



MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

L'Ecole Nationale Supérieure Polytechnique d'Alger

Département de Métallurgie

MÉMOIRE DE FIN D'ETUDE

Pour l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état en Métallurgie

Présenté par

KABA Liamine

Thème

Etude des paramètres du soudage TIG Pulsé

sur l'alliage d'Aluminium 2024 T3

Devant le jury composé de :

E. SALHI
M. BOUABDELLAH
M.DELLALI
M. DJEGHLAL
S.OUALLAM

Professeur, ENSP Alger
Professeur, ENSP Alger
Chargé de Cours ENSP
Maître de Conférences, ENSP Alger
Attaché de Recherche, CSC Alger

Président
Examineur
Examineur
Promoteur ENSP
Promoteur CSC

Année 2008-2009

Ecole Nationale Supérieure Polytechnique 10, Avenue Hassan Badi, El Harrach, Alger.

DEDICACES

Je dédie ce travail :

A mon père et ma mère.

A mes frères et sœurs

A toute ma famille

A tous mes amis.

Liamine

Remerciements

Je remercie Dieu le Tout puissant de m'avoir donné patience, santé et volonté tout au long de mes études.

Je tiens à remercier d'abord mes deux promoteurs M. Med ELamine DJEGHLAL et Seddik OUALLAM pour avoir accepté de m'encadrer et de me soutenir durant les moments difficiles de ce parcours. Merci pour vos encouragements.

Mes remerciements également tous les membres du jury d'avoir accepté de juger notre travail : Messieurs Pr. E.SALHI, Pr. M.BOUABDELLAH, Dr. M. DELLALI, respectivement président de jury et examinateurs de ce travail. C'est vraiment un grand honneur pour moi. Merci

Mes remerciements s'adressent à toutes les personnes qui ont collaboré à la réalisation de ce travail. En particulier :

- Les soudeurs de l'atelier de soudage du C.S.C, surtout tonton Rachid.
- Mes amis en particulier : Saci, Adel, Elhadja, Mostafa, A. Elslam,

Mes remerciements à mes Frères : Hocine, Hicham, Zouhir. Merci pour me courage et pour votre patience

J'exprime ma reconnaissance à tous les enseignants qui ont contribué de près ou de loin à ma formation.

ملخص:

إلحام خلأئط الألمنيوم بيدي دورا فعالا في المجالات الصناعية وخاصة السيارات و الطائرات و البواخر ...الخ.

تهدف هذه الدراسة إلى تقييم تأثير عوامل الإلحام على خلأئط 2024T3 , وهذا باستنباط الخصائص المميزة في مجال القابلية للإلحام ومعرفة العلاقة بين البنية المجهرية و ما يقابلها كتطورات في المميزات الميكانيكية في مختلف أنحاء الشريط الملح. و إمكانية تحديد هذه المميزات و ربطها إلى العقب الحرارية للإلحام المولدة من طرف جهاز الإلحام TIG و التقنية

الكلمات المفتاحية : التقنية TIG ، الألمنيوم,العقب الحرارية, الخصائص و المميزات

Résumé:

Le soudage des alliages d'aluminium présente un intérêt particulier dans le cadre de son application dans diverses industries, automobile, aéronautique et autres.

Ce travail, Consistera à évaluer, dans le domaine de soudabilité opératoire, l'influence des paramètres de soudage sur l'alliage 2024 T3, et les caractéristiques de la soudure. Les évolutions des caractéristiques mécaniques et microstructurales à travers le joint seront déterminées et reliées aux cycles thermiques du soudage engendré par le procédé TIG.

MOTS-CLES :

Soudage, procédé TIG, aluminium, Cycles thermiques, Caractérisation

ABSTRACT:

The welding of aluminum alloys has a particular interest within the framework of its application in various aeronautical and automobiles and others industries.

This work will consist in the evaluation, in the field of operational weldability, the influence of the welding parameters on 2024 T3 alloy, and the weld characteristics. The evolutions of the mechanical and microstructural characteristics of joint will be finding out and will be connected to thermal cycle of welding related to TIG process

KEY-WORDS:

Welding, TIG process, Aluminum, Thermals cycles, Characterization

Sommaire

CHAPITRE I : GENERALITE SUR L'ALUMINIUM ET SES ALLIAGES

Introduction	1
1. Obtention de l'aluminium.....	2
2. Propriétés d'usage des alliages d'aluminium.....	2
2.1. Propriétés physiques.....	2
2.2. Propriétés thermiques.....	3
2.3. Propriétés mécaniques.....	4
2.4. Propriétés électriques et magnétiques.....	6
3. Familles et désignation des alliages d'aluminium.....	7
3.1. Les alliages d'aluminium de fonderie.....	7
3.2. Les alliages d'aluminium corroyés.....	8
4. Les alliages à durcissement structural.....	9
A.Séquences de la précipitation dans les alliages.....	12
B.Principe du durcissement de precipitation ou durcissement structural.....	12
5. Quelques applications de l'aluminium et ses alliages.....	17

CHAPITRE II : SOUDAGE PROCEDES, PHENOMENES PHYSIQUE ET METALLURGIQUE

Introduction.....	19
1. Définition.....	19
2. Définition de la soudabilité.....	19
3. Condition d'installation de la liaison métallique.....	19
4. Les phénomènes thermiques, métallurgiques dans la zone affectée e par la chaleur en soudage.	21
5. Caractéristique de soudure.....	25
6. Procédés de soudage.....	Erreur ! Signet non défini.

CHAPITRE III : DISPOSITIF EXPERIMENTAL

1. Matériaux.....	36
2. Equipements du poste de soudage TIG.....	36

3. Enrobage.....	37
4. Polisseuse.....	37
5. Microscope optique.....	38
6. Microduromètre.....	39

CHAPITRE IV : RESULTATS ET DISCUSSION

PARTIE A : MODES OPERATOIRES

Introduction.....	41
1. Le cycle de soudage en courant pulsé.....	41
2. Les étapes de cycle de soudage de courant continu pulsé.....	41
3. Les paramètres de réglage de post de soudage de courant pulsé.....	42
4. Influence de la variation de la fréquence pour une intensité constante.....	43
5. Conclusion.....	47
6. Influence de la variation de l'intensité pour une fréquence constante.....	48
7. Influence du courant bas en fonction de la fréquence.....	49
8. Influence de la forte intensité I_0 et des paramètres du courant pulsé en fonction de la fréquence.....	50
9. Paramètres de soudage TIG pulsé.....	52
10. Conclusion.....	54

CHAPITRE IV : RESULTATS ET DISCUSSION

PARTIE B : CARACTERISATION METALLURGIQUE

Introduction.....	56
1. Etude métallographique.....	56
2. Observation métallographique.....	57
3. Conclusion.....	63
4. Caractérisation mécanique des soudures.....	63
Conclusion générale.....	66

Bibliographie

Liste de figure

Figure I.1: influence des éléments d'addition sur le module d'élasticité de l'aluminium.....	4
Figure I.2 : Diagramme TTT d'un alliage d'aluminium à 4% de Cu.....	12
Figure I.3 : le côté riche en aluminium du diagramme Al-Cu.....	14
Figure I.5: la solution solide de substitution Al-Cu.....	15
Figure I.6 : les zones de Guinier-Preston.....	15
Figure I.7 : formation des précipités Θ'	16
Figure I.8: formation des précipités Θ'	16
Figure I.9: formation de la phase d'équilibre.....	17
Figure II.1 schéma des enregistrements des cycles thermiques de soudage.....	21
Figure II.2 : Schéma d'aspect de cycle thermique dans la zone affectée par la chaleur.....	23
Figure II.3 : Evolution de la température maximale en fonction de la distance à la ligne de fusion comparaison des températures calcul.....	24
Figure II.4 : Les différentes zones de soudure	26
Figure II.5. (a): Schéma du procédé TIG.....	28
Figure II.5.(b): Principe du procédé de soudage TIG simple flux.....	29
Figure II.6 : Influence du type de courant et sa polarité sur la pénétration.....	30
Figure II.7: exemple de courant pulsé.....	31
Figure III.1: Poste de soudage TIG Type: FIM467-A Lincoln SQUARE WAVE TIG 355 CR99- 15.....	36
Figure III.2 : Les produits d'enrobage et ses moule.....	37
Figure III.3 : Polisseuse MECAPOL P200.....	38
Figure III.4 : Papier abrasif.....	38
Figure III.5 : Microscope optique utilisé est de type Zeiss Doté.....	39
Figure III.6 : Microduromètre.....	40
Figure IV.A.1 : Cycle de soudage en courant pulsé	41
Figure IV.A.2 : Le tableau de bord d'un générateur de soudage TIG / GTAW (Partie de TIG pulsé).....	42
Figure IV.A.3 : Histogramme de la variation de l'intensité haut et bas en fonction de la fréquence pour $I_0 = 60$	43
Figure IV.A.4 : Cordon de soudure à une intensité fixe à $I_0= 60$,(a) face endroit, (b) face envers.....	44

Figure IV.A.5 : Histogramme de la variation de l'intensité haute et basse en fonction de la fréquence pour $I_0 = 75$	45
Figure IV.A.7 : Histogramme de la variation de l'intensité haute et basse en fonction de la fréquence pour $I_0 = 100$ (A).....	46
Figure IV.A.8 : Cordon de soudure à une intensité fixe à $I_0 = 100$.(a'') face endroit, (b'') face envers.....	47
Figure IV.A.9 : Histogramme de la variation de l'intensité haute et basse en fonction de la fréquence.....	48
Figure IV.A.10 : Cordon de soudure à une fréquence fixe égale à 4Hz.(a1) face endroit, (b2) face envers.....	49
Figure IV.A.11 : Variation de l'intensité haute et basse en fonction de la fréquence.....50.....	50
Figure IV.A.12 : Variation de l'intensité haute et basse en fonction de la fréquence Pour $I = 200A$	51
Figure IV.A.13 : cordon de soudure à une fréquence fixe égale à 4 Hz.(a3) face endroit, (b4) face envers.....	51
Figure IV.A.14 : Aspect du cordon de la soudure1, (1') face endroit, (2') face envers.....	53
Figure IV.A.15: Mouvement rectiligne du déplacement de la torche.....	54
Figure IV.A.16 : Aspect du cordon de la soudure1, (3') face endroit, (4') face envers.....	54
Figure IV.A.17 : Aspect du cordon de la soudure1, (5') face endroit, (6') face envers.....	55
Figure IV.B.1: Métal de base sans attaque chimique.....	58
Figure IV.B.2 : Métal de base avec attaque chimique, (a) face, (b) profil.....	58
Figure IV.B.3 : Corrélacion entre le diagramme binaire A-B (Al-Cu) et les différentes zones d'un joint soudé.....	59
Figure IV.B.4 : Les différentes zones de transformations structurales (ZF-ZL-ZAT).....	60
Figure IV.B.5 : Structure de la zone fondue.....	61
Figure IV.B.6 : Structure de zone partiellement fondue ZPF.....	61
Figure IV.B.7 : Alliage Al-Cu traité thermiquement contenant des zones GP avant soudage:(a) diagramme de phase; (b) cycles thermiques; (c) courbe TTT de précipitation; (d) microstructure...62	62
Figure IV.B.8 Zone surmûrie de la ZAT.....	63
Figure IV.B.9 : Schéma du balayage de la microdureté.....	64
Figure IV.B.10 : (a), Profils de microdureté de soudure ; (b), profil moyenne de microdureté de soudure	65

Liste de tableau

Tableau I.1 : Variation de la conductivité Thermique en fonction de la température.....	3
Tableau I.2 : influence de la température sur le module d'élasticité.....	4
Tableau I.3 : classification d'alliages d'aluminium de fonderie.....	8
Tableau I.4 : représente la signification des désignations.....	9
Tableau I.5: Composition chimique de l'alliage 2024 (%massique).....	11
Tableau I.6: Propriétés physiques.....	11
Tableau I.7: Propriétés mécaniques.....	11
Tableau III.1 : Composition chimique de l'alliage d'aluminium 2024 T3.....	36
Tableau IV.A.1 : Variation de l'intensité en fonction de la fréquence pour $I_0 = 60$ (A).....	34
Tableau IV.A.2 : Variation de l'intensité en fonction de la fréquence pour $I_0 = 75$ (A).....	44
Tableau IV.A.3 : Variation de l'intensité en fonction de la fréquence.....	46
Tableau IV.A.4 : Variation de la fréquence en fonction de l'intensité.....	48
Tableau IV.A.5 : Influence du courant bas en fonction de la fréquence.....	49
Tableau IV.A.6 : Influence de la forte intensité I_0 et des paramètres du courant pulsé en fonction de la fréquence.....	50
Tableau IV.A.7 : Les paramètres de soudage des bonnes soudures réalisées.....	52

INTRODUCTION GENERALE

Ces dernières années, le soudage d'aluminium et ses alliages prend de plus en plus de l'ampleur et reste encore un domaine de recherche et d'actualité pour les différentes avaries qu'ils peuvent produire. Ce travail rentre dans le cadre d'un projet de recherche du centre de soudage et contrôle (C.S.C) sous la direction de **S.OUALLAM**, de souder des alliages non ferreux : aluminium, magnésium, titane, etc.... avec la collaboration de l'institut de Métallurgie de l'Ecole Nationale Polytechnique (E.N.P) sous la direction de **A.DJEGHLAL**.

La soudabilité des alliages d'aluminium reste une nouveauté en Algérie. Les applications industrielles de ces alliages sont dans divers domaines : aéronautique et automobile principalement.

Le procédé TIG convient en fait pour tous les matériaux soudables à l'exception du plomb et du zinc, ainsi pour tous les types de joints dans toutes les positions. Il s'utilise surtout pour le soudage des aciers inoxydables, des métaux légers tel que les alliages d'aluminium et de magnésium, et du cuivre, mais il convient tout particulièrement pour le soudage des matériaux minces d'une épaisseur comprise entre 0,5 et 3 mm.

Avec le développement technologique des procédés de soudages, de nouvelles sources de chaleurs sont appliquées comme l'apparition du TIG en courant pulsé et d'autres techniques d'assemblage telles que le soudage par faisceaux d'électrons, les lasers et le soudage par friction.

Notre travail est réparti en deux parties principales, la première concerne l'étude bibliographique qui comporte deux chapitres. Le premier chapitre traite des généralités sur l'aluminium et ses alliages et le deuxième sur la métallurgie de soudage de l'aluminium et ses alliages.

La deuxième partie de notre travail est consacrée à l'étude expérimentale. Cette partie comprend deux chapitres. Dans le premier chapitre nous présentons les méthodes expérimentales utilisées et le dispositif expérimental, et le deuxième les résultats et discussions qui concernent les modes opératoires et les caractérisations métallurgiques.

Enfin nous terminons le document par une conclusion générale.

Partie n° 1

ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

Chapitre I

GENERALITE SUR L'ALUMINIUM ET SES ALLIAGES

INTRODUCTION :

En 1854: première apparition de l'aluminium lors d'une présentation à l'Académie des sciences par le chimiste français Sainte-Claire Deville, sous la forme d'un lingot. Cette pièce avait été obtenue par voie chimique

En 1886: invention du procédé d'électrolyse de l'aluminium par Paul Héroult (France) et Charles Martin Hall (USA)

Depuis l'aluminium a connu un développement très important grâce notamment à son utilisation dans les industries ayant attrait au transport : aviation, automobile, marine. Il est aussi employé dans l'emballage, le bâtiment, l'électricité, la mécanique etc....

1. OBTENTION DE L'ALUMINIUM :

1.1. La Bauxite

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

1.2. L'alumine

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

1.3. L'aluminium

L'aluminium est obtenu à partir de l'alumine par électrolyse dans une cuve comportant un garnissage en carbone (cathode). L'aluminium formé par électrolyse se dépose au fond de la cuve [1].

2. PROPRIETES D'USAGE DES ALLIAGES D'ALUMINIUM

2.1. Propriétés physiques

a) *Propriétés atomique et cristallines*

- Numéro atomique : 13.
- Masse atomique : les valeurs actuellement acceptées sont:
 - 26,981 5 (valeur basée sur ^{12}C) ;
 - 26,989 74 (valeur basée sur ^{16}O).
- Isotopes :

- Le principal isotope, ^{27}Al , est stable et comprend 14 neutrons et 13 protons ; à l'exception de l'isotope ^{26}Al qui a une demi-durée de vie de l'ordre de 106 années, les autres isotopes, produits artificiellement, ont une demi-durée de vie très courte

- Valence de l'aluminium dans les composés chimiques : 3
- Structure cubique à faces centrées.
- Constante réticulaire : $4,049\ 596 \times 10^{-10}$ m à 298 K.
- Diamètre atomique : $2,86 \times 10^{-10}$ m.
- Volume atomique : $9,999 \times 10^{-6}$ m³[2].

b) Masse volumique :

La masse spécifique de l'aluminium et des alliages d'aluminium-magnésium varie de 2.7 (Al pur) à 2.63 selon la teneur en élément d'addition. Cette légèreté est un avantage pour la manutention des ensembles de grande dimension.

2.2. Propriétés thermiques :

a. Température Fusion

L'aluminium pur fond à 650 °C. Pour les alliages Al-Mg et Al-Cu la température de fusion décroît avec l'augmentation de teneur en Mg et en Cu. [3]

b. Vaporisation

La température d'ébullition est de 2500 °C environ. la chaleur de vaporisation est de 10 780 kJ/kg

A l'état liquide, l'aluminium liquide a une très faible tension de vapeur à basse température mais qui s'élève très vite avec celle-ci.

c. Coefficient de Dilatation linéaire :

D'environ 24×10^{-6} /°C aux températures ordinaire et en moyenne de 28×10^{-6} /°C près de la température de fusion. il est sensiblement double de l'acier. Les déformations dues à la chaleur de soudage sont cependant bien inférieurs à ce que laissent supposer ces valeurs, car les températures de fusion et de soudage de l'aluminium sont très inférieures à celles de l'acier. [3]

d. Conductivité thermique :

La conductivité thermique est de 237 w / (m × k) à la température ambiante .Elle varie en fonction de la température (**Tableau I.1**).

302. W / (m. k) à - 173 °C
237. W / (m. k) à + 020 °C
208. W / (m. k) à + 660 °C-état solide-
091. W / (m. k) à + 660 °C-état liquide-

Tableau I.1 : Variation de la conductivité Thermique en fonction de la température[4].

Au-dessous de -173°C , la conductivité thermique de l'aluminium de pureté titre 99,99 et plus, est très sensible au niveau des impuretés.

2.3. Propriétés mécaniques :

1) Module d'élasticité:

La littérature cite pour le module d'élasticité de l'aluminium pur des valeurs comprises entre 63 et 71 GPa, avec 66,6 GPa comme valeur la plus probable. Cette valeur varie en fonction de différents paramètres :

1. elle augmente en présence d'éléments étrangers (additions ou impuretés), aussi la valeur de 69 GPa est-elle généralement admise pour l'aluminium dit commercialement pur (**figure I.1**) ;
2. elle diminue lorsque la température augmente (**tableau I.2**).

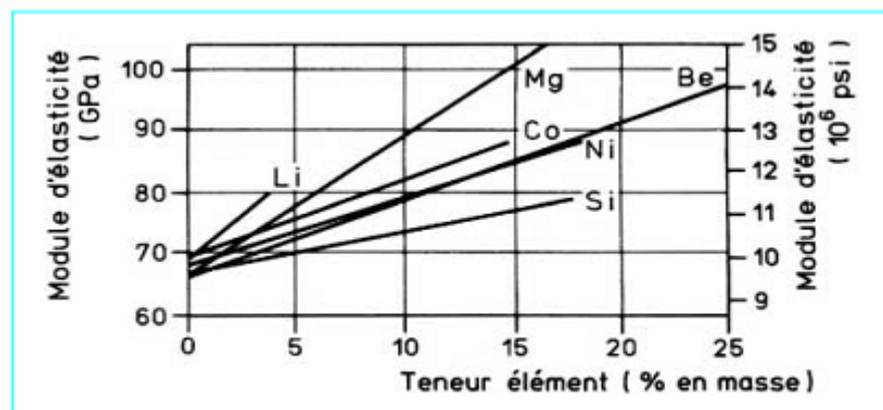


Figure I.1: influence des éléments d'addition sur le module d'élasticité de l'aluminium. [2]

Température (°C)	Module d'élasticité (1) (%)
- 195	112
- 85	105
- 29	102
+ 24	100
+ 100	98
+ 149	95
+ 204	90
+ 260	80

(1) Base 100 à 24 °C.

Tableau I.2 : influence de la température sur le module d'élasticité [2].

2) Résistance à la fatigue:

Les courbes de Wöhler des alliages d'aluminium présentent les caractéristiques générales ci-après :

— absence de coude marqué contrairement à la plupart des aciers et alliages de titane ;

— tendance à ne donner une asymptote qu'à partir de 10^8 cycles, d'où la nécessité de conduire les essais de fatigue jusqu'à 10^8 cycles pour connaître la limite de fatigue ; des essais réalisés par flexion rotative à la fréquence de 3 000 cycles/min ont toutefois montré qu'une légère baisse de la limite de fatigue pouvait être observée si l'expérimentation était conduite jusqu'à 10^9 cycles ;

Exemple :

- alliage 2024-T4: Limite de fatigue à 10^8 cycles : ± 170 MPa,

Limite de fatigue à 10^9 cycles : ± 165 MPa ;

- alliage 5056-0 : Limite de fatigue à 10^8 cycles : ± 125 MPa,

Limite de fatigue à 10^9 cycles : ± 110 MPa.

— rapport entre la limite de fatigue à 10^8 cycles (en contraintes alternées) et la charge de rupture en traction – ou rapport d'endurance : égal à :

- 0,35 à 0,45 dans le cas des alliages sans durcissement structural (alliages séries 1000, 3000 et 5000),
- 0,25 à 0,35 dans le cas des alliages avec durcissement structural

(Alliages séries 2000, 6000 et 7000) ; d'une façon générale, ce rapport diminue lorsque la charge de rupture augmente.

Différents facteurs conditionnent l'initiation des fissures de fatigue et, par suite, la limite de fatigue [5].

3) Résistance à la corrosion :

L'aluminium présente en pratique une excellente résistance à la corrosion puisqu'on peut souvent l'utiliser sans revêtement. Convenablement choisi, l'aluminium – ou l'alliage d'aluminium – non protégé résiste notamment aux intempéries, à l'eau douce, à l'eau de mer et à de nombreux produits alimentaires et chimiques [5].

- Corrosion généralisée ou uniforme

L'aluminium mis à nu se recouvre instantanément d'une couche d'oxyde de 5 à 10 nm d'épaisseur et sa résistance à la corrosion dépend de la stabilité de cette couche d'oxyde vis-à-vis du milieu corrosif.

La corrosion généralisée se caractérise par une diminution d'épaisseur uniforme sur toute la surface du métal : la couche d'oxyde étant dissoute d'une façon régulière par l'agent corrosif.

Dans une atmosphère naturelle, rurale ou marine, la vitesse de corrosion de l'aluminium est extrêmement faible, et ne dépasse pas 5 $\mu\text{m}/\text{an}$,

Elle est, par exemple, de 1 $\mu\text{m}/\text{an}$ pour l'aluminium nuance 1050-H24 exposé durant 8 ans en atmosphère marine, elle est de 5 $\mu\text{m}/\text{an}$ pour l'alliage 5052 immergé sans protection durant 20 ans dans de l'eau de mer.

