N0 46J01 du 31.01. 2001
Suivant **AIR 9048**
LIVRAISON BL 12575 du 26.04.2001
Delivery / Lieferung **AFFAIRE 970557**

COULEE N° Cast / Schmelze	C	Si	Mn	S	P	Ni	Cr	Mo	V	W	MG
405411		0.11	0.56				0.02		0.02		1.31
	Nb	Ti	Al	Cu	Co	Fe	Zr	B	N2	Zn	AUTRES
		0.04		4.32		0.31				0.10	0.06

ORIGINE PRELEVEMENT	TRAITEMENT THERMIQUE	SENS	TRACTION				SENS	RESILIENCE	DURETE
			Rm	Rp 0,2	A %5d	Z %			
Sample	Heat Treatment		UTS	YS	E %	RA%		Impact Test	Hardness
Probe	Warme Behandlung		σ_B	σ_S	δ %	ψ %		Kerp-Schiag	Harte
		L	N/mm ² 447/449	N/mm ² 308/309	16.7/ 18.5				HB

FLUAGE - Creep Test / Zeitstandversuch				
Temp. °C	Contrainte MPA	Durée h	A %	Observations

Dimensions conformes.

OBSERVATIONS
Nous certifions que, sauf exceptions ou dérogations énumérées ci-contre, la fourniture citée a été fabriquée conformément aux spécifications techniques de la commande et que, toutes opérations de contrôle et essais effectués, elle répond **SOUS TOUS LES ASPECTS**, aux spécifications particulières, aux plans, ainsi qu'aux normes en vigueur s'y rapportant.

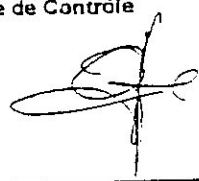
Visa du Responsable de Contrôle
G. BOUDIER


Tableau I. - Correspondance entre les désignations normalisées en France et à l'étranger.