D'une façon générale, la résistance à la corrosion généralisée de l'aluminium dépend du pH du milieu corrosif, la corrosion ne pouvant pratiquement se produire que dans les milieux acides avec $\text{pH} < 4$ et dans les milieux basiques avec $\text{pH} > 9$. Mais en fait, pour un pH donné, la vitesse de corrosion dépend beaucoup des ions présents dans la solution et il existe des exceptions aux limites de pH à l'intérieur desquelles on peut utiliser l'aluminium : ainsi l'aluminium résiste à la corrosion dans l'acide nitrique concentré ($\text{pH} = 1$) et dans l'ammoniaque ($\text{pH} = 13$).

Une autre exception à cette règle qui lie l'agressivité du milieu au pH est la bonne résistance de l'aluminium au béton dont le pH peut atteindre 10 à 12. L'expérience montre que les contacts avec les ciments ne sont pas nuisibles à condition de veiller à ce qu'il n'y ait pas, dans le scellement, de l'acier en contact avec l'aluminium [2].

2.4. Propriétés électriques et magnétiques

(a) Résistivité électrique :

Elle passe de 2.8 $\mu\Omega \cdot \text{cm}^2/\text{cm}$ pour l'aluminium à 99.5 % à valeur qui varie de 4.5 à 6.5 pour les alliages au magnésium. Dans le cas de l'aluminium, elle est sensiblement le tiers de celle de l'acier qui varie d'environ 12 à 19 $\mu\Omega \cdot \text{cm}^2/\text{cm}$.

Cette caractéristique, ainsi que la conductibilité thermique élevée, ont pour conséquence que les machines de soudage par résistance doivent être considérablement plus puissantes que pour le soudage de l'acier mais déterminent un soudage plus rapide [3].

(b) Coefficient de Hall. Résistivité magnétique :

La valeur généralement admise pour le coefficient de Hall est :

$$R_H = - 3,5 \times 10^{-2} \text{ mm}^3 \cdot \text{A}^{-1} \cdot \text{s}^{-1} \text{ à la température ambiante [2].}$$

3. FAMILLES ET DESIGNATION DES ALLIAGES D'ALUMINIUM :

Bien que la plupart des métaux et certains métalloïdes soient capables de former avec l'aluminium des solutions, les alliages l'aluminium sont en fait basés sur quelque système seulement :

Aluminium – cuivre

Aluminium – manganèse

Aluminium – magnésium

Aluminium – silicium

Aluminium – zinc

Les alliages d'aluminium sont désignés à l'aide d'un système numérique de quatre chiffres. Ces quatre chiffres identifiant la composition chimique de l'alliage. Ce groupe de quatre chiffres est parfois suivi d'une lettre indiquant une variante nationale.

Suivant le mode de transformation des alliages, on distingue :

- les alliages de moulage : sont utilisés en fonderie pour la fabrication de pièces obtenues par la coulée du métal liquide dans des moules ensable, c'est la coulée en sable, ou des moules en acier ou en fonte, c'est la coulée en coquille. Par ce procédé, on élabore des pièces aux formes plus ou moins complexes : poignées de portes, blocs moteurs...etc.
- les alliages de corroyage : sont coulés en fonderie sous forme de plaques ou de billettes et ensuite transformés en demi-produits : tôles, profilés,..., par laminage ou par filage, les demi-produits ainsi obtenus sont ensuite utilisés dans la construction mécanique où ils sont assemblés par soudage, rivetage, vissage,..., dans le bâtiment, dans l'électricité,...etc[6].

3.1. Les alliages d'aluminium de fonderie

Les alliages d'aluminium de fonderie (série à trois chiffres) sont les plus versatiles de tous les alliages de fonderie et ils offrent de façon générale une facilité de mise en forme, contrairement aux alliages de corroyage (série à quatre chiffres). Les alliages d'aluminium, comme tous les autres matériaux de fonderie, ont les caractéristiques suivantes :

- Une bonne fluidité pour bien remplir toutes les parties du moule.
- Un point de fusion relativement bas.
- Un transfert de chaleur rapide de l'aluminium liquide vers le moule, ce qui assure un cycle de mise en forme rapide.
- L'hydrogène qui est le seul gaz avec lequel l'aluminium et ses alliages sont solubles peut être contrôlé efficacement.

- Plusieurs alliages d'aluminium n'ont relativement pas de tendance au craquage à chaud.
- Une bonne stabilité chimique.
- Un bon état de surfaces lustré et peu ou pas de défauts [7].

3.1.1. Classification des alliages d'aluminium de fonderie :

Ce système contient trois chiffres plus une décimale (par ex. 356.0). L'élément d'alliage principal. Les deuxième et troisième chiffres identifient l'alliage spécifique s'il s'agit d'une pièce moulée (.0) ou d'un lingot (.1 Ou .2) voir le **tableau I.3** [9].

Séries d'alliages	Eléments d'alliages principaux
1xx.x	99% d'aluminium minimum
2xx.x	Cuivre
3xx.x	Silicium
4xx.x	Silicium +cuivre et/ou magnésium
5xx.x	magnésium
6xx.x	N'existe pas
7xx.x	zinc
8xx.x	Etain
9xx.x	Autres éléments

Tableau I.3 : classification d'alliages d'aluminium de fonderie [8].

3.2. Les alliages d'aluminium corroyés :

Le premier chiffre indique l'élément d'alliage le plus important (Xxxx). Il est également utilisé pour désigner les différentes séries d'alliages d'aluminium telles que séries 1000, 2000 jusqu'à 8000 le deuxième chiffre (xXxx), s'il n'est pas nul, indique s'il y a eu modification de l'alliage spécifique. Les troisième et quatrième chiffres identifient un alliage spécifique dans la série. Par ex. pour l'alliage 5183, le chiffre 5 indique qu'il s'agit d'un alliage de magnésium, le chiffre 1 indique qu'il s'agit de la première modification par rapport à l'alliage originel 5083 et le nombre 83 identifie l'alliage dans la série 5xxx.

La seule exception dans la série est la série 1xxx (l'aluminium pur) où les deux derniers chiffres donnent la teneur en aluminium minimale au-dessus de 99%. L'alliage 1350 contient donc au moins 99.50% d'aluminium (voir **tableau I.4**) [8].

Tableau I.4 : représente la signification des désignations [9].

Série	Désignation	Élément d'alliage principal	Phase principale présente dans l'alliage
Série 1000	1XXX	99% d'aluminium au minimum	-
Série 2000	2XXX	Cuivre (Cu)	Al ₂ Cu - Al ₂ CuMg
Série 3000	3XXX	Manganèse (Mn)	Al ₆ Mn
Série 4000	4XXX	Silicium (Si)	-
Série 5000	5XXX	Magnésium (Mg)	Al ₃ Mg ₂
Série 6000	6XXX	Magnésium (Mg) et Silicium (Si)	Mg ₂ Si
Série 7000	7XXX	Zinc (Zn)	MgZn ₂
Série 8000	8XXX	Autres éléments	-
Série 9000	/	Non utilisé	-

Suivant le processus par lequel les différents niveaux de caractéristiques mécaniques sont obtenus, on distingue pour les alliages de corroyage :

- les alliages à durcissement structural ou « trempants » dans lesquels le durcissement est obtenu par une gamme de traitement thermique comportant une mise en solution, une trempe suivie d'un revenu ou d'une maturation à l'ambiante,
- Les alliages non susceptibles de durcissement structural (ou non trempants) dans lesquels le niveau de caractéristiques mécaniques est obtenu par l'effet d'écrouissage dû aux déformations (laminage, filage...) ou par des recuits [6].

4. Les alliages à durcissement structural :

Introduction

Le durcissement d'un alliage lors de la maturation ou du revenu est dû à l'interaction des dislocations avec les zones GP et les phases précipitées, en ce sens que la présence de ces particules précipitées tend à bloquer le mouvement des dislocations, rendant ainsi plus difficile la propagation de la déformation et augmentant, par conséquent, la résistance mécanique de l'alliage

4.1. Les alliages à durcissement structural :

Les alliages d'aluminium à durcissement structural (série 2000, 6000 et 7000) sont utilisés dans le cadre de l'allègement des structures de transport aérien, naval et terrestre. Cependant, ces alliages sont difficilement soudables par voie classique et le principal moyen d'assemblage reste le rivetage dans le cas aéronautique. Ce processus présente de nombreux désavantages comme une jonction hétérogène entre les deux tôles, le surcroît de masse ainsi

que la concentration de contraintes au niveau des trous, particulièrement dommageable pour la tenue en fatigue.

4.1.1. Série 7000 (aluminium zinc) :

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

Pour retrouver une bonne résistance à la corrosion, il faut effectuer ce qui est appelé un sur-revenu ou revenu à double palier (T7). Ce traitement se paie par une baisse des caractéristiques mécaniques.

Ces alliages se divisent en deux groupes : les 7000 avec addition de cuivre et les 7000 sans addition de cuivre.

4.1.1.1. Les alliages 7000 avec cuivre :

Ce sont eux qui ont les meilleures résistances mécaniques (à l'état T6). Le sur-revenu fait baisser les caractéristiques mécaniques d'environ 20 %.

L'alliage le plus connu de ce groupe est le 7075 utilisé en aéronautique, armement, sport.

4.1.1.2. Les alliages 7000 sans cuivre :

En les comparant avec les alliages avec cuivre, ils ont de moins bonnes caractéristiques mécaniques mais une meilleure résistance à la corrosion. Certains comme le 7020 présentent également de bonnes aptitudes à la soudure [9].

4.1.2. Série 6000 (aluminium magnésium silicium) :

Les éléments d'alliage de cette série sont le magnésium (Mg) et le silicium (Si). Cette famille d'alliage a une grande importance industrielle. Elle est très utilisée pour les profilés.

Ils ont une très bonne aptitude à la déformation (filage, matriçage principalement) et à la mise en forme à froid à l'état recuit. Leurs caractéristiques mécaniques sont moyennes et sont inférieures à celles des alliages 2000 et 7000. Ces caractéristiques peuvent être augmentées par addition de silicium qui donnera le précipité durcissant Mg_2Si . Ils ont une excellente résistance à la corrosion notamment atmosphérique. Ils se soudent très bien (soudure à l'arc ou brasage).

On peut les diviser en deux groupes.

- Un groupe dont les compositions sont plus chargées en magnésium et silicium (6061, 6082 par exemple). Ils sont utilisés pour des applications de structure (charpente, pylône...), ainsi qu'en aéronautique (liaisons électriques, boîtiers électroniques embarqués..).
- Une deuxième catégorie moins chargée en silicium qui par conséquent aura des caractéristiques mécaniques plus faibles. C'est le cas du 6060 qui permettra de grandes

vitesses de filage mais qui aura des caractéristiques mécaniques plus faibles. Il sera utilisé par exemple en décoration et ameublement, menuiserie métallique.

4.1.3. Série 2000 (aluminium cuivre) :

L'élément d'alliage de la famille 2000 est le cuivre (Cu). Ils obtiennent leurs caractéristiques mécaniques par durcissement structural. Ils sont caractérisés par de bonnes caractéristiques mécaniques notamment à l'état trempé revenu ou mûré. C'est grâce à ces caractéristiques mécaniques qu'ils ont été choisis pour les applications aéronautiques. Ils présentent également de bonnes aptitudes de tenue à chaud et pour le décolletage. En revanche, ils ont une résistance à la corrosion faible en atmosphère corrosive du fait de la présence de cuivre.

Ces alliages ont de nombreuses applications en aéronautique et en mécanique. En général, ils sont utilisés pour des pièces soumises à des contraintes [9].

4.1.3.1. L'alliage d'aluminium 2024 T3 :

L'alliage 2024 est un alliage d'Al-Cu voire Al-Cu-Mg de composition chimique et de propriétés physiques et mécaniques données par les tableaux 1,2et 3 respectivement.

Tableau I.5: Composition chimique de l'alliage 2024 (%massique) [10].

Al	Cu	Mg	Mn	Fe	Si	Zn	Ti	Cr	Autres
90.7-94.7	3.8-4.9	1.2-1.8	0.3-0.9	<0.5	<0.5	<0.25	<0.15	<0.1	<0.15

Tableau I.6: Propriétés physiques [11].

Etat	R _e (2%) (MPa)	R _r (MPa)	A% L ₀ =50mm 5.65√S ₀	Resistance au cisaillement (MPa)	HB (P=5D ²)	Contrainte de fatigue(MPa) 500MHz
T3	345	485	18	285	120	140
T6	396	475	10	/	/	/

Tableau I.7: Propriétés mécaniques [11].

Etat	R _e (2%) (MPa)	R _r (MPa)	A% L ₀ =50mm 5.65√S ₀	Resistance au cisaillement (MPa)	HB (P=5D ²)	Contrainte de fatigue(MPa) 500MHz
T3	345	485	18	285	120	140
T6	396	475	10	/	/	/

A. Séquences de la précipitation dans les alliages :

Le durcissement structural des alliages d'aluminium s'effectue en 3 principales étapes:

- Mise en solution à une température suffisamment élevée pour mettre le plus grand nombre d'éléments durcissant ;
- Refroidissement rapide ou trempe à l'eau ou à l'huile ; On évite ainsi le nez de la courbe TTT (**figure I.2**) et on obtient à température ambiante une solution solide fortement sursaturée[12].
- Maturation ou revenu pendant lesquels se produit la décomposition contrôlée de la solution solide sursaturée. C'est durant cette dernière étape qui sera responsable du durcissement structural. C'est des phénomènes complexes que nous allons présenter dans le cas des alliages Al-Cu et Al-Cu-Mg.

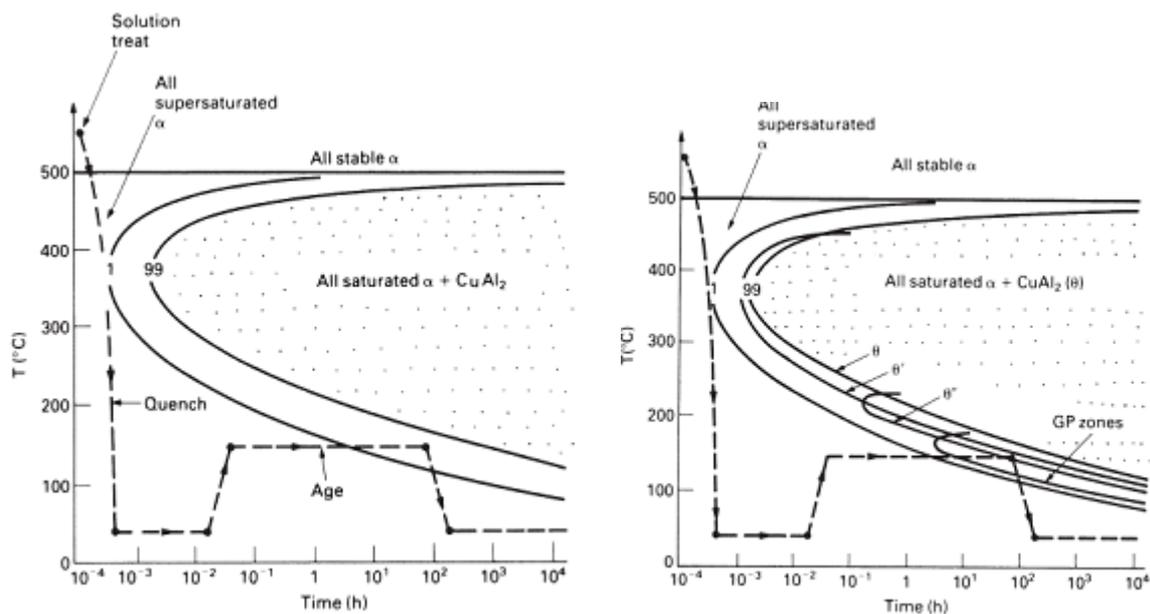


Figure I.2 : Diagramme TTT d'un alliage d'aluminium à 4% de Cu [13].

B. Principe du durcissement de précipitation ou durcissement structural :

1. Diagramme d'équilibre Al-Cu :

Le diagramme de phases Al-Cu est donné sur la **figure I.3**. Il nous indique qu'entre 500 et 580°C, l'alliage Al—4%Cu est monophasé : le cuivre fait dans l'aluminium une solution solide désordonnée de substitution. En dessous de 500°C l'alliage devient biphasé $\alpha + \text{Al}_2\text{Cu}$. Au fur et à mesure que la température diminue, la proportion d' Al_2Cu augmente. A la température ambiante, les proportions d'équilibre sont de 93% de phase α de 7% d' Al_2Cu . [14]

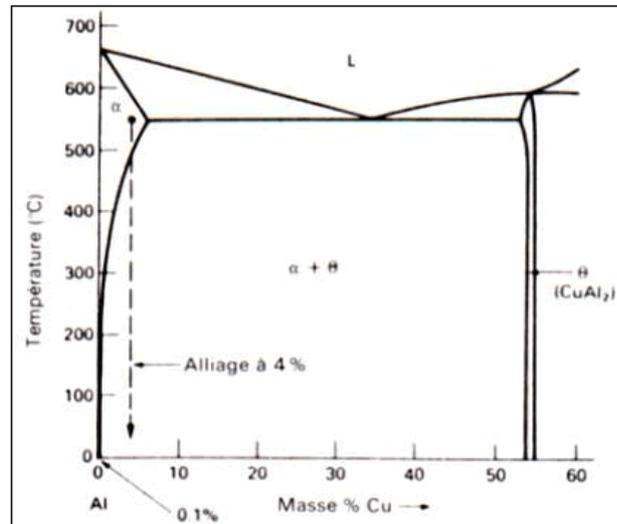


Figure I.3 : le côté riche en aluminium du diagramme Al-Cu [14].

2. Morphologie de la précipitation :

Dans le cas d'un refroidissement lent, les précipités sont grossiers et très espacés.

Et dans le cas d'un refroidissement rapide, ils sont fins et très rapprochés. **Figure I.4.**

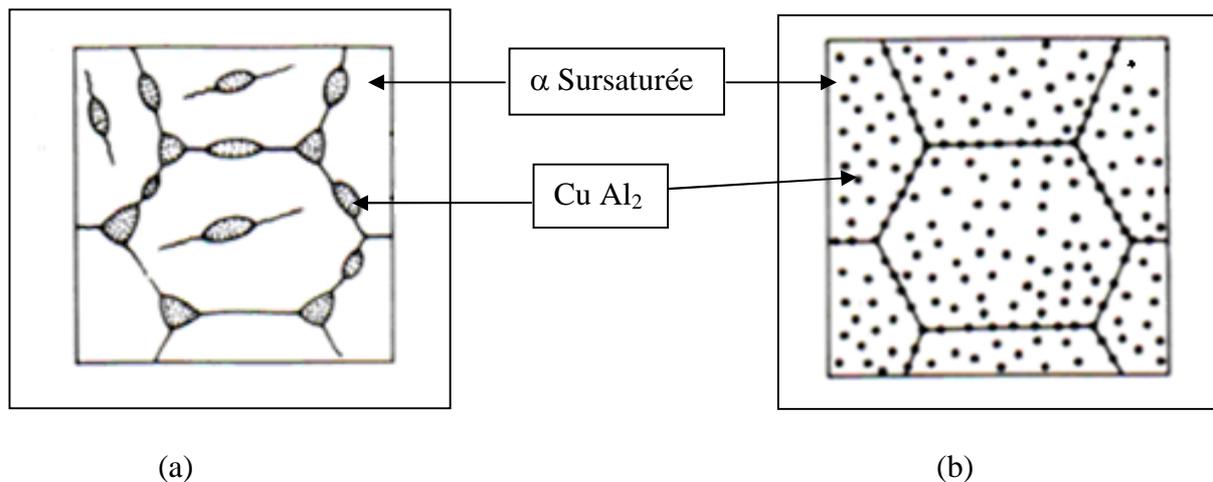


Figure I.4 : microstructures obtenues à l'ambiante dans un alliage Al-4% Cu. a) par refroidissement lent à partir de 550°C. b) par refroidissement rapide à partir de 550°C [13].

Quand on refroidit lentement, l'enthalpie libre de précipitation est faible et le taux de germination est faible aussi. Pour assurer la proportion d'équilibre en Al_2Cu , les rares germes doivent croître en de gros précipités très distants les uns des autres. Les dislocations n'ont pas de mal à contourner les précipités et l'alliage ainsi obtenu a de faibles caractéristiques mécaniques.

Si au contraire, on refroidit l'alliage rapidement, la structure obtenue est beaucoup plus fine. Comme l'énergie motrice est élevée, le nombre de germes l'est aussi. Les précipités, quoique petits, sont très rapprochés. Les dislocations mobiles ont du mal à les franchir et l'alliage est ainsi plus dur.

Si on refroidit trop rapidement, on n'a pas de précipitation du tout. Cependant, il est possible d'augmenter considérablement la dureté de l'alliage en lui faisant subir un vieillissement [13].

3. Etapes du traitement thermique :

Pour faire ce traitement sur l'alliage Al – 4% Cu, on suit 3 étapes :

3.1. Mise en solution :

On effectue une mise en solution à 550°C, ainsi le Cuivre est totalement dissous.

3.2. Trempe :

On refroidit rapidement à température ambiante par trempe à l'eau ou à l'huile. On évite ainsi le nez de la courbe TTT et on obtient à température ambiante une solution solide fortement sursaturée.

3.3. Revenu :

L'alliage est ensuite maintenu pendant 100 heures à 150°C. On parle de vieillissement. La solution sursaturée se transforme en un mélange $\alpha + \text{Al}_2\text{Cu}$. L'énergie motrice est telle que la structure est très fine et l'alliage très dur.

4. Evolution de la sursaturation :

En fait, la solidification se fait en 4 états successifs :

*Solution solide sursaturée $\alpha \rightarrow \text{Zones Guini} - \text{Preston} \rightarrow \text{Phase } \theta'' \rightarrow \text{Phase } \theta'$
 $\rightarrow \text{Phase } \theta$. [16]*

4.1. Solution solide sursaturée :

La solution solide α est sursaturée. Les atomes de Cuivre sont en substitution au hasard, **figure I.5** [15].

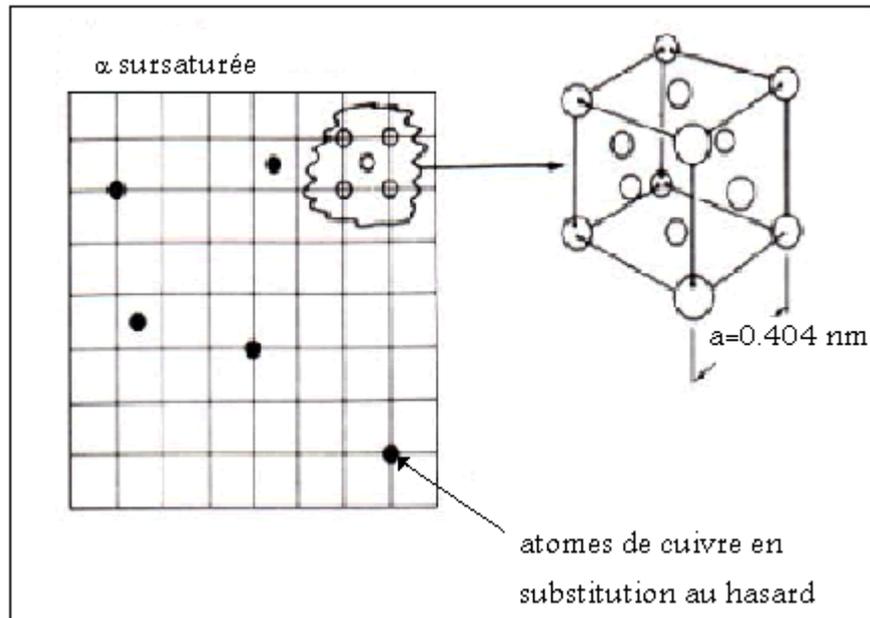


Figure I.5: la solution solide de substitution Al-Cu [14].

4.2.Zones de Guignier – Preston :

Des zones GP sous forme de disques germent à partir de la solution solide. Les faces des disques sont parfaitement cohérentes avec la matrice. Les côtés des disques sont aussi cohérents mais avec une forte déformation, **figure I.6**

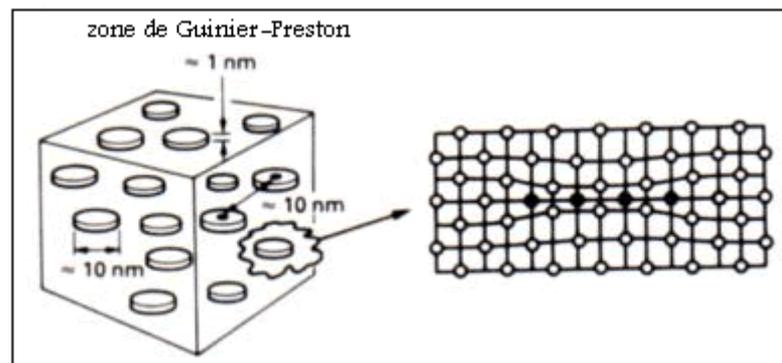


Figure I.6 : les zones de Guinier-Preston [14].

Formation des précipités Θ'' :

Certaines zones GP croissent pour former les précipités Θ'' . Les autres zones GP se dissolvent alors et le cuivre ainsi libéré est incorporé par diffusion aux précipités Θ'' qui grossissent.

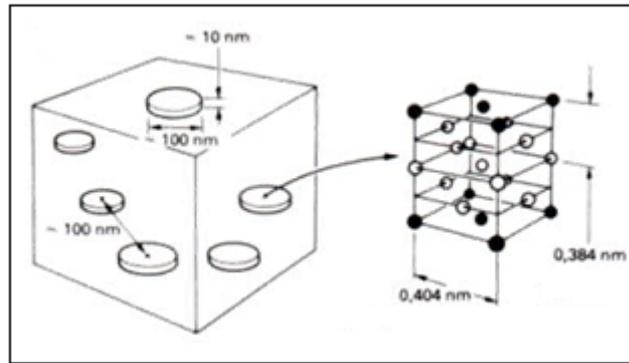


Figure I.7 : formation des précipités Θ' [14].

Les faces des disques sont cohérentes avec la matrice. Les côtés des disques le sont aussi mais l'écart paramétrique génère des contraintes élastiques de cohérence.

4.3. Formation des précipités Θ' :

Des précipités Θ' germent sur les dislocations de la matrice. Les précipités Θ'' se dissolvent alors et le cuivre libéré est incorporé à la phase Θ' qui grossit, **figure I.8**.

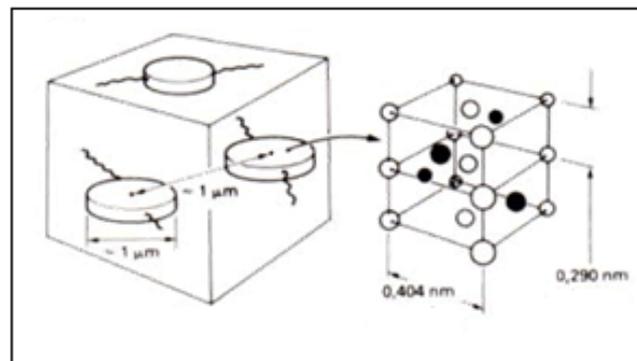


Figure I.8: formation des précipités Θ' [14].

Ni les unes ni les autres ne génèrent de contrainte de cohérence mais pour des raisons différentes.

4.4. Formation de la phase d'équilibre Θ :

La phase d'équilibre (Θ) Al_2Cu germe aux joints des grains et aux interfaces Θ' /matrice, Figure (9). Les précipités Θ' se dissolvent et transfèrent le cuivre à la phase Θ qui précipite. Al_2Cu est complètement incohérent avec la matrice. Il ne croît plus sous forme de disque, mais sous forme de globules [15].

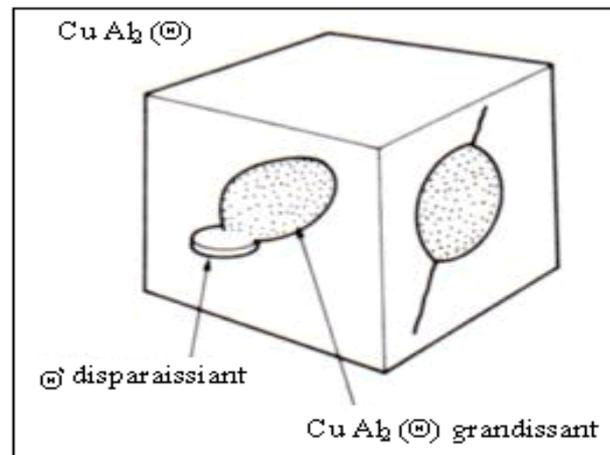


Figure I.9: formation de la phase d'équilibre [14].

5. Quelques applications de l'aluminium et ses alliages :

Aluminium dans les transports La nécessité de réduire le poids des véhicules en vue de diminuer leur consommation de carburant, ou d'augmenter leur charge utile ou leur rayon d'action, conduit la plupart des constructeurs à substituer de plus en plus d'aluminium à d'autres matériaux lourds, notamment à la fonte, l'acier, les métaux cuivreux.

a) Automobile :

Dans le domaine de l'automobile où la bataille entre matériaux est la plus spectaculaire, l'aluminium est en compétition avec la fonte sur les blocs moteurs, avec les céramiques sur les pistons, avec l'acier, les plastiques, le magnésium sur les carters, avec le cuivre sur les échangeurs, avec l'acier, les plastiques, les composites sur la carrosserie.

b) Transports aérospatiaux

Aluminium et aéronautique ont toujours été, et sont encore, étroitement liés. Si l'aéronautique put commencer avec les appareils dont les structures en bois, son véritable démarrage ne fut rendu possible que grâce à l'invention en 1903 d'un alliage aluminium-cuivre-magnésium, commercialisé sous le nom de duralumin, aujourd'hui alliage 2017 ; dont les premières applications furent en 1914 les structures des dirigeables Zeppelin et, en 1917, les structures des avions militaires Breguet 14 construits en 12 000 exemplaires. La prépondérance de l'aluminium dans l'aéronautique n'a pu être conservée que par une évolution considérable au fil des ans des alliages utilisés ; aujourd'hui encore l'aluminium représente près de 80% de la masse à vide des structures des avions modernes.

c) Aluminium dans l'armement et les équipements militaires

L'aluminium occupe une place importante dans ce domaine ; citons :

- Les chars et véhicules blindés : roues ou galets en alliage 2014 matricé, blindage (à égalité de poids, les alliages du type 7020 présentent des propriétés balistiques voisines de celles de l'acier de blindage) ;
- Les véhicules amphibies ;
- Les obusiers (exemple : M-102 la légèreté de l'aluminium permet le transport par hélicoptère)
- Les munitions ;
- Les pièces balistiques : fonds et corps de propulseurs en alliages 2014, 7049,7075 ;
- Les tubes (bazookas), les lance- rockets ;
- Les matériels de génie militaire : engins de franchissement en alliage 7020 soudé.

Chapitre II

**SOUDAGE PROCEDES, PHENOMENES
PHYSIQUE ET METALLURGIQUE**

Introduction :

La réalisation d'assemblages indémontables, en fabrication mécanique, utilise couramment les procédés de soudage. Ces techniques assurent la continuité des pièces à assembler contrairement au rivetage, sertissage, collage ou boulonnage qui présentent des discontinuités physiques ou chimiques [17].

1. Définition :

Le soudage est une opération qui consiste à réunir deux ou plusieurs parties constitutives d'un assemblage, de manière à assurer la continuité entre les parties à assembler ; soit par chauffage, soit par intervention de pression, soit par l'un et l'autre, avec ou sans métal d'apport dont la température de fusion est du même ordre de grandeur que celle du matériau de base [18].

2. Définition de la soudabilité :

Un matériau est soudable à un degré donné, par un procédé et pour un type d'application donnés, lorsqu'il se prête, moyennant les précautions correspondant à ce degré, à la réalisation d'une construction entre les éléments de laquelle il est possible d'établir la continuité métallique par la constitution de joints soudés qui, par leurs propriétés locales et les conséquences globales de leur présence, satisfont aux caractéristiques requises et choisies comme bases de jugement [19].

3. Condition d'installation de la liaison métallique :

Installer la liaison métallique consisterait, théoriquement, à rapprocher les surfaces à unir de telle sorte que les atomes superficiels parviennent à des distances de l'ordre de grandeur des distances inter-nœuds de leur système cristallin propre. Cette opération, qui supposerait au départ que les surfaces soient chimiquement propres et dans un état de poli spéculaire, n'est pas réalisable pratiquement.

Donc les deux conditions d'installation de la liaison métallique sont : l'activation de la surface et l'élimination des gênes.

3.1. Processus d'activation de surface :

Il existe trois types d'activation de surface

- le plus efficace est la fusion qui, simultanément, peut assurer leur nettoyage. La liaison métallique est créée par la solidification. Différents processus peuvent être mis en œuvre:

1. Les deux pièces à assembler subissent une fusion superficielle et participent

donc à la formation d'un bain de métal fondu (avec, éventuellement, l'addition d'un métal d'apport) qui se solidifie sans action mécanique.

2. Les deux pièces à assembler subissent une fusion superficielle mais une action mécanique extérieure chasse le métal fondu et crée l'assemblage en mettant en contact les surfaces à la température du solide.

3. Les deux pièces à assembler subissent une fusion localisée et participent à la formation d'un noyau captif de métal fondu qui au cours de la solidification est compacté par l'action d'un effort extérieur de compression.

➤ Activation de surface par échauffement sans fusion. En général elle est complétée

par une action mécanique qui permet, en outre le nettoyage et l'amélioration du contact des surfaces à assembler.

➤ Activation de surface par action mécanique et sans échauffement globale notable des pièces à assembler. Cette action mécanique provoque une plastification de l'extrême couche de chaque surface et engendre un échauffement très localisé qui permet l'établissement de la liaison métallique [20].

3.2.Élimination des gênes à l'installation de la liaison :

Les gênes à l'installation de la liaison métallique peuvent être de diverses sortes :

- Irrégularités géométriques de surface : seront susceptibles de perturber l'installation à la liaison métallique dans tous les cas où il n'y aura pas fusion superficielle des pièces à assembler. il sera alors nécessaire de procéder à une préparation des surfaces par action mécanique (meulage, usinage..).

- Pollution de la surface (oxydes, graisses, humidité..), elle devra être éliminée par une action mécanique (sablage, meulage...) ou chimique (solvants, décapage, séchage...).

- Éléments chimiques apportés par l'atmosphère ambiante : l'opération de soudage étant

généralement réalisé à l'air, ce sont surtout l'oxygène, l'azote et l'hydrogène qui peuvent être nocifs :

- Formation d'oxydes métalliques qui constituent des inclusions dans le métal solidifié.

- Formation de soufflures dans le métal fondu par suite une baisse de la solubilité, cette soufflure peut être aggravée par formation des gaz par des réactions chimiques avec le métal [20].

4. Les phénomènes thermiques, métallurgiques dans la zone affectée e par la chaleur en soudage :

En règle générale, les opérations de soudage modifient profondément les structures métallurgiques et les propriétés locales des pièces assemblées. Dans certains cas extrêmes elles peuvent être à l'origine de défauts tels que fissures, porosités ou d'une fragilisation locale. Il importe donc de bien connaître l'influence de différents facteurs tels que les cycles thermiques de soudage et la composition chimiques des pièces à assembler [21].

4.1. Cycles thermiques :

L'apport localisé et, souvent, brutal de chaleur qui est mis en œuvre pour réaliser une soudure crée un champ thermique dont on peut apprécier simplement les effets en enregistrant les évolutions de la température en fonction du temps, enregistre à partir de chacun d'eux la courbe Température = f (temps), c'est-à-dire la courbe que l'on appelle le cycle thermique de soudage » qui correspond au volume de métal voisin de la soudure chaude.

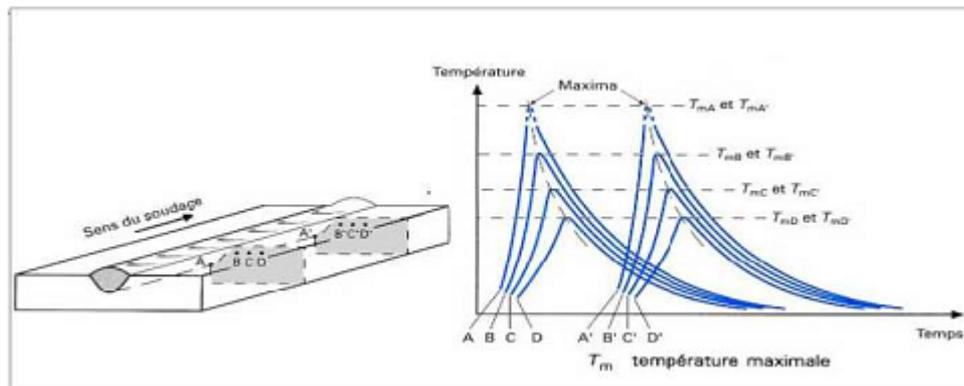


Figure II.1 schéma des enregistrements des cycles thermiques de soudage [22].

4.2. Aspect thermique lié au soudage :

Si l'on considère une vitesse de déplacement constante, on peut chercher à déterminer les caractéristiques thermiques d'un régime quasi stationnaire, ou la distribution de température autour de la source adopte une forme stable en fonction du temps.

Une résolution de l'équation de la chaleur simplifiée a été proposée par Rosenthal dès 1935 [23], prolongée par Rykline [24], Clyde et Adams [25]. Les principaux points en sont les suivants :

Si l'on imagine une source de chaleur ponctuelle q se déplaçant à une vitesse constante le long d'un axe x , l'équation différentielle de la chaleur s'écrit, dans un système de coordonnées (x, y, z) .

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

Avec :

θ : Température

t : temps

α : diffusivité thermique (m^2s^{-1}) du matériau = $\lambda/\rho C$,

Avec :

λ : conductivité thermique

ρC : capacité calorifique volumique ($\text{J m}^{-3}\text{K}^{-1}$). On peut définir un système de coordonnées mobiles lié à la source en posant :

$\xi = x - vt$. En régime stationnaire, $\left(\frac{\partial\theta}{\partial t} = 0\right)$ l'équation devient alors :

$$\alpha \left(\frac{\partial^2\theta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2\theta}{\partial y^2} + \frac{\partial^2\theta}{\partial z^2} \right) = -v \left(\frac{\partial\theta}{\partial \xi} \right) \quad \text{II.2}$$

L'équation peut être résolue en considérant deux situations distinctes.

Dans le cas du soudage de produit (épais) l'écoulement de chaleur se produit essentiellement de la température en fonction du temps et de la distance s'écrit :

$$\theta = \theta_0 + \frac{q/v}{2\pi\lambda t} e^{-\frac{r^2}{4\alpha t}} \quad \text{II.3}$$

Avec :

r : Distance du point considéré par rapport à la source de chaleur $r = \sqrt{(\xi^2 + y^2 + z^2)}$

q : Apport calorifique (J)

v : vitesse de déplacement de la source (m/s).

Le terme q/v désigne l'énergie linéaire ou la quantité de chaleur introduite par unité de longueur du joint soudé.

θ_0 : Température initiale ($^{\circ}\text{C}$).

Dans le cas du soudage de produits minces, l'écoulement de la chaleur est négligeable dans le sens de l'épaisseur. Les isothermes sont donc perpendiculaires à la surface des pièces. Une solution simplifiée de l'équation (II.1) s'écrit :

$$\theta = \theta_0 + \frac{q/v}{d(4\pi\lambda\rho Ct)^{1/2}} e^{-\frac{r^2}{4\alpha t}} \quad \text{II.4}$$

Où :

d : désigne l'épaisseur des pièces soudées.

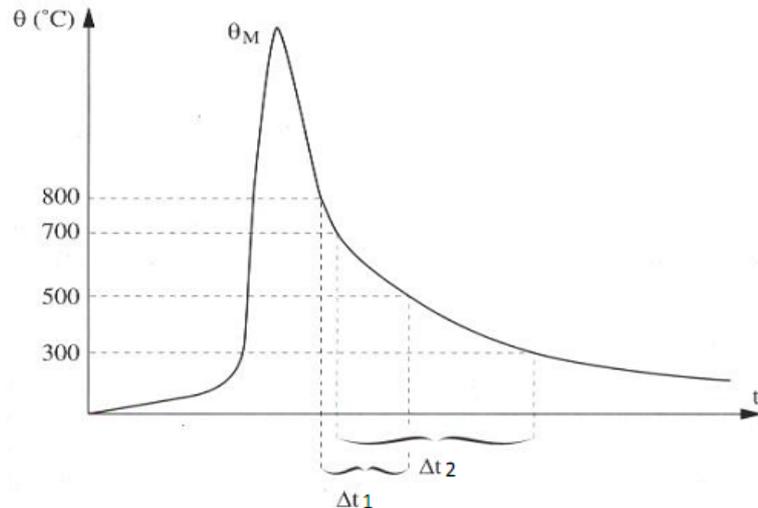


Figure II.2 : Schéma d'aspect de cycle thermique dans la zone affectée par la chaleur [20].

Nous allons maintenant revenir sur le cycle thermique $\theta(t)$ subi par tout point de la ZAT. Quel que soit le type de procédé de soudage (source fixe ou mobile), celui-ci comporte typiquement (**Figure II.2**) :

- Une phase d'échauffement très rapide, dont la vitesse moyenne est typiquement de quelque 10^2 °C/s (soudage à l'arc), allant jusqu'à 10^4 °C/s pour les procédés à haute densité d'énergie tels que le soudage laser [26].
- Un passage par une température maximale θ_M . En règle générale, le temps de maintien à cette température est très faible, d'autant plus réduit que θ_M est élevée ;
- Une phase de refroidissement plus au moins rapide.

L'expérience montre en fait que la structure métallurgique finale en tout point de la ZAT ne dépend pratiquement que la température maximale θ_M atteinte en ce point, et des paramètres de refroidissement.

La température maximale est atteinte à un temps t_M tel que :

$$\left(\frac{\partial \theta}{\partial t}\right)_{t_M} = 0$$

De plus, afin de d'éviter la singularité $\theta_M \rightarrow \infty$ Lorsque $r \rightarrow 0$

On impose la condition limite : $\theta_M = \theta_f$ température de fusion, lorsque $r = R$,

R : rayon du dépôt de métal fondu.

Après résolution, on aboutit alors aux expressions suivantes :

- Température maximale atteinte dans le cas du soudage de tôles épaisses (écoulement bidimensionnel de la chaleur dans une section perpendiculaire au sens de soudage) :

$$\frac{1}{\theta_M - \theta_0} = \frac{\pi e \rho C (r^2 - R^2)}{2q/v} + \frac{1}{\theta_f - \theta_0} \quad \text{II.5}$$

- Température maximale atteinte dans le cas du soudage de tôles minces (écoulement unidimensionnel de la chaleur dans une section perpendiculaire au sens de soudage) :

$$\frac{1}{\theta_M - \theta_0} = \frac{\sqrt{2\pi e} \rho C dr}{2q/v} + \frac{1}{\theta_f - \theta_0} \quad \text{II.6}$$

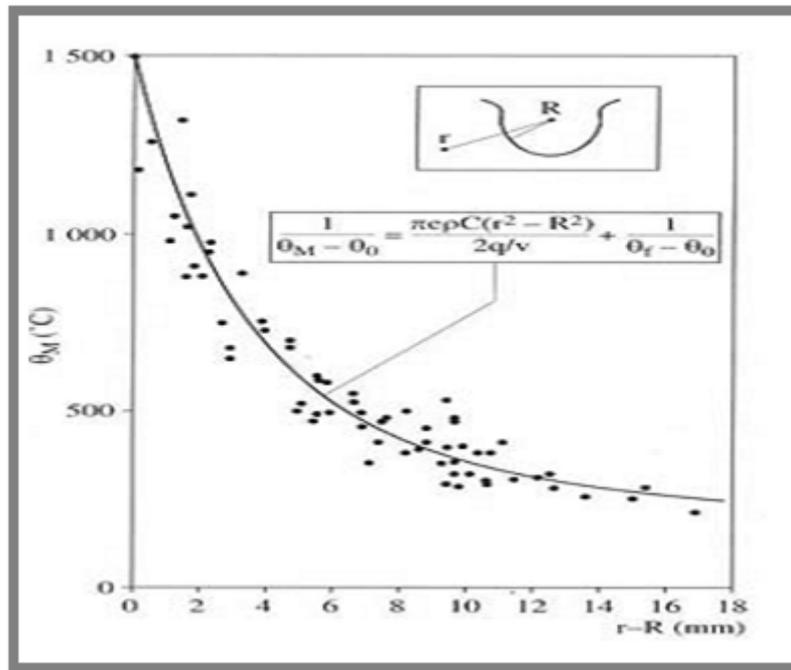


Figure II.3 : Evolution de la température maximale en fonction de la distance à la ligne de fusion comparaison des températures calcul [20].

Ainsi, la température maximale en ZAT varie environ de façon inversement proportionnelle à la distance r à la ligne de fusion (cas des produits minces) ou à son carré (cas des produits épais). Dans le cas des plaques, la température maximale atteinte ne dépend pas de l'épaisseur des produits. En dépit de leur simplicité, ces expressions rendent généralement assez bien compte de l'évolution de la température maximale en ZAT, comme en témoigne la (**Figure II.3**) qui présente une comparaison de relevés expérimentaux par thermocouples de cycles thermiques en ZAC, avec le résultat d'un calcul analytique (soudage de produits épais dans le cas présenté ici) [26].

4.3. Paramètre de refroidissement en ZAT :

Des relevés de cycles thermiques sur joints soudés [27] [28] montrent que le paramètre de refroidissement varie très peu au sein d'un même joint soudé.

L'évolution continue de la microstructure dépend donc uniquement de celle de la température maximale atteinte localement, tous les points subissant une loi de refroidissement pratiquement identique. Il reste maintenant à relier le paramètre de refroidissement aux conditions de soudage d'une manière plus précise : si l'on réalise des joints soudés à partir de

produit de différentes épaisseurs en faisant varier l'énergie linéaire de soudage. D'une manière pratique, il est important de bien définir l'énergie linéaire de soudage (terme q/v dans les expressions précédentes mise en jeu dans ce phénomène. celle-ci est en effet le produit :

- de l'énergie linéaire électrique E_e , définie à partir des paramètres de soudage : Par exemple, en soudage à l'arc, effectué avec une tension U et une intensité I , On écrira:

$$E_e = U.I/v \quad \text{II.7}$$

E : Étant fréquemment exprimée en KJ/cm ;

- d'un coefficient de rendement thermique η_p , propre au procédé de soudage utilisé, qui caractérise le rapport entre l'énergie effectivement transférée à la pièce et l'énergie électrique Dans le procédé de Soudage (TIG) le rendement thermique varie de e 0,2 à 0,8 dans le MIG (0,7 de soudage à 0,8).

L'énergie linéaire de soudage est également le produit d'un coefficient η_G lié à la géométrie

Du dépôt et de l'assemblage. Par définition, un dépôt sur plat (diffusion de la chaleur dans un angle de 180°) sera tel que : $\eta_G = 1$ pour un assemblage en T.

Cette approche peut être à réalisée à des cas plus complexes (préparation de chanfreins en X, en V...)

L'énergie linéaire de soudage (effective) s'écrit donc :

$$E = \eta_p \times \eta_G \times \frac{UI}{v} \quad \text{II.8}$$

Cette valeur, ainsi que l'épaisseur des produits soudés, permet de définir le régime thermique en soudage : dans une remarquable étude basée sur une approche théorique et expérimentale, G. Bernard a pu préciser le domaine des produits (épais) et (minces) vis-à-vis de l'écoulement de la chaleur en soudage [21].