Désignation AFNOR		Désignation internationale			Désignation étrangère (1)									
NF A 02 004 (1977) (2)	NF A 03 104 (1980)	A. A. (Aluminium association)	ISO	États-Unis (ASTM) (3)	Grande-Bretagne		République fédérale d'Allemagne (DIN 1712-1715)		Italie (UNI)	Espagne (UNE)	Suisse (VDM)	Suède (SIS)	U.R.S.S. (GOST)	
						ancienne	nouvelle	numéros						
A 8	1080 A	1080 A	Al 99.8	-	I A	1080 A	-	Al 99.8	3 0285	4 509	L 3081	Al 99.8	A 8	
A 8T	8004	1070 A	Al 99.7	-	-	-	-	Al 99.7	3 0275	4 508	L 3071	Al 99.7	A 7	
A 7	1070 A	1050 A	Al 99.5	-	IB	1050 A	-	Al 99.5	3 0255	4 507	L 3051	Al 99.5	A 7	
A 5	1050 A	1200	Al 99.0	-	IC	1200	-	Al 99	3 205	-	L 3001	Al 99	A 5 (ADO)	
A 4	1200	1100	Al 99.0 Cu	1 100	-	-	-	-	-	-	L 3002	Al 99	A	
A 45	1100	8011	-	-	-	-	-	Al Fe Si (4)	3 0915	-	-	-	-	
A Fe Si	8011	3003	Al Mn 1 Cu	3003	N3	3 103 (4)	-	Al Mg Cu	3 0517	7 788	L 3810	-	AM c	
A-MI	3003	3005	Al Mn 1 Mg 0.5	3005	-	-	-	Al Mn 1 Mg 0.5	3 0525	-	-	-	-	
A-MG 0.5	3005	3004	Al Mn 1 Mg 1	3004	-	-	-	Al Mn 1 Mg 1	3 0526	6 361	L 3820	-	-	
A-MG	3004	3105	Al Mn 0.5 Mg 0.5	3 103	N 31	3 105 (4)	-	Al Mn 0.5 Mg 0.5	3 0505	-	-	-	-	
A-M 0.5 G	3105	5005	Al Mg 1	5005	N 41	5005	-	Al Mg 1 (4)	3 3315	5 764	L 3350	Al Mg 1 (4)	A Mg 1	
A-G 0.6	5005	5150	Al Mg 1.5 (4)	5050	-	-	-	Al Mg 1.5 (4)	3 3316	3 573	L 3380	-	-	
A 85 - GT	5150	5050	Al Mg 2	5050	N 4	5251	-	Al Mg 2 Mn 0.3	3 3323	4 511	L 3361	-	-	
A-G 1.5	5050	5052	Al Mg 2.5	5052	-	-	-	Al Mg 2.5	3 3323	3 574	L 3360	Al Mg 2.5	A Mg 2	
A-G 2 M	5251	5454	Al Mg 2.7 Mn	5454	N 51	5454	-	Al Mg 2.7 Mn	3 3327	7 789	L 3391	Al Mg 3	-	
A-G 2 EC	5052	5154	Al Mg 3	5154	N 5	-	-	Al Mg 3	3 3335	3 575 (4)	L 3390 (4)	Al Mg 3	A Mg 3	
A-G 2.7 M 0.7	5454	5086	Al Mg 4	5086	-	-	-	Al Mg 4 Mn	3 3545	5 452	L 3322	Al Mg 4 Mn	A Mg 4	
A-G 3 M	5154	5280	-	-	-	-	-	Al Mg 4.5	3 3345	-	-	-	-	
A-G 3 M	5154	5082	-	-	-	-	-	Al Mg 4.5 Mn	3 3547	7 790	L 3321	Al Mg 4.5 Mn	A Mg 4	
A-G 3.5 M	5013	5082	-	-	-	-	-	Al Mg 5	3 3555	3 576 (4)	L 3320	Al Mg 5 Mn	A Mg 5	
A-G 3.5 MC	5013	5083	Al Mg 4.3 Mn	5083	N 8	5083	-	Al Mg 4.3 Mn	3 3547	-	-	-	-	
A-G 3.5 M	5013	5356	-	-	-	-	-	Al Mg 5	3 3555	-	-	-	-	
A-G 4 MC	5086	5283	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
A-G 4Z	5280	4006	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
A-G 4.5	5082	4043	-	-	N 21	4043 (4)	-	S Al Si 5 (4)	3 2245	-	-	-	-	
A-G 4.5 M	5082	4047	-	-	N 2	4047	-	S Al Si 12 (4)	3 2586	-	-	-	-	
A-G 4.5 MC	5182	4145	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
A-G 5 MC	5083	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
A-G 5 MC	5356	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
A-G 5 M 0.7	5283	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
A-S 1 Fe	4006	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
A-S 5	4043	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
A-S 12	4047	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
A-S 10 U4	4145	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
A-U 2G	2117	2117	Al Cu 2 Mg	2117	3 L 86	2117	-	Al Cu 2.5 Mg 0.5	3 1305	3 577	L 3180	-	D 18	
A-U 2 GN	2618 A	2618 A	Al Cu 4 Mg Si	2618 (4)	H 16	2618 A	-	Al Cu Mg 1	3 1325	3 579	L 3171	-	A K 4	
A-U 4 G	2017 A	2017 A	Al Cu 4 Mg 1	2017 (4)	-	-	-	Al Cu Mg 2	3 1355	3 583	L 3120	-	-	
A-U 4 G 1	2024	2024	Al Cu 4 Si Mn	2024	2 L 97	-	-	Al Cu Si Mn	3 1255	3 581	L 3140	-	D 16	
A-U 4 SG	2014	2014	Al Cu 4 Si Mn	2014	H 15	2014 A	-	Al Cu Mg Pb	3 1645	3 581	L 3130	-	A K 8	
A-U 4 Pb	2030	2030	Al Cu Pb	2030	-	-	-	Al Cu Mg Pb	3 1645	3 581	L 3122	-	-	
A-U 5 Ph Bi	2011	2011	-	2011	F Cl	2011	-	Al Cu Pb Bi	3 1655	6 362	L 3192	-	-	
A-U 6 M GT	2 001	2 001	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
A-GS	6060	6060	Al Mg Si	6061	H 9	6063 (4)	-	Al Mg Si 0.5	3 3206	3 569 (4)	L 3441 (4)	Al Mg Si 0.5	AD 33	
A-SG UC	6061	6061	Al Mg 1 Si Cu	6061	H 20	6061	-	Al Mg Si Cu	3 3211	6 170	L 3420	-	-	
A-SG	6181	6181	-	-	-	-	-	Al Mg Si 0.8	3 2316	-	-	-	-	
A-SG 0.5	6005	6005	-	-	-	-	-	Al Mg Si 0.7	3 3210	-	L 3454	Al Mg Si 0.7	-	
A-SG 0.5 MC	6005 A	6005 A	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
A-SG M 0.3	6081	6081	Al Si 1 Mg	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
A-SG M 0.7	6082	6082	-	-	H 30	6082	-	Al Mg Si 1	3 2315	3 571	L 3420	Al Mg Si 1 Mn	-	
A-Z5 G2	7051	7051	Al Zn 4.5 Mg 1	-	H 17	7020	-	Al Zn 4.5 Mg 1	3 4335	7 791	L 3741	Al Zn 4.5 Mg	-	
A-Z5 G	7020	7020	Al Zn 6 Mg Cu	7075	2 L 95	7075	-	Al Zn Mg Cu 1.5	3 4365	3 735	L 3710	Al Zn Mg Cu 1.5	V 95	
A-Z5 G U	7075	7075	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	V 96	
A-Z8 G U	7049 A	7049 A	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	

(1) Japon et Canada ont adopté la désignation internationale A. A.
 (2) La norme NF-A-02-004 n'est plus utilisée officiellement
 (3) La désignation ASTM/UNS (Unified Numbering System) utilisée officiellement aux États-Unis comporte le symbole A9 placé devant la désignation A. A.