5. Caractéristique de soudure :

Le soudage est le procédé qui permet de reconstituer la continuité métallique entre les surfaces des éléments à assembler. Pour activer les surface, la fusion est une méthode très efficace qui permet également le nettoyage des surface afin d'assurer l'installation de la liaison métallique. On obtient ainsi, après solidification, un joint homogène de même composition que le métal de base, ou un joint homogène dans le cas de métaux différents. Quel que soit le procédé de soudage par fusion, la structure d'une soudure type d'un alliage est composée de 4 zones principales (**Figure II.4**) [29].

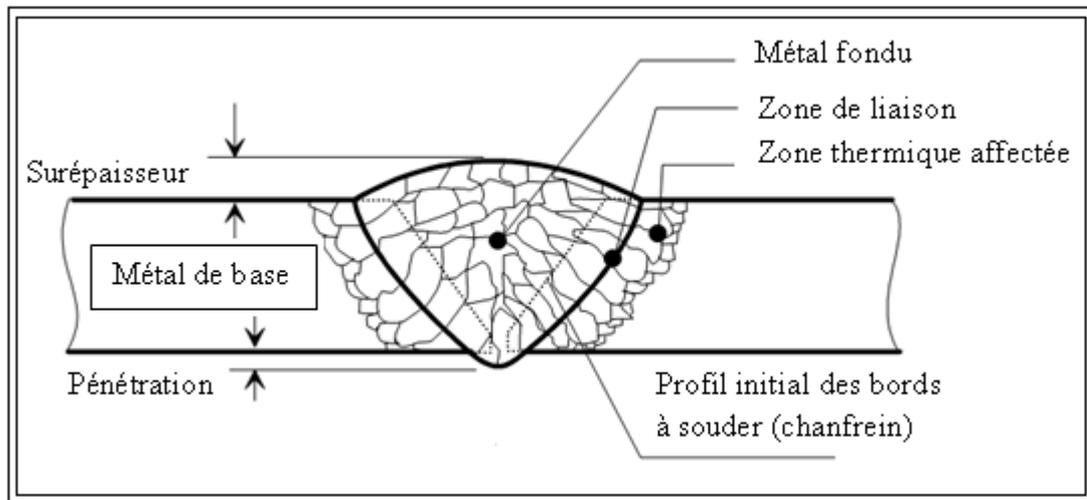


Figure II.4 : Les différentes zones de soudure

5.1 Zone fondue

C'est la région où l'état liquide a régné pendant l'exécution de la soudure. Elle a été obtenue par la fusion du métal de base, avec la précipitation plus ou moins importante d'un métal d'apport. Le métal qui constitue la soudure est appelé métal fondu. Le métal apporté à l'état liquide, c'est-à-dire avant dilution, est appelé métal déposé.

5.2 Zone de liaison

Cette zone correspond à la limite jusqu'à laquelle le métal de base a été porté à la fusion. Elle délimite ainsi la zone fondue et elle est mise en évidence par la différence de structure que l'on constate de part et d'autre.

5.3 Zone affectée thermiquement

Le cycle thermique de soudage provoque au sein de cette zone, à partir de l'état initial, une ou plusieurs transformations à l'état solide intervenant à l'échauffement. Chaque transformation étant caractérisée par une température minimale, la limite extérieure de la zone affectée correspondante coïncide avec l'isotherme caractéristique de cette température.

5.4 Zone de métal de base

Le métal de base est la partie du matériau qui ne subit pas de modifications microstructurales. Bien que métallurgiquement inchangé, en revanche[29].

6. Procédés de soudage :

La classification des procédés de soudage se fait en considérant certaines caractéristiques telles que :

- Le type d'énergie mise œuvre.
- Les paramètres physiques (température, pression, milieu extérieur).
- Le mode d'élaboration de la continuité de la matière (solidification depuis le liquide ou diffusion depuis le solide).
- La morphologie de la liaison qu'ils permettent de réaliser.

D'une manière très globale on classe les procédés de soudage sous deux importantes catégories :

6.1. 1^{ère} catégorie : soudage par pression :

Le soudage par pression consiste à amener le métal à l'état plastique par chauffage et de les réunir par pression ou par chocs sans avoir recours au métal d'apport. L'énergie dans ce type de procédé est mécanique. Dans ce cas la qualité des soudures dépend de la température à laquelle le métal est porté, ainsi que la force extérieure.

6.2. 2^{ème} catégorie : Soudage par fusion :

Dans cette classe l'assemblage se fait par la fusion locale du métal. Cette fusion est assurée par les différents types d'énergie électriques ou chimiques...

Les principaux procédés contenus dans cette catégorie sont :

- Soudage à l'arc électrique.
- Soudage à l'arc sous gaz de protection.
- Soudage par jet de plasma.
- Soudage sous flux.
- Soudage par résistance [30].

Dans le cadre de ce travail nous nous intéresserons du procédé Soudage à l'arc sous gaz de protection (procédé TIG)

6.2.1 Soudage à l'arc sous gaz de protection procédé TIG :

Premier atout d'importance dans un contexte industriel qui réclame un degré de qualité de plus en plus élevé, le TIG produit des assemblages d'un aspect irréprochable, qui, dans bien des cas, ne nécessitent aucune reprise ultérieure. De plus, autre aspect non négligeable, ce procédé s'applique à des matériaux aussi divers que les aciers au carbone, inoxydables, alliages de nickel, titane, zirconium, les alliages d'aluminium et de cuivre [31].

6.2.1.1.Principe et mise en œuvre du procédé :

Par définition, le terme (TIG) est l'abréviation de (Tungsten Inert Gas) et sert à désigner le procédé de soudage en atmosphère inerte avec électrode de tungstène. Aussi dans les pays anglo-saxons, on le désigne également par (G.T.A.W) gas tungsten arc welding).

L'appareillage comporte une source de courant alternatif ou continu, un dispositif d'amorçage, une bouteille de gaz avec détendeur et débitmètre, une torche spécifique du procédé et divers accessoires (figure II.5. (a)) [32].

À l'aide d'un courant électrique approprié dont la nature varie avec celle du métal de base (par exemple : courant continu pour les aciers inoxydables), on fait jaillir dans une veine de gaz inerte (argon ou mélange gazeux) un arc électrique entre une électrode de tungstène (infusible) et la pièce à souder. La chaleur dégagée par cet arc fait fondre localement la pièce ainsi que le métal d'apport (éventuel) formant ainsi le joint soudé après refroidissement (figure II .5. (b)).

Ce gaz inerte généralement à base d'argon ou d'hélium isole de l'air le métal en fusion, les zones chaudes environnantes et évite toute oxydation de l'électrode au tungstène. [31]

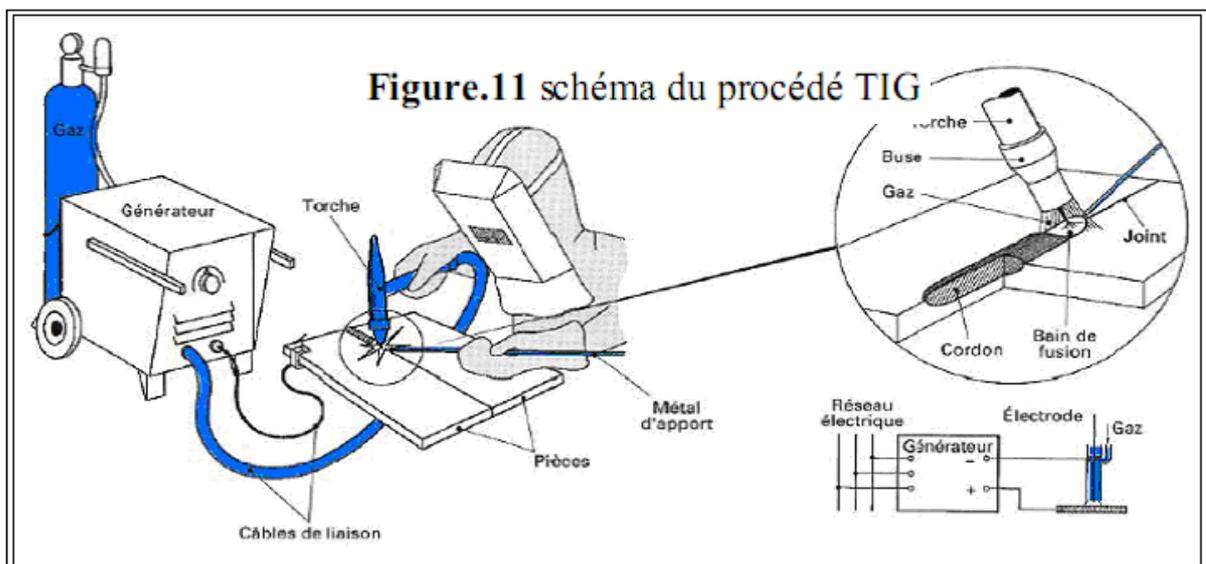


Figure II.5. (a): Schéma du procédé TIG [17].

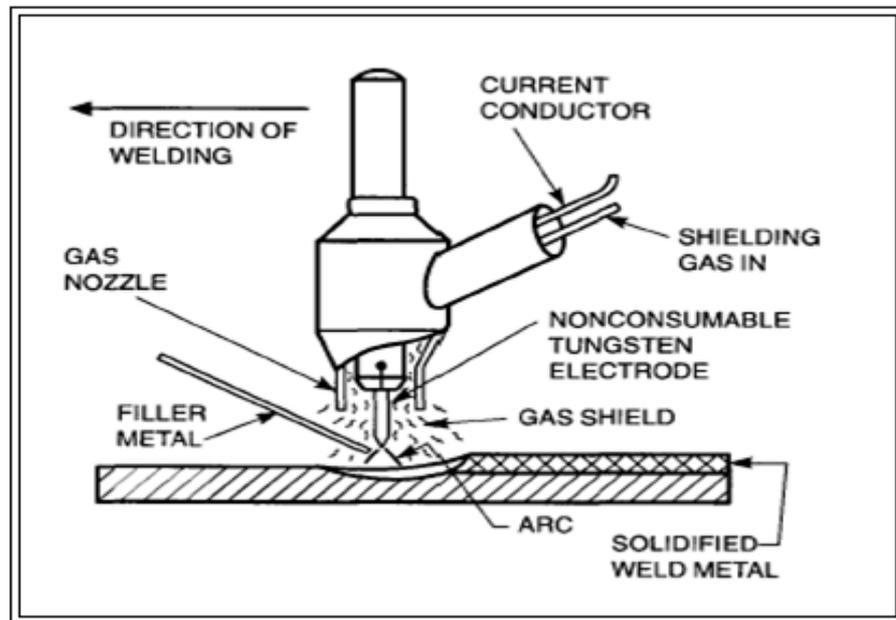


Figure II.5. (b): Principe du procédé de soudage TIG simple flux [33].

6.2.1.2 Effet des paramètres de soudage

Les paramètres de soudage contrôlent la forme, la dimension des zones affectées thermiquement au voisinage du cordon de soudure. L'énergie nécessaire à la fusion du métal, qui dépend des paramètres : puissance, type de courant, polarité, gaz de protection et, contrôle les paramètres de refroidissement de refroidissement. La vitesse de soudage régit directement sur la vitesse de croissance du front de solidification et donc également la forme du bain de fusion. La structure et le mode de croissance des grains dépendent de l'apport calorifique linéaire. La croissance des grains devient plus rapide et donne lieu à une structure grossière avec un apport calorifique croissant alors qu'une structure fine est obtenue avec une énergie linéaire modérée.

Ces paramètres affectent également les contraintes thermiques induites qui s'appliquent sur la soudure et qui entraînent la formation de contraintes résiduelles et des distorsions géométriques [34].

a) Nature du courant et effet de la polarité :

Les procédés de soudage à l'arc peuvent être utilisés en courant continu (DC), avec électrode négative (EN) ou positive (EP), ou en courant alternatif (AC). Ces différentes configurations présentées sur la (figure II.6) se traduisent par des différences de morphologies du bain de fusion.

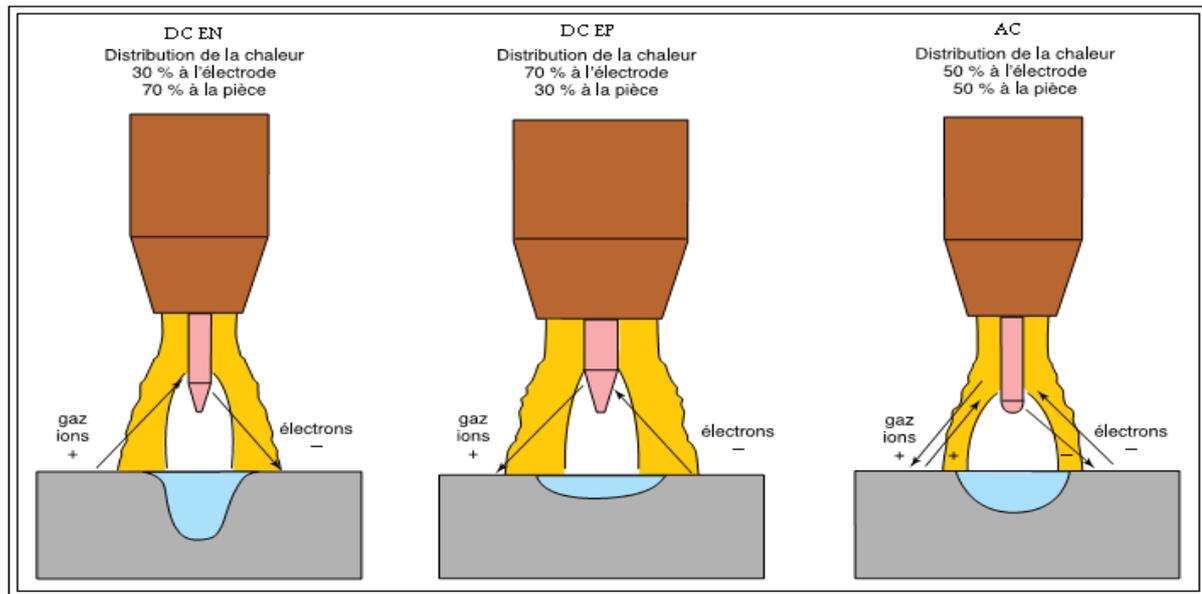


Figure II.6 : Influence du type de courant et sa polarité sur la pénétration [36].

a).1. Courant continue :

a).1.1 Courant continue polarité négative (DC EN) :

En courant continu, lorsque l'électrode est connectée à la borne négative (DC-), les électrons sont émis de l'électrode de tungstène vers la pièce de travail de polarité positive. Ces électrons hautement énergétiques rentrent en collision avec la pièce en abandonnant leur énergie cinétique et génèrent un échauffement considérable. Il en résulte une pénétration importante, un cordon de soudure étroit mais aussi un apport de chaleur significatif pouvant induire des contraintes résiduelles et des déformations non désirables.

a).1.2. Courant continue polarité positive (DC EP) :

Lorsque l'électrode est connectée à la borne positive (DC+) l'effet de l'apport de chaleur des électrons par leur énergie cinétique se concentre sur l'électrode plutôt que sur la pièce à souder. Ceci nécessite un refroidissement plus important des électrodes et cela engendre un cordon moins pénétrant, plus large, et un faible échauffement de la pièce de travail. De plus les ions positifs qui rentrent en collision avec la pièce de travail en provenance de l'électrode positive ont un effet nettoyant sur la surface oxydée. Ce mode de soudage est préconisé pour de faibles épaisseurs des métaux s'oxydant rapidement comme l'aluminium et le magnésium. Cependant, ce mode présente un inconvénient qui est le risque de fusion de l'électrode de tungstène ceci pouvant produire un défaut d'inclusion de tungstène dans le cordon de soudure.

a).2. Courant Alternatif (CA) :

Le soudage en courant alternatif réunit à la fois les deux caractéristiques du courant continu. Pendant l'alternance positive, il y a un fort effet de nettoyage du bain de fusion et, pendant l'alternance négative, la chaleur est plus concentrée dans le bain de fusion, ce qui a pour effet d'augmenter la pénétration.

Lorsque l'on soude au courant alternatif (courant sinusoïdal), Il est recommandé d'employer la haute fréquence (HF). Cette HF produit des courants dits à haute fréquence de faible intensité superposés au courant de soudage. En fait ce sont des impulsions qui ont pour effet de faciliter l'amorçage de l'arc, de le stabiliser et de remédier aux interruptions qui peuvent se produire chaque fois que le courant alternatif passe par zéro [35].

a).3 Soudage TIG Pulsé :

Tout comme pour le soudage avec fil électrode fusible, les technologies nouvelles des sources de courant ont permis une meilleure maîtrise du procédé par l'utilisation du soudage par impulsion parfois appelé également « pulsage thermique ». mais le phénomène physique qui intervient dans ce cas est très différent de celui qui est mis en œuvre dans le cas du soudage avec fil électrode fusible [37].

a).3.1. Définition du Procédé :

Le soudage TIG par impulsion consiste à faire varier périodiquement l'intensité du courant de soudage d'une valeur de base I_b à une valeur de pointe I_p (figure II.7). Il en résulte une valeur moyenne du courant de soudage $I_m = \frac{1}{T} \int_0^T i dt$ qui, dans le cas d'ondes rectangulaires (figure II.7) est égale :

$$I = \frac{I_p \cdot t_p + I_b \cdot t_b}{T} \quad \text{II.9}$$

- Le courant de pointe I_p
- La durée de passage de ce courant t_p
- Le courant de base I_b
- La durée de passage de ce courant t_b
- La valeur moyenne du courant I_e
- La durée du cycle T ou la fréquence des impulsions

Cette modulation du courant permet une régulation du cycle thermique en particulier, il est possible de procéder à la fusion de petite partie seulement du métal de base pendant les temps de passage du courant de pointe I_p , avec solidification au moins partielle pendant les temps de passage du courant de base I_b . Ainsi, la quantité de métal fondu est moins grande, le bain de fusion est moins important, ce qui facilite son maintien en particulier pour le soudage en position. Avec une onde de courant pulsé à basse fréquence, on obtient ainsi un cordon de soudure formé d'une suite de points de soudage se chevauchant. En outre, l'énergie thermique fournie est plus faible que dans le cas du soudage à courant constant I_p , ce qui est préférable du point de vue métallurgique.

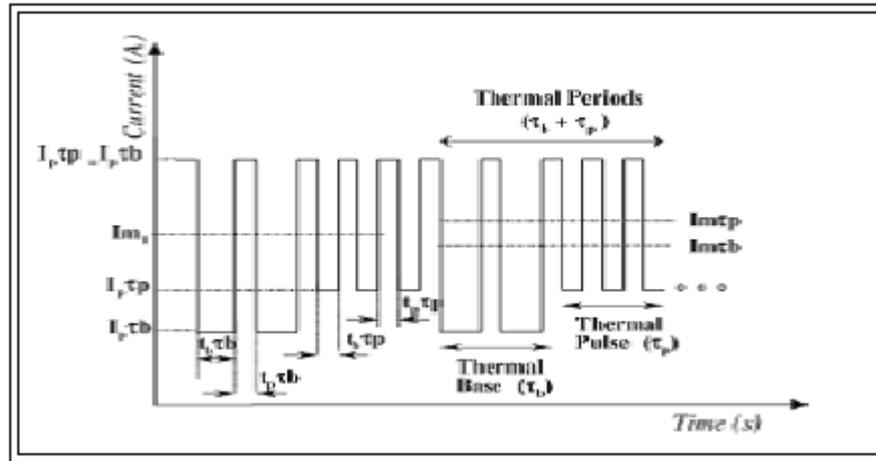


Figure II.7 : exemple de courant pulsé [37].

a).3.2. Durée et fréquence des impulsions :

Ces paramètres sont fonction de l'épaisseur de la tôle et des propriétés du matériau, de façon à toujours avoir un temps de passage du courant de base suffisant pour permettre une évacuation satisfaisante sur la vitesse de croissance des cristaux et sur le processus de solidification. Intermédiaire et on peut obtenir des grains ordonnés le long du cordon ou en son milieu.

Les fréquences couramment utilisées vont de 2 à 10 Hz mais sont pénibles pour l'opération en soudage manuel [37].

a).3.3. Vitesses de soudage :

Ce paramètre influence largement la géométrie du joint soudé, c'est-à-dire sa profondeur de pénétration et sa largeur. Si la vitesse de soudage est élevée et le courant efficace faible, la zone thermiquement affectée et la zone fondue restent faibles, ce qui évite la surchauffe du métal de base.

Toutefois, aux vitesses de soudage élevées, des caniveaux peuvent apparaître aux bords de la soudure ; ceux-ci sont dus aux effets de puissance de l'arc, effet qui dépend du courant de soudage [37].

a).3.4. Avantage des pulsations de courant en soudage e TIG :

On conçoit que la possibilité de moduler ainsi les énergies mise en œuvre et donc les apports thermiques à la pièce à souder présente des avantages incontestables :

- La pénétration souhaitée est obtenue par des surintensités passagères et non plus par le passage permanent du courant, ce qui conduit à un volume de bain de fusion plus réduit et donc un bain plus étroit ;

- Limitation de l'apport calorifique, ce qui est bénéfique du point de vue métallurgique
- La limitation du volume de métal fondu a comme conséquence une réduction des déformations dues au retrait ;
- -L'électrode de tungstène peut généralement supporter pendant des intervalles de temps réduits une densité de courant plus élevée, ce qui conduit à une pénétration plus forte et donc à une augmentation des épaisseurs maximales soudables ;
- On sait que lorsque l'on soude des métaux bons conducteurs de la chaleur, l'intensité du courant de soudage doit se trouver entre une valeur suffisamment élevée pour que la température de fusion puisse être rapidement atteinte et suffisamment basse pour ne pas risquer d'effondrement en fin de soudage lorsque toute la pièce est portée à haute température. Dans le cas du courant pulsé, il y a à chaque pointe de courant un apport de chaleur à une vitesse supérieure à celle de dispersion dans la masse de la pièce, ce qui permet la fusion ; ces bains de fusion étant formés successivement, l'échauffement général de la pièce est limité, ce qui améliore les conditions de soudabilité opératoire à la fin du soudage ;
- Le procédé TIG demande que l'accostage des deux pièces à souder soit très précis ; un écartement de quelques dixièmes de millimètres conduit souvent à la formation de deux lignes de fusion au lieu d'un bain unique de soudage. La pulsation du courant conduit, par effet magnétique, à un mouvement incessant de flux et de reflux du métal liquide, ce qui favorise le maintien d'un pont liquide entre les pièces à assembler. Par suite, il y a une meilleure maîtrise de la zone de fusion et un comportement amélioré sur joints mal préparés.

Ces avantages des pulsations de courant conduisent aux conditions suivantes :

- a. Moindre absorption de gaz par la zone de fusion ;
- b. Refroidissement plus rapide ;
- c. Réduction de la zone affectée thermiquement ;
- d. Réduction de la fissuration à chaud ;
- e. Structure à grains fins, résilience et plasticités améliorées ;
- f. Plus grande souplesse opératoire.

D'autre part, on constate qu'il y a un auto-nettoyage de l'électrode de tungstène, de sorte que l'arc est maintenu dans l'axe de l'électrode alors que dans le soudage à courant constant il y a souvent formation d'impuretés ponctuelles d'aspects très brillant, plus émissives que le reste de l'électrode et qui dévient l'arc du côté où elles se forment [37].

b) Les gaz de protection en TIG :

Les gaz inertes utilisés sont soit de l'argon, soit de l'hélium soit des mélanges argon-hélium. L'argon, de qualité commerciale « soudage », est le gaz le plus utilisé car il convient à presque tout les cas d'application. L'hélium, plus coûteux que l'argon, est utilisé lorsque l'on peut tirer profit du fait qu'il permet de plus grandes vitesses de soudage et une pénétration plus profonde. Quant aux mélanges (généralement à 25%, 50% ou 70% hélium dans l'argon), ils sont destinés à réaliser un compromis performance-prix [37].

c) Les défauts de soudage :

Les principaux défauts intervenant au cours d'un procédé de soudage TIG défauts de forme ou métallurgiques.

c). 1 Défauts de forme :

Caniveaux : on attribue leur formation au rétreint (compression exercée lors du refroidissement). Ce phénomène tend à déplacer la matière liquide vers le haut, créant ainsi cet aspect bombé en centre de cordon. C'est un défaut courant en soudage aluminium, du fait des propriétés thermo-physiques du matériau : faible viscosité, faible tension de surface, haute température de vaporisation et haute conductivité [33].

Effondrement : un effondrement apparaît en soudage par transparence lorsque le jeu entre les tôles est trop important (typiquement supérieur à 0,2 mm pour des tôles de 1 mm d'épaisseur). Au cours du procédé, le bain liquide s'affaissera sous l'action du champ gravitationnel et viendra combler l'interface entre les tôles.

Découpe de tôle supérieure : c'est le cas extrême d'un effondrement, lorsque le jeu devient trop élevé : le bain fondu supérieur tout entier s'écoule dans l'interface.

Soudure non débouchante : lorsque l'épaisseur totale des deux tôles n'est pas fondue, on parle de soudure non débouchante. Cela peut provenir de causes diverses, comme un mauvais positionnement du point focal par rapport au joint, une chute de l'intensité laser incidente, voire la fluctuation chaotique de la profondeur du capillaire.

Les surépaisseurs excessives : elles sont la conséquence directe des mouvements ascendants du bain arrière. Particulièrement à haute vitesse, ou en soudage de forte épaisseur, la vague apparaissant à l'arrière du capillaire donne une forme bombée au bain fondu. La solidification conserve la trace de ces mouvements hydrodynamiques.

On peut recenser encore trois types de défauts: les projections de soudure (ou grabons) et les porosités internes et fissurations. Ces deux derniers défauts vont être analysés plus en détail, car ils proviennent d'instabilités du procédé. Ils sont directement ciblés par la présente étude, et doivent être supprimés grâce à une mise en forme adéquate du faisceau.

c). 2 Les défauts métallurgiques

La fissuration à chaud (ou crique à chaud) : Ce défaut est potentiellement le plus grave car il peut entraîner la séparation totale du cordon juste après soudage. Ces fissures sont des défauts qui apparaissent à la fin de la solidification du cordon. On peut observer soit des microfissures qui seront nocives pour les propriétés mécaniques du cordon soit des macros fissures lorsque le cordon est entièrement fissuré et que les deux pièces ne sont donc pas assemblées [35].

Partie n° 2

ETUDE EXPERIMENTALE

Chapitre III

DISPOSITIF EXPERIMENTAL

Eléments du dispositif expérimental

1) Matériaux

Pour l'étude expérimentale on a utilisé l'alliage d'aluminium de nuance 2024 T3 (norme américaine), un alliage de corroyage, qui a subi un traitement de mise en solution à une température de $495 \pm 5^\circ\text{C}$, trempé à l'eau, écroui et muri (vieillessement naturel), avec une composition chimique donnée par le tableau III.1.

Tableau III.1 : Composition chimique de l'alliage d'aluminium 2024 T3 [35].

Al	Cu	Mg	Mn	Fe	Si	Zn	Ti	Cr	Autres
90.7 -94.7	3.8-4.9	1.2-1.8	0.3-0.9	<0.5	<0.5	<0.25	<0.15	<0.1	<0.15

2) Equipements du poste de soudage TIG :

Les procédures expérimentales sont entièrement conçus, réalisés et mise au point à l'atelier de soudage du CSC dans le cadre des études de soudage TIG. Une vue d'ensemble de cette équipement est présentée dans la **figure (III.1)** :

Le poste de soudage est de type : FIM467-A Lincoln SQUARE WAVE TIG 355 CR99-15.



Figure (III.1) : Poste de soudage TIG

Type: FIM467-A Lincoln SQUARE WAVE TIG 355 CR99-15.

Ce type de poste TIG possède toutes les caractéristiques sus citées dont principalement la possibilité d'utiliser un courant continu avec un amorçage de l'arc sans contact à haute fréquence (HF) pour le soudage des aciers inox, un courant alternatif avec une HF en continue avec la fonction SQUARE WAVES (onde carrée) qui permet de favoriser l'une ou l'autre des actions de pénétration ou de nettoyage de l'oxyde d'alumine (dans le cas du soudage des alliages d'aluminium) et un courant pulsé avec différentes fréquences. Autres caractéristiques de ce poste, l'acquisition des paramètres de soudage (Intensité, Tension) grâce à un afficheur digital et le suivi des différentes étapes du cycle de soudage.

3) Enrobage :

Afin d'éviter toute transformation structurale il est recommandé d'utiliser des résines d'enrobage à froid, pour cela Le matériel utilisé est présenté dans la figure ci-dessous.

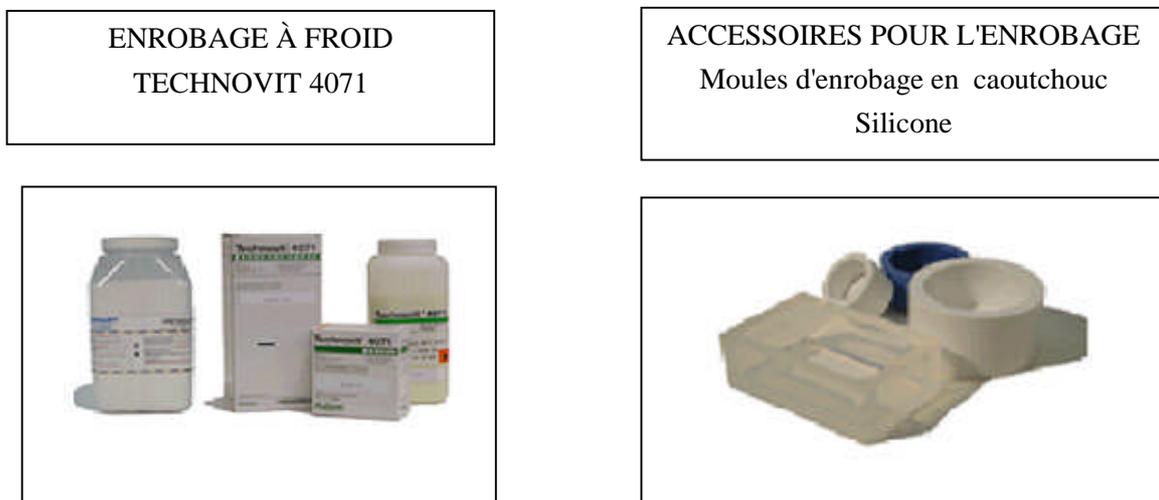


Figure III.2 : Les produits d'enrobage et ses moule

4) Polisseuse :

Le polissage est réalisé au niveau du département de métallurgie à l'Ecole Nationale Polytechnique (Figure (III.3))



Figure (III.3) : Polisseuse MECAPOL P200.

4.1.) Polissage :

En utilise les papiers abrasifs de 180, 400, 600,1000. 1200 et pour l'obtention de l'état de surface final en utilise la pate diamantée.



Figure III.4 : Papier abrasif

5) Microscope optique:

Le microscope optique utilisé est de type : Zeiss doté d'une caméra CCD avec utilisation d'un logiciel ATLAS de traitement d'images



Figure (III.5) : Microscope optique utilisé est de type **Zeiss**

6) Microduromètre :

La dureté est une l'une des propriétés mécaniques qui caractérisent les matériaux. Elle exprime la résistance d'un matériau soumis à une déformation plastique localisée.

L'essai de micro-dureté est réalisé au niveau du laboratoire de métallurgie du centre de recherche de soudage et contrôle

Le principe est de mesurer les diagonales des empreintes laissées par un cône, et avec une charge de 500g, ce choix nous a permis de comparer avec d'autres graphes de l'étude bibliographique.

Un choix judicieux de la charge et du temps d'appui permet de mesurer la dureté VICKERS par la mesure de la moyenne des diagonales, à l'aide de la formule suivante :

$$HV = 1,8544 \cdot 10^3 \cdot \frac{F}{d^2} \quad (\text{III.1})$$

Tel que :

d (μm) : La moyenne des diagonales

F : La force appliquée en Kilo-Newton.



Figure (III.6) : Microduromètre

Chapitre IV

RESULTATS ET DISCUSSIONS

Chapitre IV
Partie -A-

MODES OPERATOIRES

Introduction

Le problème auquel nous sommes confrontés au départ était de comprendre la compréhension d'un courant pulsé et l'influence des paramètres du courant pulsé sur le matériau à savoir :

- L'influence de la fréquence
- L'influence du temps chaud et froid du cycle du courant pulsé.

1. Le cycle de soudage en courant continu pulsé

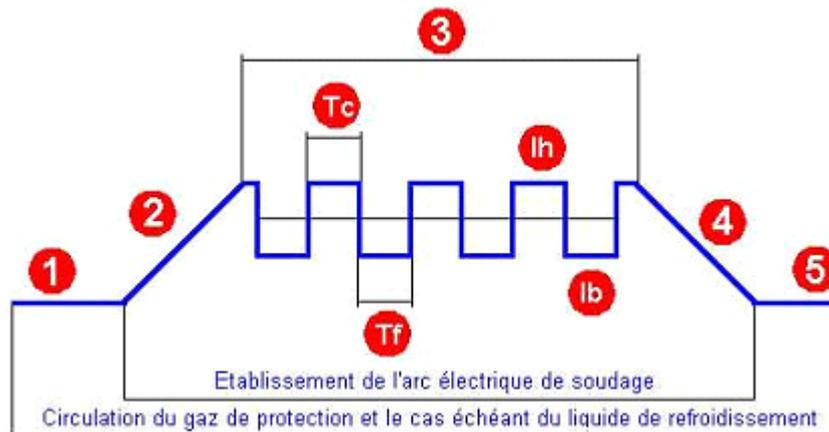


Figure (IV.A.1) : Cycle de soudage en courant pulsé.

Le cycle de soudage en courant continu pulsé se décompose en 5 étapes principales comme montre la figure (VI.A.1).

2. Les étapes de cycle de soudage de courant continu pulsé

2.1 Le pré-gaz :

Aussitôt que le soudeur actionne la gâchette de la torche de soudage TIG, elle se déclenche la temporisation du cycle de pré gaz qui permet la chasse de l'air ambiant présent à l'intérieur de la buse, l'inertage de l'électrode infusible et de la zone à souder avant l'allumage de l'arc électrique.

2.2 L'amorçage et la montée en intensité de l'arc

Après la fin du temps de pré gaz, l'arc s'amorce sur la pièce soit par l'intermédiaire d'un courant à haute fréquence, soit par start touch ou lift start. La montée progressive ou pente montante de l'intensité de soudage programmée est disponible à l'aide d'une temporisation. Elle autorise un préchauffage de la zone avant formation du bain.

2.3 Intensité de soudage programmée : Cette étape est caractérisée par

- Intensité haute (I_h)
- Intensité basse (I_b)

Ces intensités (I_h) et (I_b) sont sélectionnées selon l'épaisseur du matériau, la nuance du matériau, la position de soudage et le type de préparation de joint.

- Temps chaud (t_c) : Cette valeur correspond au temps d'application de l'intensité haute (I_h) sélectionnée lors du soudage
- Temps froid (t_f) : Cette valeur correspond au temps d'application de l'intensité basse (I_b) sélectionnée lors du soudage.

2.4 Evanouissement de l'arc électrique de soudage

Aussitôt que le soudeur actionne la gâchette de la torche de soudage TIG, le cycle d'évanouissement de l'arc de soudage se déclenche. La descente progressive ou pente descendante de l'intensité de soudage programmée est disponible à l'aide d'une temporisation. Cette fonction permet de limiter ou d'éliminer le cratère de terminaison du cordon ou retassure de terminaison.

2.5 Le post gaz

La temporisation du cycle de post gaz permet l'inertage de l'électrode de tungstène et de la zone soudée après l'extinction de l'arc électrique pendant un temps de 3 à 30 secondes pour limiter l'oxydation par l'air ambiant.

3. Les paramètres de réglage de post de soudage de courant pulsé

Le courant pulsé est fonction de la fréquence, du courant haut et du courant bas et de la durée de passage du courant haut et bas (t_h , t_b).



Figure IV.A.2 : Le tableau de bord d'un générateur de soudage TIG / GTAW (Partie de TIG pulsé)

Comme on remarque dans la **figure IV.A.1**, trois paramètres de réglages de poste tel que :

- (1) : la commande de régulation la fréquence (nombre de pulsations par seconde)
- (2) : commande de la régulation de courant bas en pourcentage de courant haut
- (3) : la commande qui permet de régulariser le rapport du courant haut ou/ et bas pendant sa durée de passage sur la période (La durée de passage (t_h, t_b)).

Remarque : Ces chiffres (1, 2, 3) de commande sont utilisés pendant toutes les expériences.

4. Influence de la variation de la fréquence pour une intensité constante

Les conditions opératoires :

- On règle la commande (2) (**figure IV.A.2**) de courant bas en pourcentage de courant haut égal à **50%**.
- On règle la commande (3) (**figure IV.A.2**) du temps chaud et du temps froid à un pourcentage du cycle de pulsation du courant haut égal à **50%**. **C.à.d.** que la durée de chauffage au courant haut et celle du refroidissement au courant bas est la même.

Pour une intensité de courant initial $I_0 = 60(A)$ et pour des fréquences variables les résultats des courants haut et bas sont présentés sur le tableau (IV.A.1)

Tableau IV.A.1 : Variation de l'intensité en fonction de la fréquence pour $I_0 = 60 (A)$

N°	fréquence (Hz)	$I_{\text{haut}} (A)$	$I_{\text{bas}} (A)$	V (volt)	$T_P (s)$	d (mm)	$v (mm \times s^{-1})$
7	0.8	61	35	16	62	78	1.258
8	1	57	38	15	68	78	1.147
9	2	55	41	16	51	80	1.569
10	4	54	46	16	43	80	1.860
11	8	50	48	15	45	80	1.778

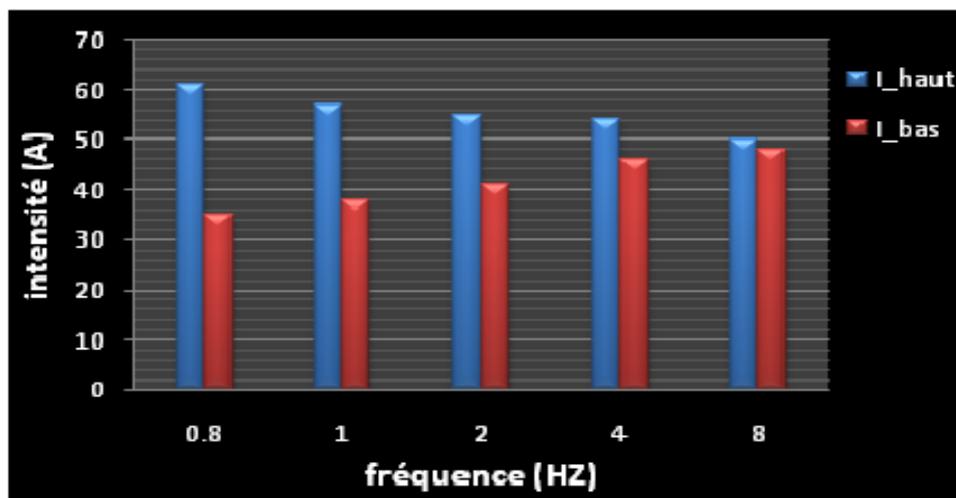


Figure IV.A.3 : Histogramme de la variation de l'intensité haut et bas en fonction de la fréquence pour $I_0 = 60A$.

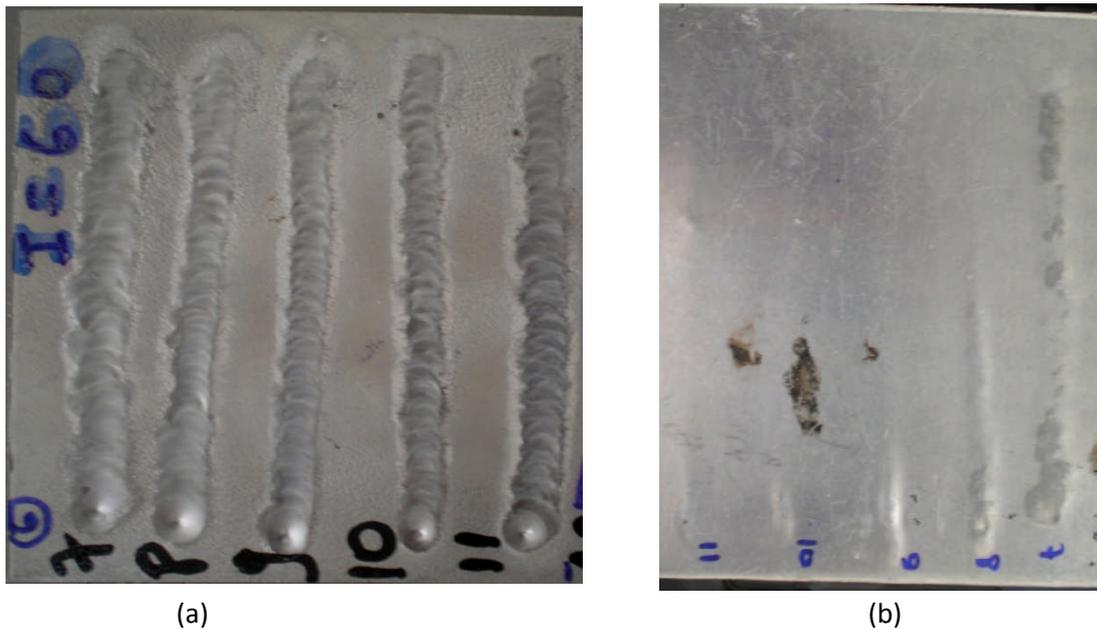


Figure (IV.A.4) : Cordon de soudure à une intensité fixe à $I_0 = 60A$.
(a) face endroit, (b) face envers.

L'histogramme Figure (IV.A.3) montre que pour des faibles fréquences, l'écart entre les intensités du courant haut et du courant bas est très important et inversement.

Quand à l'aspect visuel des cordons réalisés (Figure IV.A.4), nous constatons que plus la fréquence de pulsation augmente plus le cordon présente un bel aspect sur la face endroit et sur la face envers un manque de pénétration est apparent.

Pour une intensité de $I_0 = 75 (A)$, les résultats des paramètres de soudage sont présentés sur le tableau (IV.A.2).

Tableau IV.A.2 : Variation de l'intensité en fonction de la fréquence pour $I_0 = 75 (A)$

N°	fréquence (Hz)	$I_{\text{haut}} (A)$	$I_{\text{bas}} (A)$	V (volt)	$T_P (s)$	d (mm)	$v (mm \times s^{-1})$
1	1	74	45	19	45	81	1.800
2	2	70	51	20	33	81	2.454
3	4	66	57	21	40	84	2.100
4	6	64	59	20	35	84	2.400
5	8	62	60	20	36	84	2.333
6	10	62	62	20	33	88	2.667

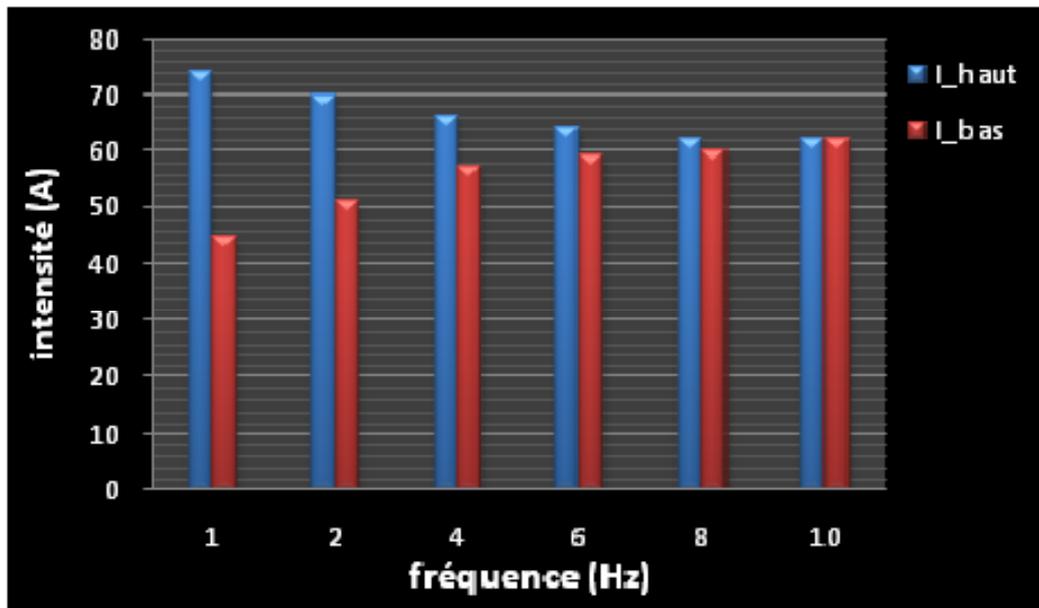
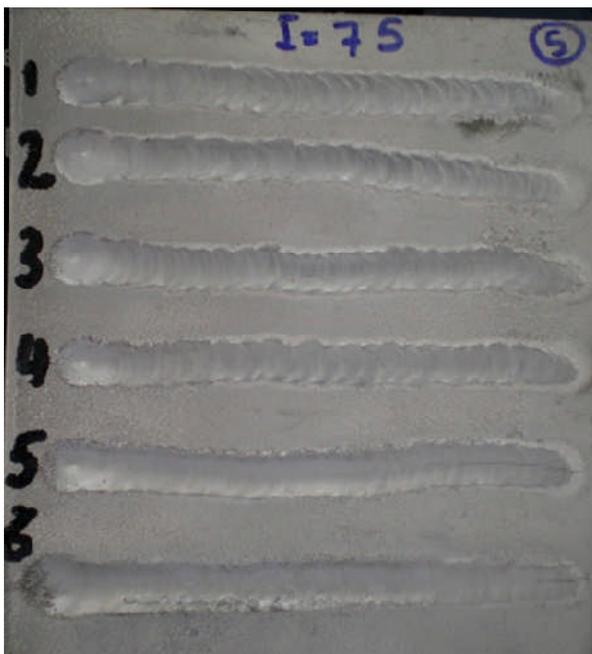
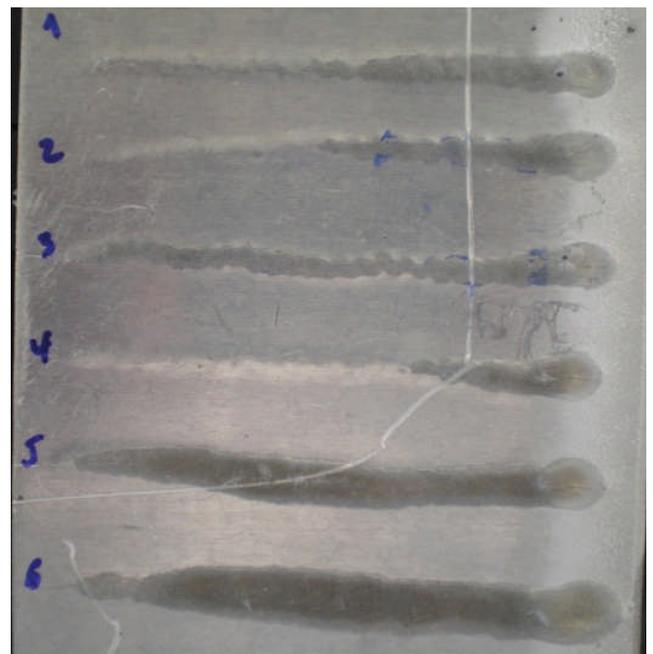


Figure IV.A.5 : Histogramme de la variation de l'intensité haute et basse en fonction de la fréquence pour $I_0 = 75A$.