Vérifier qu'une fiche placée en tête de cet article ne modifie pas le présent texte

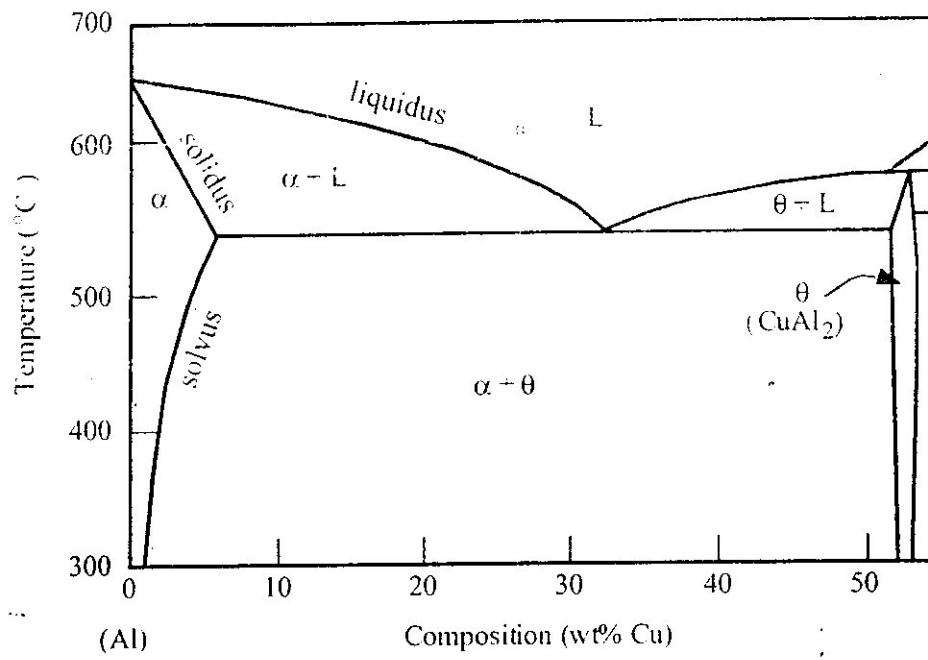


Fig. 2.8 Aluminum-Copper Phase Diagram [3]

BIBLIOGRAPHIE “”

- [1] : Roger. Legouie «*Précis de soudage et brassage et techniques connexes*» ;troisième édition, nouveau tirage édition EYROLLES Paris (1982).
- [2]:Robert.L.Ule.Genda Joshi-Eugene.B.Sedy : « *New technique for a three dimensional transient heat transfer computation autogenously arc welding metallurgical*».
- [3] : ROLAND. CASES Soudage à l’arc, « *Techniques d’ingénieur 2000* » partie BD3.
- [4] : R.VARISLAZ « *Soudage : élément de conception et réalisation* », 2^{ème} édition DUNOD 1987.
- [5] : UNIVERSIALIS « *Encyclopédie 2000* » Mécano soudage, Cetim, Senlis, 1990.
- [6] : R, Varizllag«*soudage : élément de conception et de réalisation*».
- [7] : DLUI «*weldability of steels*», metal hand back.
- [8] : Roland CAZES«*techniques d’ingénieur*»B7 730.
- [9] : ANDRE ROOS-BERNARD MILET-PAUL BASTIEN«*Précis de métallurgie appliquée* 3^{ème} édition
- [10] : soudage et techniques connexes juillet, août 1987 page317
- [11] : PFE « *influence des paramètres de soudage sur les caractéristiques mécaniques d’un assemblage soudé par point*»IGMB 2004.
- [12] : 17^{ème} Congrès Français de Mécanique Troyes,-Septembre2005.
- [13] : AISSANI M., Maza H. & Belkessa B., « *Contribution à la modélisation du soudage TIG des tôles minces d’acier austénitique 304L par un modèle source bi-elliptique avec confrontation expérimentale* » *J. Physique IV-124*, 2005, pp 213-220.