(a')



(b')

Figure IV.A.6 : Cordon de soudure à une intensité fixe à $I_0 = 75A$.
(a') face endroit, (b') face envers.

L'histogramme (Figure IV.A.5) montre qu'en plus des constats faits précédemment, on remarque que pour une fréquence de 10Hz l'intensité du courant haut et du courant bas sont identiques.

L'aspect visuel des cordons réalisés présentent une meilleure mouillabilité de l'aluminium (**Figure IV.A.5 (a')**) en le comparant au résultat précédent. Ainsi l'augmentation de l'intensité initiale donne une augmentation des courants hauts et bas ce qui a engendré une pénétration partielle au début des cordons et qui augmente vers la fin des cordons (**Figure VI.A.5 (b')**) ceci est expliqué par la grande conductibilité thermique de l'aluminium.

Pour $I_0 = 100$ (A) les résultats des paramètres de soudage sont présentés sur le tableau (IV.A.3)

Tableau IV.A.3 : Variation de l'intensité en fonction de la fréquence.

N°	fréquence (Hz)	I_{haut} (A)	I_{bas} (A)	V (volt)	T_P (s)	d (mm)	v (mm \times s $^{-1}$)
14	0.8	99	61	24	18	82	4.555
12	1	99	64	21	27	82	3.037
13	2	91	71	21	20	80	4
15	4	91	76	21	23	80	3.478

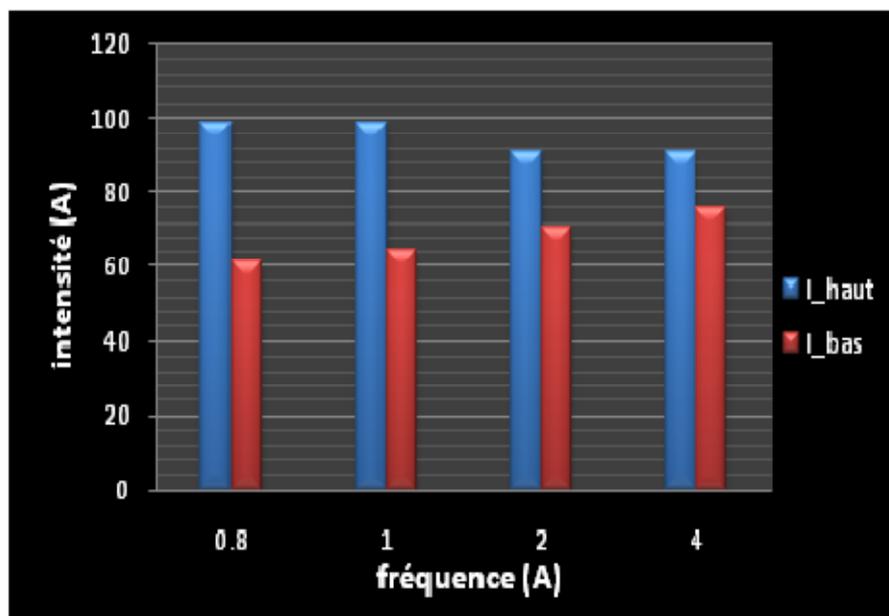


Figure IV.A.7 : Histogramme de la variation de l'intensité haute et basse en fonction de la fréquence pour $I_0 = 100$ (A).

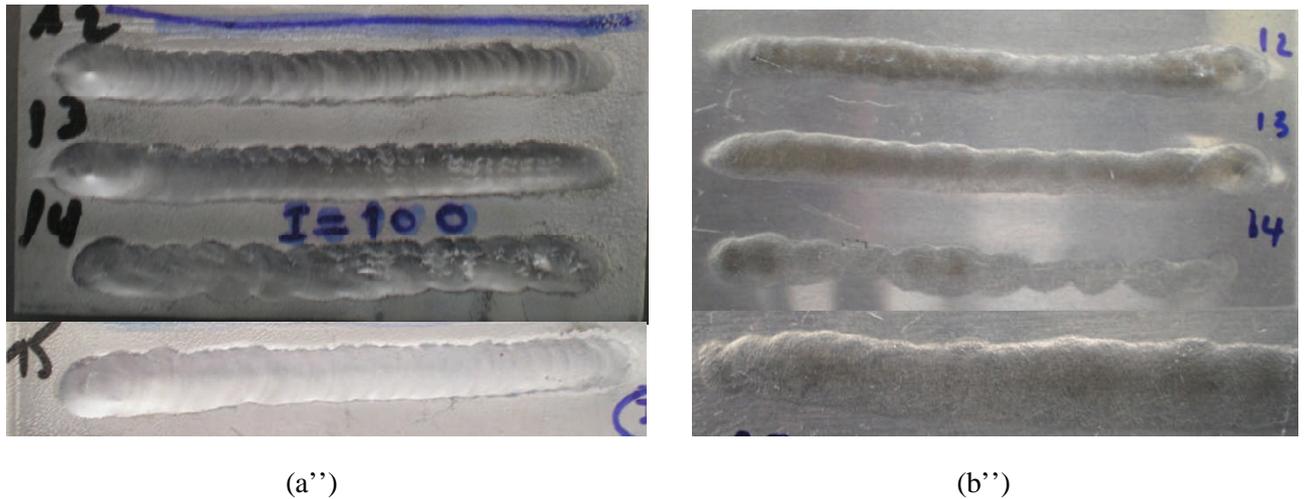


Figure IV.A.8 : Cordon de soudure à une intensité fixe à $I_0 = 100A$.

(a'') Face endroit, (b'') face envers.

Pour cette intensité initiale, et pour des fréquences variables nous constatons que pour des fréquences supérieures à 4 Hz (6 Hz testée) les intensités des courants haut et bas sont égales. En comparant cette donnée avec celle du courant précédent ($I_0 = 75A$), la fréquence qui a donné une intensité égale est de l'ordre de 10Hz.

Quand à l'aspect visuel, nous constatons que l'aspect visuel des soudures est nettement meilleur avec une pénétration homogène et régulière tout le long des cordons (Figure IV.A.8).

5. Conclusion:

De cette première partie qui montre l'effet de la fréquence pour plusieurs intensités, nous concluons :

- Pour des fréquences variables, plus l'intensité initiale est faible cas 60 A les intensités des courants hauts et bas sont faibles en les comparant aux courants supérieurs cas (75 et 100 A) où I_h et I_b augmentent respectivement.
- Pour les diverses fréquences, plus l'intensité augmente, plus le temps de soudage est faible par conséquent plus la vitesse augmente.
- La qualité des soudures augmente avec l'augmentation de l'intensité et de la fréquence.

6. Influence de la variation de l'intensité pour une fréquence constante :

A partir des résultats précédents tableau 1, 2, 3 pour une fréquence de 4Hz et pour des intensités variables les résultats sont présentés sur le tableau (IV.A.4).

- Les bons paramètres de soudage TIG pulsés sont ceux donnés par le tableau IV.A. 2 et 3 représenté en gras.

En prend la fréquence égale à 4 Hz.

Tableau (IV.A.4) : Variation de la fréquence en fonction de l'intensité

N°	Intensité (I_0) (A)	I_{haut} (A)	I_{bas} (A)	V (volt)	T_P (s)	d (mm)	v (mm $\times s^{-1}$)
10	60	54	46	16	43	80	1.860
3	75	66	57	21	40	84	2.100
15	100	91	76	21	23	80	3.478

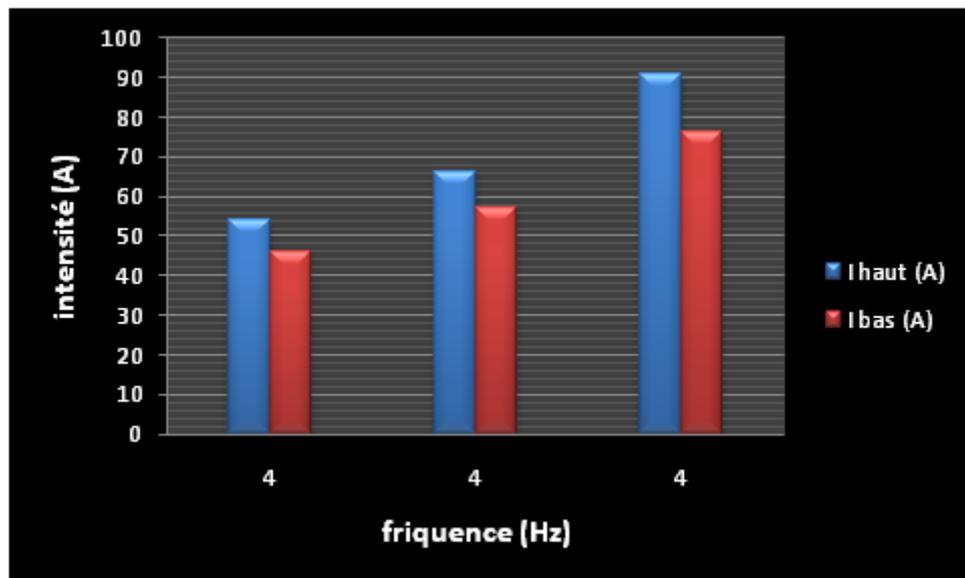


Figure IV.A.9 : Histogramme de la variation de l'intensité haute et basse en fonction de la fréquence.

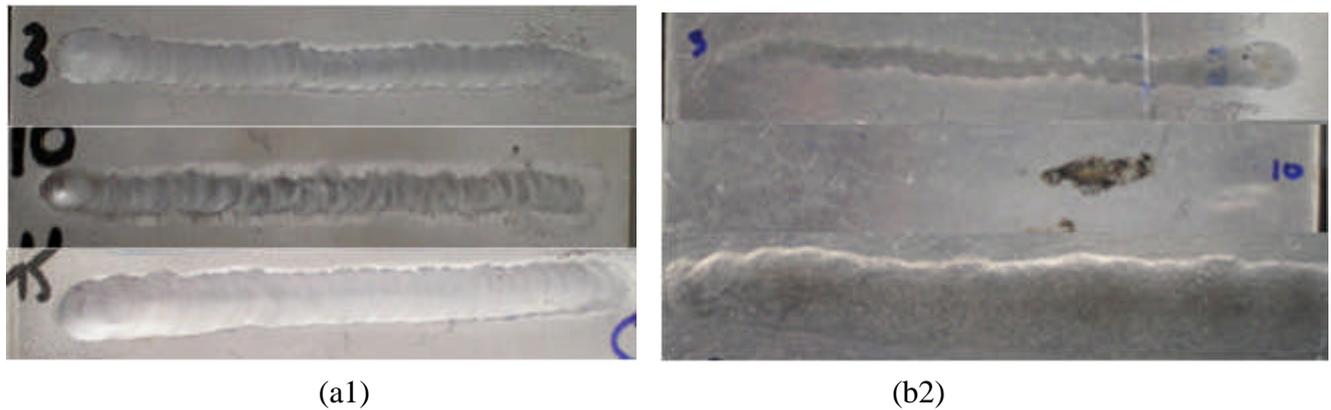


Figure IV.A.10 : Cordon de soudure à une fréquence fixe égale à 4Hz.
(a1) face endroit, (b2) face envers.

- plus l'intensité initiale est faible cas 60A les intensités des courants hauts et bas sont faibles en les comparant aux courants supérieurs cas (75 et 100A) où I_h et I_b augmentent respectivement.
- L'aspect du cordon de soudure pour une intensité initiale de 100A présente un meilleur aspect : les stries de solidification sont fines et très rapprochées ce qui donne un aspect de compacité dû à l'augmentation de la fréquence. Tout ceci peut être expliqué par le cycle du courant pulsé pour la fréquence de 4Hz. Il est important de rappeler la définition de la fréquence qui n'est autre que le nombre de pulsations par seconde. Ainsi, plus ce nombre augmente plus les écarts entre l'intensité du courant haut et du courant bas diminue et le temps de séjours en courant haut et bas est réduit ce qui permet de produire un effet de chauffage en continu du bain de fusion. Aussi, nous pensons que l'effet vibratoire des pulsations induit des mouvements du bain de fusion.

7. Influence du courant bas en fonction de la fréquence :

Dans cette expérience nous avons fixé l'intensité initiale à 100A en faisant varier le paramètre du courant bas en réglant la commande du courant bas à 20% et en gardant la commande du temps t_h et t_b à 50%

Ainsi, les résultats obtenus pour diverses fréquences sont présentés sur le tableau (IV.A.5)

Tableau IV.A.5 : Influence du courant bas en fonction de la fréquence

Fréquence (Hz)	I_{haut} (A)	I_{bas} (A)
0.4	102	27
0.6	101	27
0.8	100	31
1	94	34
2	90	48

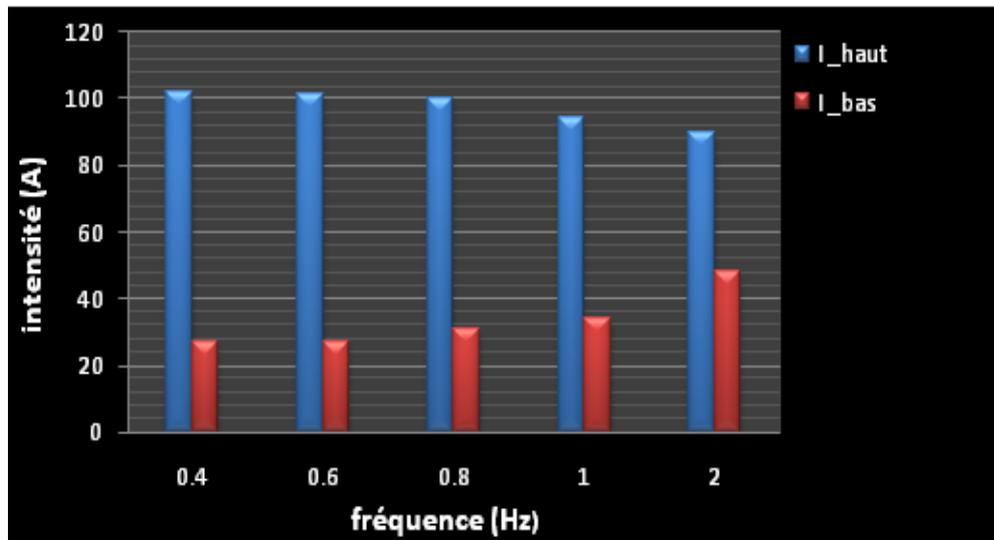


Figure IV.A.11 : Variation de l'intensité haute et basse en fonction de la fréquence.

Le tableau et l'histogramme figure (IV.A.11) montrent que la différence entre le courant I_h et I_b est presque de 50% pour une fréquence de 0.4hz alors que cette écart est très faible de l'ordre de 18% pour une fréquence de 2Hz.

Par contre ce qui a attirer notre attention c'est la durée de séjours en I_b qui est très important que le courant haut et il représente environ 80%. Ainsi le refroidissement est trop lent que le chauffage en I_h .

8. Influence de la forte intensité I_0 et des paramètres du courant pulsé en fonction de la fréquence :

En tenant compte des expériences précédentes nous avons opté au choix des fréquences de 1,2 et 4

Les résultats obtenus sont présentés sur les tableaux Tableau IV.A.6.

Tableau IV.A.6 : Influence de la forte intensité I_0 et des paramètres du courant pulsé en fonction de la fréquence.

fréquence	I_{haut} (A)	I_{bas} (A)	t (s)	d (mm)	v ($\frac{mm}{s}$)
1	114	37	18	60	3.333
2	96	44	20	57	2.85
4	58	58	22	60	2.727

Cas ou la pièce est froide.

4	72	71	18	60	3.333
---	----	----	----	----	-------

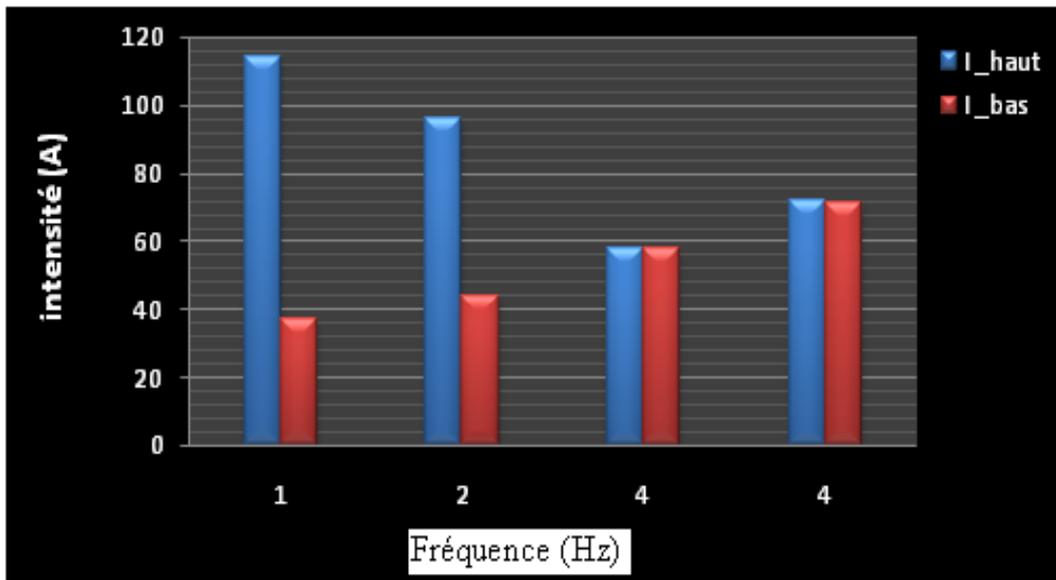


Figure IV.A.12 : Variation de l'intensité haute et basse en fonction de la fréquence

Pour $I = 200A$.

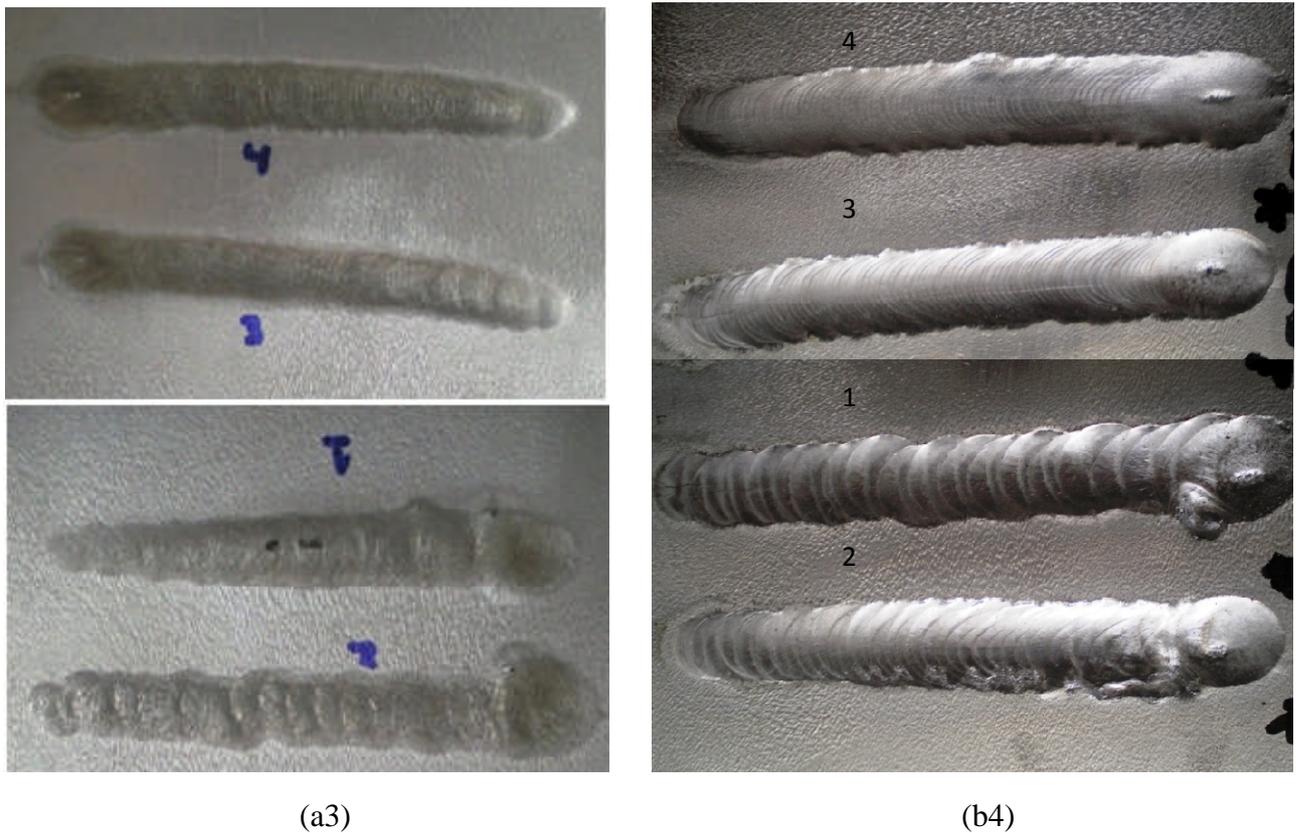


Figure IV.A.13 : cordon de soudure à une fréquence fixe égale à 4 Hz.
(a3) face endroit, (b4) face envers.

Les mêmes constats des variations du courant haut et bas en fonction de la fréquence sont aussi constatés dans cette expérience.

Ce qui a attiré notre attention est la qualité de soudure obtenue pour une fréquence de 4 Hz.

En effet, les stries de solidification sont nettement espacées dans le cas de 1 Hz et sont très rapprochées avec une bonne compacité dans le cas de 4 Hz figure. Cette qualité du cordon de soudure est expliquée par la combinaison entre la fréquence et le temps de séjour au chauffage (I_c) qui produit la fusion et le temps de refroidissement (I_c) plus important et la fréquence de 4Hz produit probablement des mouvements vibratoire du bain de fusion en produisant cette bonne compacité.

9. Paramètres de soudage TIG pulsé :

La maîtrise et la compréhension de l'effet des différents paramètres du courant pulsé nous a conduit à opter pour les paramètres de soudage qui seront présenter dans cette partie.

Le compromis des paramètres de soudage permettant d'obtenir une soudure pénétrante sont donnés sur le **Tableau IV.A.6.**

- On règle la commande (2) de courant bas en pourcentage de courant haut égal 20%.
- On règle la commande (3) du temps chaud et du temps froid à e pourcentage du cycle de pulsation du courant haut égal 20%.

Tableau IV.A.7 : Les paramètres de soudage des bonnes soudures réalisées.

paramètre	*Soudure 1	**Soudure 2		***Soudure 3	
Fréquence (Hz)	4	4	4	4	4
I_0 (A)	150	150	150	150	150
U (volt)	20	16	16	15	14
I_{haut} (A)	81	70	77	67	58
I_{bas} (A)	51	20	54	66	57
v (mm/s)	1.538	1.818	1.622	1.382	1.119
Débit de gaz (L/mn)	8	8	8	8	8
Epaisseur de tôle (mm)	2	2	2	2.5	2.5
Métal d'apport	sans		même type de la tôle soudé	sans	même type de la tôle soudé
Type de gaz	argon industriel			Argon pur	
Poste de soudage	Lincoln Square Waves TIG 355				

*Soudure1 : soudage TIG pulsé à une seule passe sans métal d'apport

**Soudure2 : soudage TIG pulsé à deux passes endroit dont la première passe est sans métal d'apport et la deuxième passe avec métal d'apport

***Soudure3 : Soudage TIG pulsé à deux passes endroit sans métal d'apport et envers avec métal d'apport.

9.1 Contrôle des soudures :

Les seules techniques de contrôle des soudures utilisés sont :

- Le contrôle visuel,
- Le contrôle radiographique,

9.1.1. Contrôle de Soudure 1 : soudure bout à bout en une seule passe sans métal d'apport

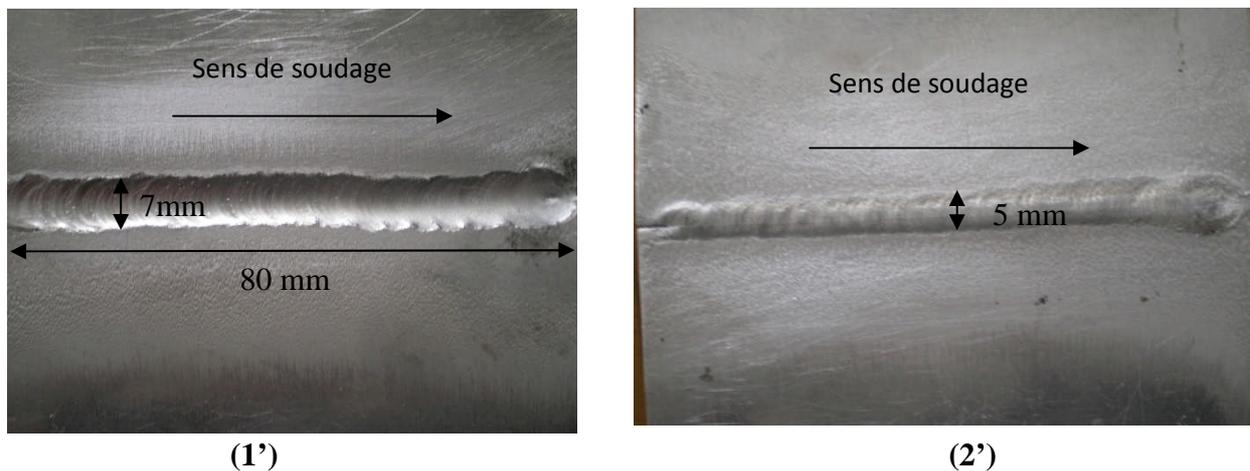


Figure IV.A 14 : Aspect du cordon de la soudure1, (1') face endroit, (2') face envers.

La figure VI.A.14 montre un bel aspect du cordon de soudure. Mais une concavité sur la face endroit qui constitue un défaut.

Les stries de solidification sont de formes elliptiques ; ce qui exprime un mouvement rectiligne du déplacement de la torche avec une faible vitesse de soudage comme le montre la figure IV.A.15.

La largeur moyenne mesurée du cordon est de 7mm sur la face endroit et de 5mm sur la face envers.

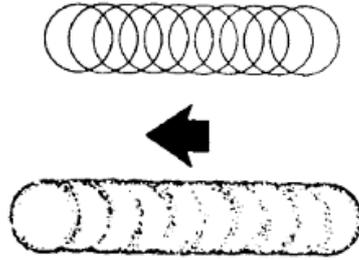


Figure IV.A.15: Mouvement rectiligne du déplacement de la torche [35].

9.1.2. Contrôle de Soudure 2:

La soudure 2 est une soudure bout à bout à deux passes, dont la première est sans métal d'apport et la seconde avec métal d'apport.

On rappelle que l'utilisation d'une seconde passe n'est que la conséquence de la concavité de la soudure 1.

L'aspect général du joint soudé est présenté sur la **Figure IV.A.16** :

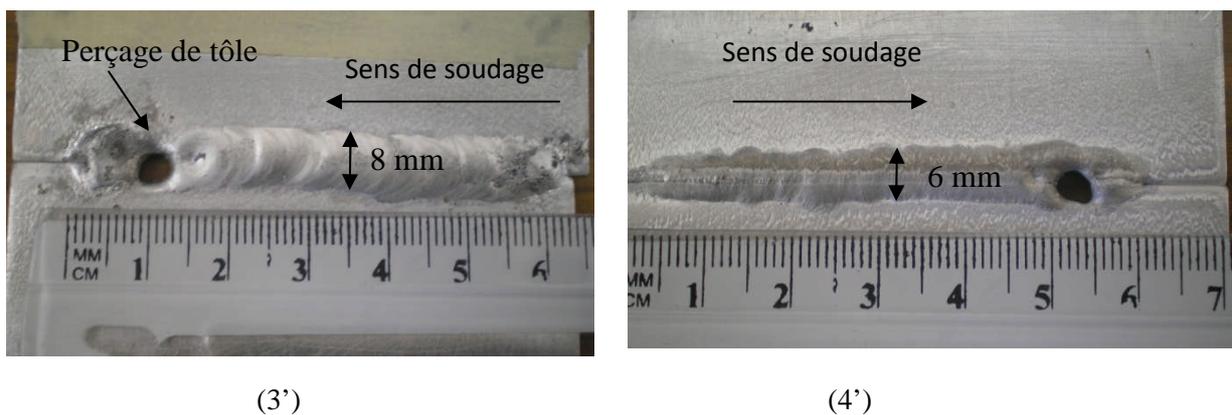


Figure IV.A.16 : Aspect du cordon de la soudure 1, (3') face endroit, (4') face envers.

Parmi les défauts constatés en contrôle visuel nous retrouvons :

- Un défaut de forme caractérisé par un effondrement sur le cordon de soudure en fin de parcours
- Un perçage à la fin de parcours de soudure
- Une microfissure au niveau perçage.

La largeur moyenne du cordon mesurée est de 8 mm sur la face endroit et de 6 mm sur la face envers.

9.1.3. Contrôle de Soudure 3 :

La soudure 3 est une soudure TIG, bout à bout sans métal d'apport en passe endroit et avec métal d'apport envers.

En fait, cette soudure est aussi due à une mauvaise pénétration obtenue en essayant de souder les deux bords avec métal d'apport en passe endroit, ce qui nous a obligé de procéder au soudage envers en utilisant le même métal d'apport.

L'aspect général du joint soudé est présenté sur la **Figure IV.A.17** :

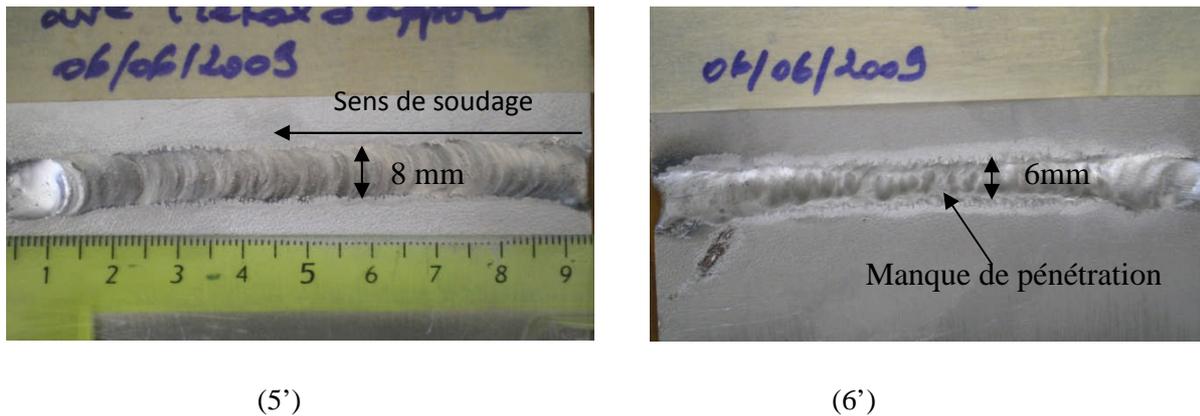


Figure IV.A.17 : Aspect du cordon de la soudure 1, (5') face endroit, (6') face envers.

L'aspect visuel de cette soudure montre quelques défauts apparents qui sont :

- Un manque de pénétration la face endroit de cordon de soudure, C'est un défaut qui s'est produit au moment de la reprise du cordon de soudure
- En fin de parcours nous avons aussi constaté un début d'effondrement du joint
- Une dénivellation dans le cordon de soudure à la face endroit.

La largeur moyenne du cordon mesurée est de 8 mm sur la face endroit et de 6 mm sur la face envers.

10. Conclusion :

Par comparaison entre l'aspect visuel de ces trois cordons de soudures TIG pulsé on remarque que :

- La première soudure montre un bel aspect du cordon de soudure par rapport aux autres soudures et présente aussi un mouvement rectiligne du déplacement de la torche
- La présence des défauts de soudage dans la deuxième et la troisième soudure
- La largeur des trois soudures est pratiquement de même largeur (7 à 8 mm).

Chapitre IV
Partie -B-

CARACTERISATION
METALLURGIQUE

Introduction :

La caractérisation est pour but de comprendre les phénomènes métallurgiques et mécaniques induits par les cycles thermiques du soudage. Pour cela, une analyse micrographique a été effectuée pour comprendre les différentes transformations microstructurales engendrées par les effets thermiques du cycle thermique. Les conséquences métallurgiques du soudage de 2024 T3 sont évaluées par une mesure de microdureté à travers le cordon de soudure.

1. Etude métallographique :

Généralement, pour établir une étude métallographique, trois étapes sont à suivre :

- ❖ Préparation des Echantillons
- ❖ Enrobage
- ❖ Polissage

La métallographie comporte :

- ❖ La macrographie.
- ❖ La micrographie.

Dans ce travail Seule la seconde qui sera traitée.

- ❖ Essai de Microdureté

1.1.Préparation des échantillons :

Cette étape consiste à la découpe des échantillons, l'enrobage, le polissage et les attaques avant l'observation métallographique.

1.2.Prélèvement :

On prend des coupes de 12 mm de largeur et 35 mm de longueur sur les pièces soudées, ces échantillons sont prélevés de façon aléatoire et d'éviter les endroits où présentent les défauts.

1.3.Enrobage :

Cette opération est nécessaire pour faciliter la manipulation surtout des échantillons minces et d'assurer une planéité pendant l'opération de polissage. C'est un procédé de moulage qui consiste à envelopper l'échantillon dans une résine polymérisante.

Il existe deux types d'enrobage :

- A chaud : se fait dans une résine bakélite dans une presse ;
- A froid : se fait dans un moule de résine auto-durcissante ;

Ce dernier est utilisé dans tous nos travaux pour éviter toutes les transformations qui peuvent être engendrées par l'échauffement de l'alliage de l'aluminium. Il s'effectue dans des moules en plastique dans lesquels est placé l'échantillon au dessus duquel on verse la résine liquide. Après solidification, l'échantillon est retiré du moule pour passer au polissage.

1.4. Polissage :

Est une opération nécessaire avant toute observation métallographique, les échantillons doivent être parfaitement polis, Pour une bonne observation, les échantillons sont polis jusqu'à l'état de miroir.

Le polissage a été effectué avec des papiers abrasifs dans l'ordre suivant :

- polissage grossier avec papier émeri : 180, 400, 600
- polissage fin avec papier émeri : 1000, 1200

Il est préconisé en finition sur feutre pour les alliages d'aluminium d'utiliser l'alumine (5 et 3 μm).

2. Observation métallographique :

Parmi les méthodes qui permettent d'observer les évolutions structurales de ces matériaux, la microscopie optique. Cette technique comporte une micrographie d'une limite de grossissement de 50 jusqu'à 1200.

Pour l'observation de phases sous microscope les échantillons polis à l'état miroir sont attaqués avec des réactifs d'attaques relatives à la nature du matériau et le type de phase qu'on voudrait observer.

Dans notre cas l'objectif est de montrer les grains et les précipités, on a utilisé la solution KELLER qui est composée de :

- 1 ml HF (acide fluodrique) 48%.
- 1.5 ml HCl (acide chloridrique).
- 2.5 ml HNO₃ (acide nitrique).
- 100 ml H₂O (l'eau).

Les micrographies ont été prises avec un microscope optique de marque **Zeiss Doté**. Les figures suivantes représentent respectivement les microstructures de l'échantillon avant le soudage (métal de base).

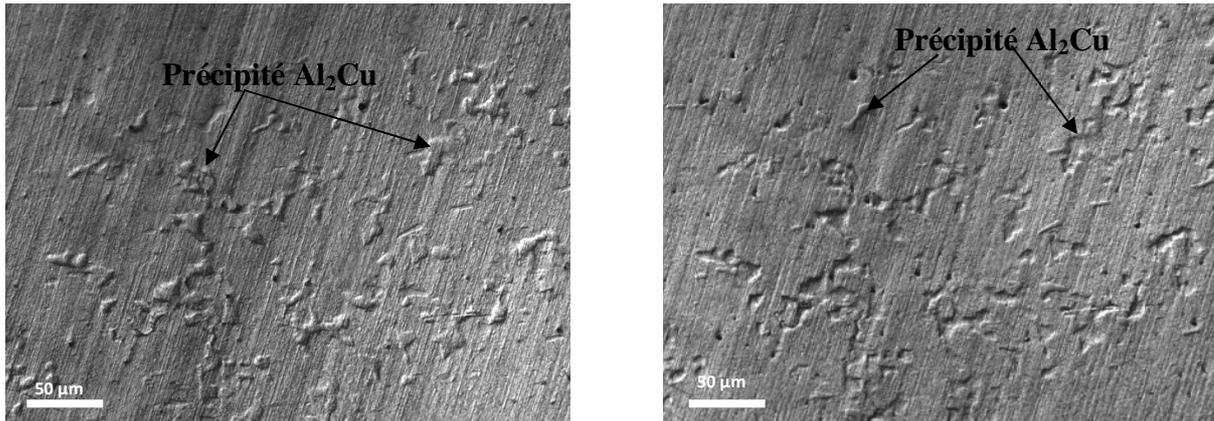


Figure IV.B.1: Métal de base sans attaque chimique

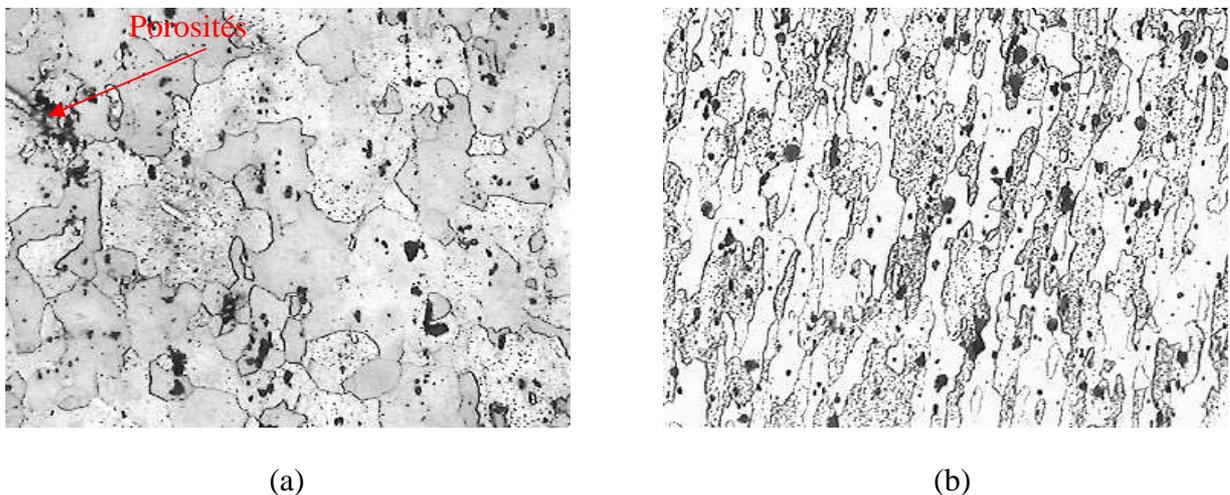


Figure IV.B.2 : Métal de base avec attaque chimique, (a) face, (b) profil.

La structure du métal de base est une structure en bande représentative de l'effet du laminage. Elle est caractérisée par un allongement du grain (figure (IV.B.2)).

2.1. Micrographies optiques de la soudure(3)

2.1.1. Analyse micrographique

D'une manière générale, les modifications de microstructures dans les joints soudés sont d'abord fonction de la température maximale atteinte mais aussi des temps de séjour à haute température et des vitesses de refroidissement durant le soudage. Ainsi, on pourra distinguer la zone fondue de la zone d'influence thermique dans laquelle la température de fusion n'a pas été atteinte. Lorsque les changements de phases peuvent se produire à l'état solide, on peut distinguer la partie de la zone influencée thermiquement qui s'est transformée (remise en solution) de celle qui ne s'est pas transformée durant le soudage.

En général, on pourra toujours distinguer la zone influencée thermiquement la plus proche de la zone fondue qui a été portée aux plus haute températures de celles influencées thermiquement plus éloignées jusqu'à celle dans laquelle les températures atteintes sont trop basses pour que la microstructure du métal de base évolue. Ceci est montré sur la **figure (IV.B.1)**.

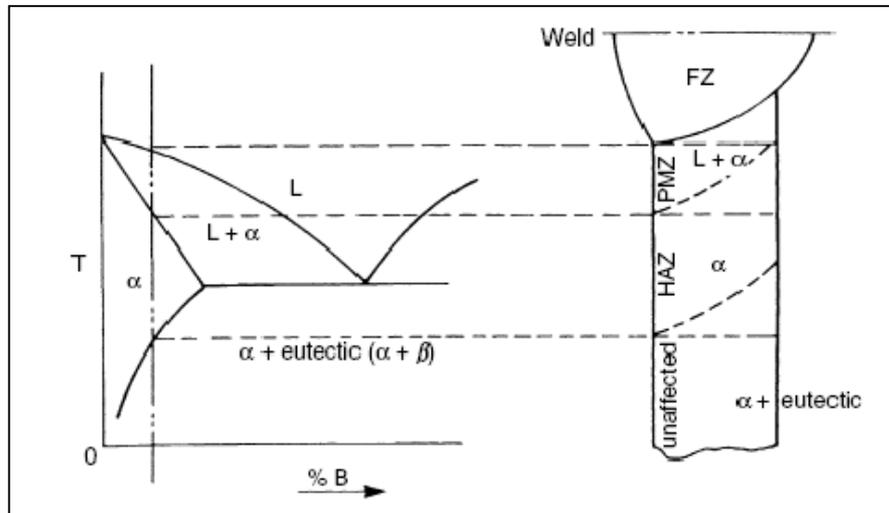


Figure (IV.B.3) : Corrélation entre le diagramme binaire A-B (Al-Cu) et les différentes zones d'un joint soudé [35]

En soudage des alliages à durcissement structural, on pourra toujours distinguer, d'une part une région plus proche de la zone fondue dans laquelle la température maximale atteinte durant le soudage a dépassé la température de la mise en solution et d'autre part une zone plus éloignée dans laquelle la température atteinte est restée toujours inférieure à la température de remise en solution.[35]

L'analyse métallographique du cordon de soudure nous permet de montrer clairement l'existence de quatre zones telles que présentées sur la bibliographie.

On observe les différentes zones de transformations structurales allant de la zone fondue (ZF) vers la zone à grains fins (ZAT) en passant par la zone de liaison (ZL) ou ZPF

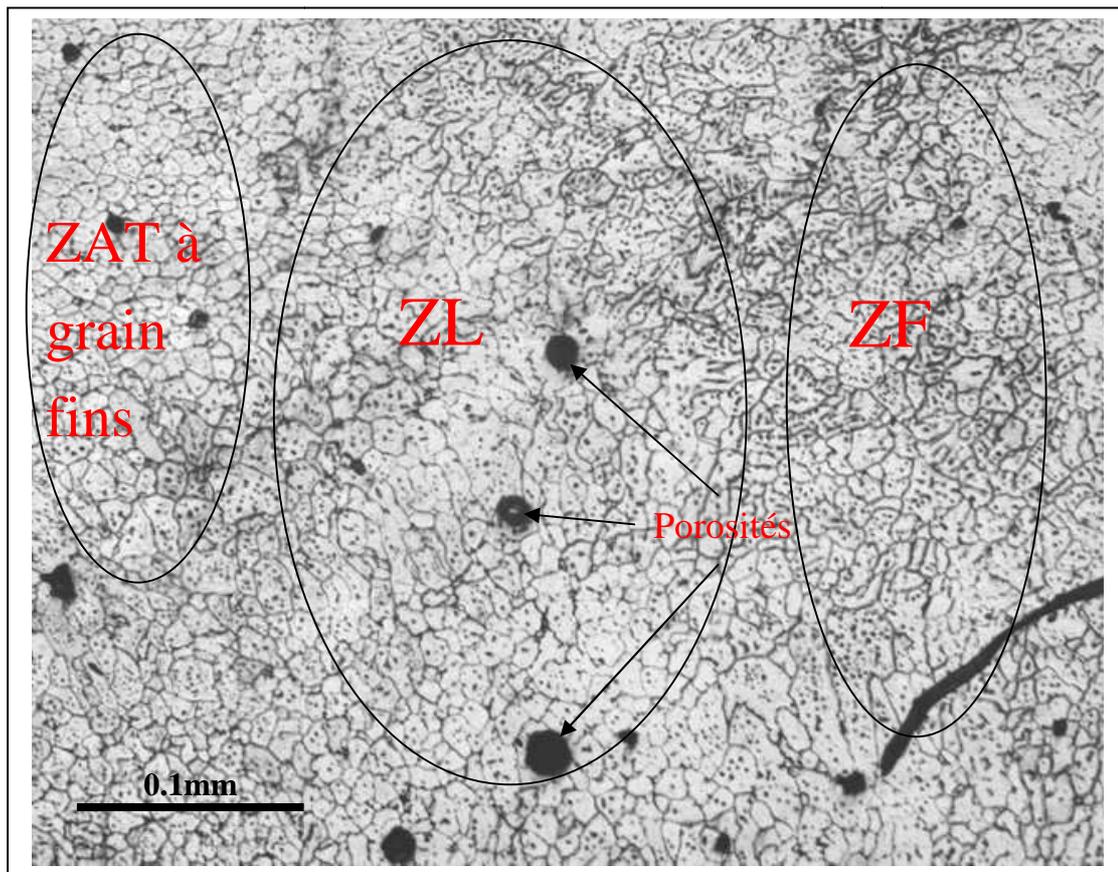


Figure IV.B.4 : Les différentes zones de transformations structurales (ZF-ZL-ZAT).

Dans ce qui suit nous allons présenter les évolutions structurales des différentes zones.

2.1.1.1. Zone fondue

Les structures obtenues dans la ZF sont le produit d'une solidification de l'état liquide vers un état solide est caractérisée par des structures équiaxiales dendritiques avec la formation de joints de grain équiaxes dendritiques conséquence d'une solidification assez lente due à la concentration de chaleur avec une vitesse de déplacement assez longue [35].

La micrographie de la passe de pénétration figure IV.B.5 (a) représente une structure à grains dendritiques équiaxes conséquence d'un refroidissement relativement rapide comparativement aux structures des figures IV.B.5 (b) et (c) qui présentent des structures à grains polyédriques pratiquement semblables. Ceci nous conduit à penser qu'un autre facteur (la composition du fil d'apport) influe sur le mode de solidification

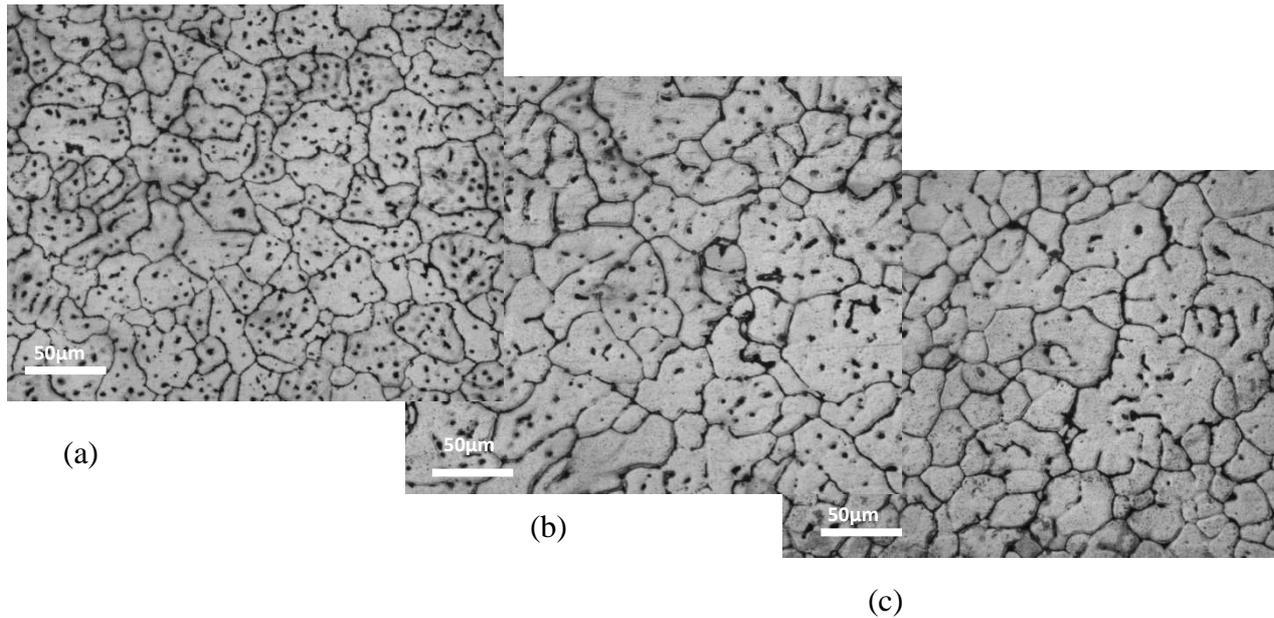


Figure IV.B.5 : Structure de la zone fondue

2.1.1.2. Zone de liaison :

C'est la zone adjacente à la zone fondue. Elle est le siège d'une transformation solide - liquide vers un état solide. La figure (IV.B.4) montre que cette zone est constituée de deux sous zones la plus éloignée de la zone fondue proche de la zone d'affinage de grain est constituée de gros grain de forme allongée avec épitaxie connue aussi comme zone de liaison (ZL) figure (IV.B.6 a).

La zone la plus proche de la zone fondue est constituée d'une structure équiaxe dendritique à gros grains grossiers, figure (IV.B.6 a).

La figure IV.B.6 b montre une structure à grains polyédriques comparativement à celle de la passe externe qui présente une structure à gros grains allongés.

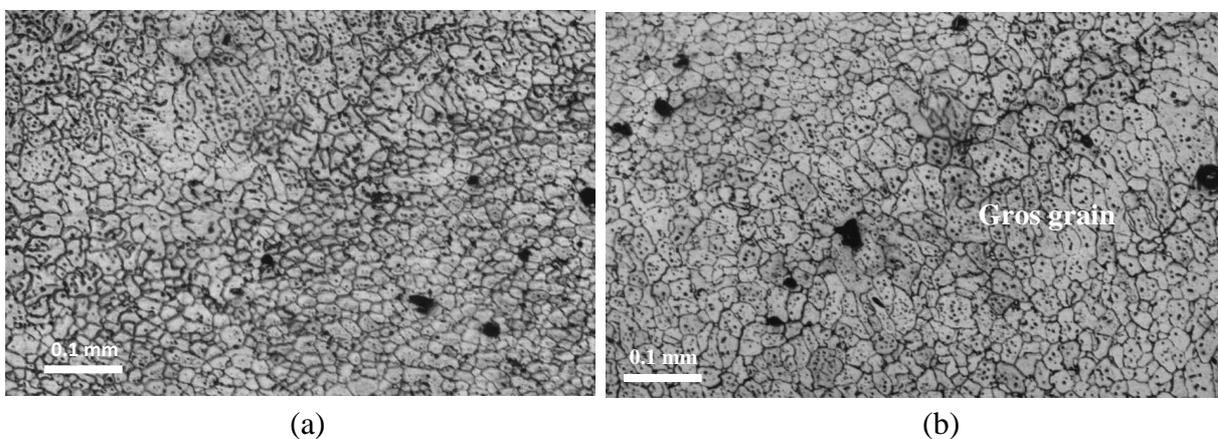


Figure IV.B.6 : Structure de zone partiellement fondue ZPF

2.1.1.3. La zone affectée thermiquement (ZAT)

La ZAT est la zone de transformation à l'état solide. Si l'on compare les structures obtenues sur un acier, nous constatons qu'on peut distinguer plusieurs sous zones allant de la zone à gros grain, à grain fins et une dernière zone à transformation partielle au dessus de Ac_1 pour le cas d'un acier hypoeutectoïde. Dans cet alliage 2024T3 nous constatons que seule une zone à grain fins de dimension moyenne $852\mu\text{m}$ est révélée. La zone à grain fins de la ZAT suit la zone de liaison. Elle correspond à une zone de remise en solution. En se référant au diagramme binaire (Al-Cu) pour une meilleure compréhension des transformations, et pour une composition chimique donnée par le tableau III.1, les températures sont évaluées à 500°C (limite de solubilité) et 570°C (solidus). Au-delà de cette zone à grains fins c'est la zone dite surmûrie (zone de non remise en solution) où les températures restent inférieures aux températures de remise en solution [59] (Figure IV.B.8). Cette zone ne peut être mise en évidence par la métallographie optique car aucune transformation microstructurale n'a lieu pour ces températures. Cependant, plusieurs travaux au microscope électronique à transmission (MET) ont montré l'existence de transformations de phases par précipitation de θ' , θ'' , et zones GP en fonction de la distance comme le montre la figure IV.B.7 ci-dessous [35].

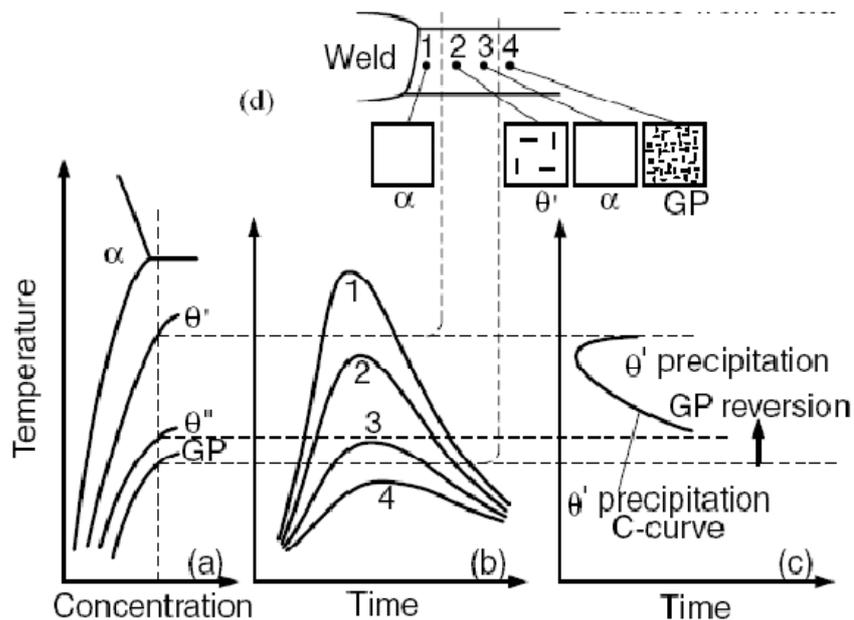


Figure IV.B.7 : Alliage Al-Cu traité thermiquement contenant des zones GP avant soudage: (a) diagramme de phase; (b) cycles thermiques; (c) courbe TTT de précipitation; (d) microstructure.

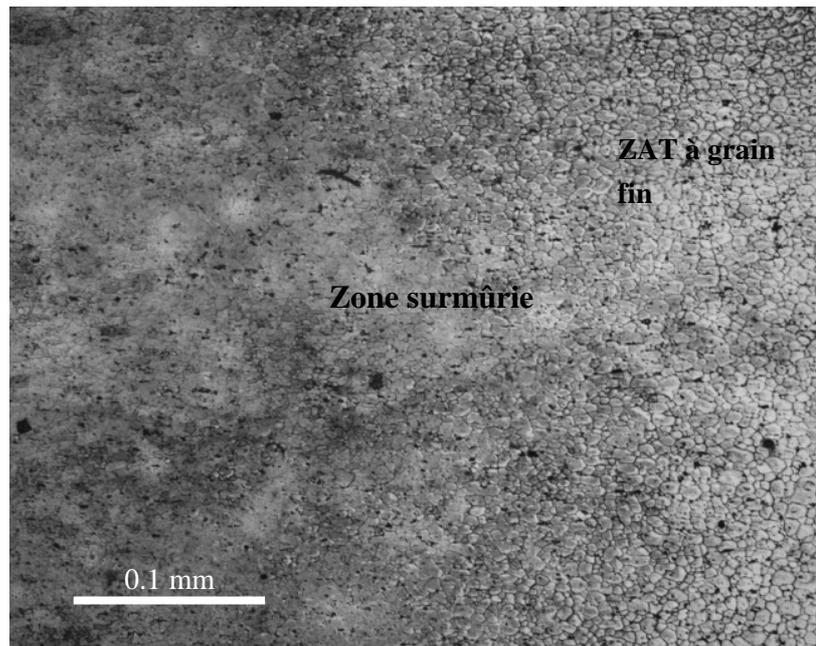


Figure IV.B.8 Zone surmûrie de la ZAT.

3. Conclusion :

L'analyse micrographique de la soudure montre que la structure des zones fondues est de type dendritique équiaxe. Les structures varient d'une zone à une autre en fonction des paramètres de soudage mis en jeu. Elles dépendent de l'énergie mise en jeu par l'arc et de la vitesse de soudage : les différents aspects macro et micrographiques montrent en effet que le mode de transfert thermique ainsi que la manière dont celui-ci est distribué influe sur la nature des microstructures que l'on peut obtenir.

4. Caractérisation mécanique des soudures :

En général, une soudure n'est acceptée que si les essais mécaniques de traction, de pliage, de résilience et de dureté répondent à des critères de qualités conformément à une norme de référence.

Dans ce travail on utilise seulement l'essai de dureté (Microdureté) sur la soudure (3).(voir **Tableau IV.A.7**).

4.1.Microdureté :

Pour apprécier les effets thermiques ainsi que, les variations structurales et leurs conséquences sur les propriétés mécaniques nous avons procédé aux mesures de microduretés avec une charge de 500 g. et un balayage tout au long du de la pièce soudée (en commençant par le métal de base à la zone fondue en arrivant à l'autre extrémité du métal de base) avec un pas de

300 μ m selon les abscisses et les ordonnées pour les soudures. La **Figure IV.B.8** montre un schéma du mode de prélèvement des valeurs de duretés sur toute la soudure.

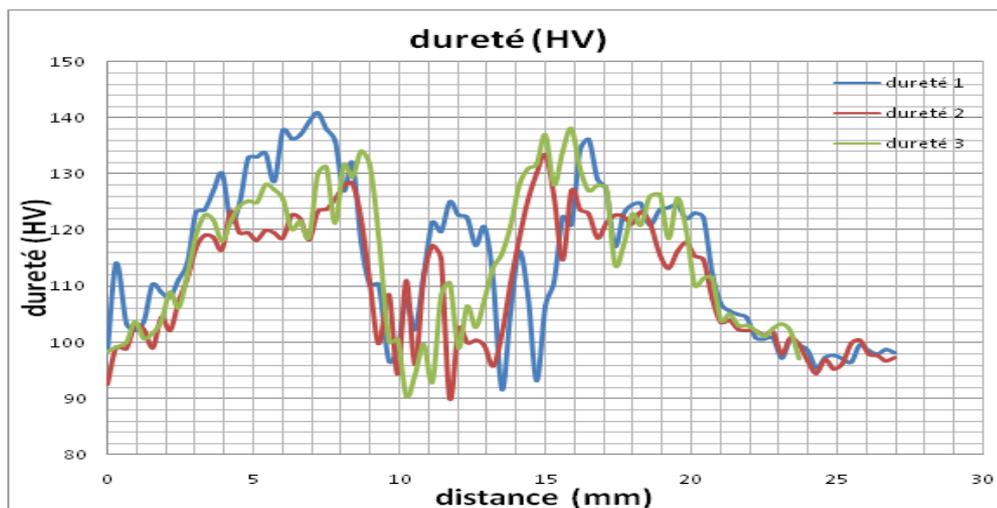


Figure IV.B.9 : Schéma du balayage de la microdureté.

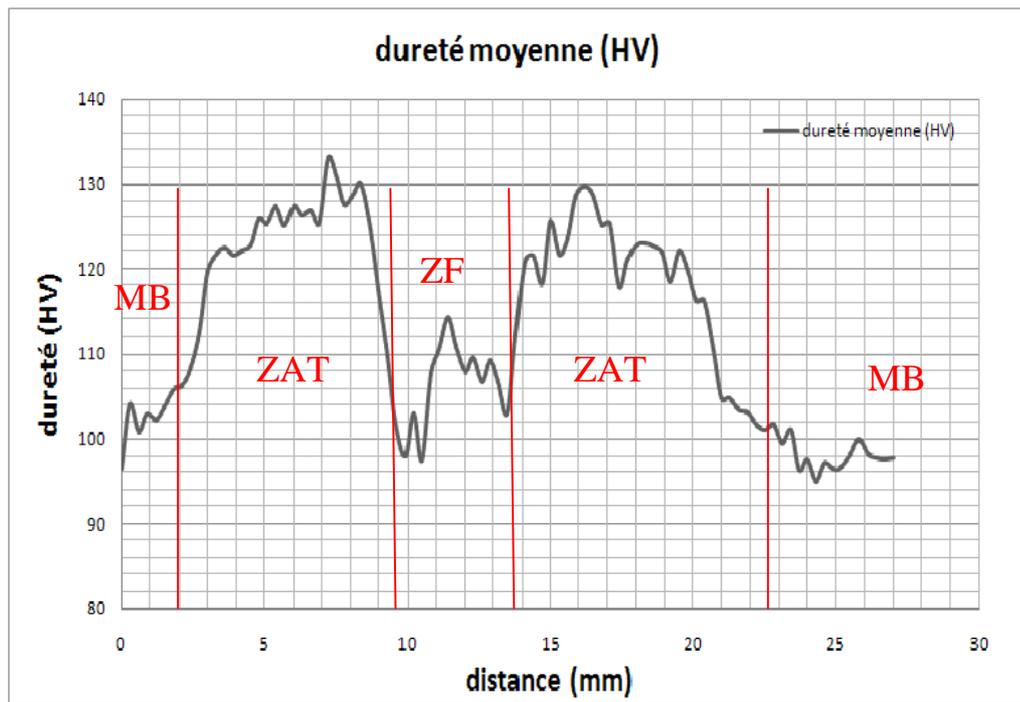
Les prélèvements de microdureté sont présentés sur la **Figure IV.B.10 (a, b)**

4.2. Analyse des microduretés des soudures TIG :

Les courbes de duretés de cordon de soudures présentent une même allure. Une dureté faible dans la zone fondue, suivi d'une croissance de dureté et une diminution pour recroître légèrement dans la ZAT et se stabiliser dans le MB. Les phénomènes régissant ce comportement sont difficiles à élucider. Ils dépendent de plusieurs facteurs : l'énergie mise en jeu, les cycles thermiques subits par chaque point (**Figure IV.B.7**) et l'étendue de la zone d'influence thermique (l'aluminium est un très bon conducteur thermique). Les travaux de C. Genevois montrent qu'en plus des phénomènes de précipitation on doit tenir compte de l'état structural après soudage (affinage et grossissements de grains) qui a une influence sur les propriétés mécaniques et plus particulièrement sur la dureté. Sachant que l'affinage de grain est caractéristique d'une mise en solution, les valeurs de dureté élevées correspondent au vieillissement naturel par précipitation des zones GPS et la diminution correspond à la dissolution de ces zones pour des températures entre 250°C et 300°C. [35]



(a)



(b)

Figure (IV.B.10) : (a), Profils de microdureté de soudure ; (b), profil moyenne de microdureté de soudure

Conclusion générale

Ce travail rentre dans le contexte de l'étude de soudabilité des alliages d'aluminiums. Il constitue une suite du travail réalisé par S.OUALLAM dans le cadre de son mémoire de Magister sur le soudage TIG. Cette soudabilité a été étudiée de deux côtés à savoir opératoire et métallurgique.

Concernant l'aspect opératoire, Nous relevons des difficultés pour souder de faibles épaisseurs sans métal d'apport tout en assurant une pénétration satisfaisante, condition primordiale d'une opération de soudage réussie.

En choisissant des paramètres de soudage plus adéquats que ceux choisis par S.OUALLAM lors de son étude, Nous avons réussi à assurer la continuité métallique, une bonne mouillabilité du bain de fusion, un bon aspect des cordons ainsi qu'une bonne homogénéité de ceux-ci. Les essais tests préliminaires ont permis de déterminer les paramètres opératoires optimaux, pour la fréquence, la meilleure était de 4Hz, qui correspond à une intensité de courant de 150A, tandis que le pourcentage de l'intensité basse en fonction de l'intensité haute et le temps de séjour pour le chauffage et le refroidissement sont réglés tous les deux à 20%.

Concernant la soudabilité métallurgique, on peut dire à partir de ce travail, que pour des températures supérieures à 450°C, on peut apprécier les transformations structurales telles que l'affinage de grain juste à la limite de la zone de liaison à gros grains. En comparaison, le nombre des gros grains que nous avons obtenu était inférieur à celui obtenu par S.OUALLAM. Ces transformations sont apparentes lors de l'analyse métallographique par microscopie optique.

Malgré les précautions de préparation avant soudage, des défauts de types porosité ont été obtenus mais ils étaient inférieurs à ceux obtenus par S.OUALLAM ce qui peut être dû aux paramètres que nous avons choisis ainsi qu'aux précautions prises.

REFERENCES
BIBLIOGRAPHIQUES

BIBLIOGRAPHIE

- [1] Raymond Loewy, L'Aluminium. série de technologie ,2009.
- [2] Roger Develay. Données numériques sur l'Aluminium non allié. Techniques de l'ingénieur, 2008.
- [3] Institut international de soudure. Recommandation concernant les structures soudées en aluminium et alliage Al-Mg.2^{ème} édition .1980
- [4] Christian Vargel,. Propriétés générales de l'aluminium et de ses alliages. Techniques de l'ingénieur M.4661. Année 2008.
- [5] Roger Develay. Aluminium et alliages d'Aluminium corroyés, propriétés mécaniques. Techniques de l'ingénieur (M 134), 2008.
- [6] Christian.Vargel. Le comportement de l'aluminium et de ses alliages. Edition dunod (Paris), 1979.
- [7] Sébastien Morin. effet du magnésium, des traitements thermiques et de la porosité sur les propriétés mécaniques de traction et de fatigue de l'alliage sous pression a380.1. Université du Québec a Chicoutimi. Juillet 2002. Mémoire d'Ingénieur.
- [8] Revue Métallerie 49-Spécial soudage, Classification des alliages d'Aluminium, Avril 2003
- [9] <http://www.wikipédia.org/aluminium>, 2009.
- [10] J. R. Kissell, Aluminum and Its Alloys, Handbook of Materials for Product Design, TGB Partnership, Hillsborough, North Carolina, Third Edition McGraw-Hill, Inc 2001 b, P .104
- [11] E.A. Brandes, G.B. Brook, Smithells , Light Metals Handbook, Butterworth-Heinemann (1998) pp. 8-28.
- [12] R. Develay, Traitements thermiques des alliages d'aluminium, Techniques de l'ingénieur M1290, p 17.
- [13] M.F. Ashby, D.R.H. Jones, An introduction to microstructures, processing and design, Engineering Materials, 2 Second Edition (1998) pp. 103-110
- [14] MF. Ashby DRH. Jones, Matériaux 2. Microstructure et mise en œuvre, DUNOD.1991
- [15] <http://v.castelhano.free.fr/probatoire/probatoire1.htm>.

- [16] B. Dubost, P. Sainfort, Durcissement par précipitation des alliages d'aluminium Techniques de l'ingénieur, M240, 2008.
- [17] R. Cazes. Soudage à l'arc. Techniques de l'ingénieur, B7730, Août 1995.
- [18] S. BENISSAAD, Le soudage TEC 340, 1991.(Article tiré de l'internet, 2009).
- [19] Alain Michel, Pièces mécaniques soudées (Rappels et définitions).Techniques de l'ingénieur (BM 5185v2), 2008.
- [20] Blondeau, Métallurgie et mécanique du soudage (Mécanique et ingénierie des matériaux). Hermès Lavoisier 2001.
- [21] Bernard et G. Prudhomme, compléments à l'étude des phénomènes thermiques dans les joints soudés, doc. IIS/IIW n° X.913-78, 1978.
- [22] Guy Murry, Soudage et soudabilité métallurgique des métaux. Techniques de l'ingénieur M715 , 2008.
- [23] D.Rosenthal , the theory of moving sources of heat and its applications to metals treatments / transactions ASME, vol 68, 849,1946.
- [24] N.N. Rykiline , calcul des processus thermiques de soudage / soudage et techniques connexes, n°1-2, 1961.
- [25] M. Clyde et MC.Adams , Cooling rates and peak températures in fusion, (Pdf- Internet 2009).
- [26] L.Devillers ,D. Kaplan, J.P. Jansen, simulation thermique des zones affectées par la chaleur en soudage multi-passes des aciers de construction/ soudage et technique connexes, mars-avril 1987.
- [27] D.Seferian , Métallurgie de la soudure, Éd. Dunod, 1965.
- [28] G.Murry etA. Constant , Revue. de Métal., vol. 62 (1965).
- [29] W. F. Savage , E. F Nippes, A Study of Weld Interface Phenomena in a Low Alloys Steel, Welding Journal Research Supplement (1976), p. 260s-268s.
- [30] R. Baus, W.Chaprau, Application du soudage aux constructions, 1979.
- [31] SAF-AIR LIQUIDE, Procédés Tig Et Plasma, Ed. 1- SUY 542, 20/03/2000.
- [32] Guide du soudage, Soudage à l'arc sous gaz de protection TIG, MIG, MAG, Tome V, publication de la soudure autogène (Encyclopédie).

[33] Jefferson's Welding Encyclopaedia, CD Rom, American Welding Society Publisher, 18ème Edition (1997) pp. 217-235.

[34] S.Belakhowsky, Théorie et pratique du soudage, Éd. Desforges, 1968.

[35] S.Ouallam, Etude du soudage TIG et laser Nd-YAG de l'alliage d'aluminium 2024T3, Mémoire de Magister, Avril 2009.

[36] Althous, Procédé de soudage à l'arc, Éd. Rynald Goulet inc, 2008.

[37] VARIANTE DU PROCÉDÉ TIG SOUDAGE TIG PAR IMPULSION, soudage électrique à l'électrode réfractaire; bibliothèque Centre de Soudage de Chéraga.