



المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
Ecole Nationale Polytechnique

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Ecole Nationale Polytechnique
DÉPARTEMENT DE GENIE MÉTALLURGIQUE

Projet de fin d'étude

En vue de l'obtention d'un diplôme d'ingénieur d'état en Métallurgie

Thème

*Influence de la nature du courant et du gaz de
protection sur l'alliage d'Aluminium en soudage*

TIG

Etudié par :

Nacim SAIGH.
Abdel Hakim ZOUAI.

Dirigé par :

Mr. A. DJEHLAL. ENP
Mr. S. OUALLAM CSC

Juin 2008

Dédicaces

A mes très chers parents

A mon frère

A ma sœur

A toute ma grande famille

A tous mes amis

N. SAIGH

A mes très chers parents

A mes frères

A mes sœurs

A tous mes amis

A.ZOUJA

Remerciements

Nous tenons à remercier sincèrement nos promoteurs Mr. DJEGHLAL et Mr. OUALLAM pour nous avoir encadrés, conseillés lors de notre projet, et pour leur disponibilité et leur aide.

Nous remercions également tous les membres du jury d'avoir accepté de juger notre travail.

Nos remerciements s'adressent également à toutes les personnes qui ont collaboré à la réalisation de ce travail dans le Centre de Recherche Scientifique et Technique en Soudage et Contrôle (C.S.C).

Nous exprimons notre reconnaissance à tous les enseignants de département de métallurgie qui ont contribué de près ou de loin à notre formation.

Enfin nous tenons à exprimer notre gratitude envers toute personne ayant contribué à la réalisation de ce modeste travail.

ملخص

إلحام خلأط الألمنيوم يبدي دور فعال في المجالات الصناعية، وخاصة صناعة السيارات و الطائرات..ألخ يهدف هذا العمل إلى تقييم تأثير عوامل الإلحام على خليط الألمنيوم 2024T3 . و هذا بأ ستنباط الخصائص المميزة في مجال القابلية للإلحام، و معرفة العلاقة بين البنية المجهرية و ما يقابلها كتطور في التميزاة الميكانيكية في مختلف أنحاء الشريط الملحم، و إمكانية تحديد هذه التميزات و ربطها إلى العقب الحرارية للإلحام المولدة من طرف جهاز التلحيم TIG .

كلمات مفتاحية الإلحام، تقنية TIG ، الألمنيوم، العقب الحرارية، التميزات.

RESUME :

Le soudage des alliages d'Aluminium présente un intérêt particulier dans le cadre de leurs applications dans diverses industries aéronautique, automobile et autres. Ce travail, Consistera à évaluer, dans le domaine de la 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 au travers du joint seront déterminées et reliées aux cycles thermiques du soudage engendré par le procédé TIG.

MOTS-CLES

Soudage, procédé TIG, Aluminium, Cycles thermiques, microstructure.

ABSTRACT:

The welding of Aluminum alloys is of particular interest within the framework of their applications in various industries, aircraft, cars and others. This work will consist in evaluating, in the field of operational weldability, the influence of the parameters of welding on alloy 2024 T3, and the characteristics of the welding. The evolutions of the mechanical and microstructural characteristics through joint will be determined and connected to the thermal cycles of the welding generated by process TIG.

KEY-WORDS:

Welding, TIG process, Aluminum, Thermals cycles, Microstructure.

Sommaire

<i>Introduction générale</i>	1
------------------------------------	----------

Partie Bibliographique

CHAPITRE I : Généralité sur l'aluminium et ses alliages

<i>I.1. Fabrication de l'aluminium et des ses alliages</i>	3
<i>I.2. Propriétés d'usage des alliages d'aluminium</i>	4
I.2.1. Propriétés physiques	4
I.2.1.1. Propriétés atomiques et cristallines	4
I.2.2. Propriétés thermiques :.....	5
I.2.4. Propriétés mécaniques :.....	7
I.2.5. Propriétés électriques et magnétiques :	13
I.2.6. Résistance à la corrosion :	14
<i>I.3. Désignation des alliages d'aluminium</i> :	16
I.3.1. Les alliages d'aluminium de fonderie :	16
I.3.2. Désignation des alliages d'aluminium corroyés :	17
<i>I.4. Base de la métallurgie de l'aluminium et de ses alliages</i> :	20
I.4.1. Influence des éléments d'addition :.....	20
I.4.2. Durcissement par écrouissage :	21
I.4.3. Traitements thermiques d'adoucissement par restauration ou recuit	21
I.4.4. Traitement de durcissement structural :	23
<i>I.5. Application de l'aluminium et de ses alliages</i>	26
I.5.1. Aluminium dans les transports :.....	26
I.5.2. Aluminium dans l'industrie électrique et électronique :	28
I.5.3. Aluminium dans le bâtiment et l'architecture :	29

CHAPITRE II : Soudage, procédés et caractéristiques physiques et métallurgiques

<i>II.1 Introduction</i>	30
<i>II.2 Condition d'installation de la liaison métallique</i> :	31
II.2.1 Processus d'activation de surface :	31
II.2.2 Elimination des gênes à l'installation de la liaison :	32
<i>II.3 Caractéristiques et classification des procédés de soudage</i> :	33
<i>II.4 Procédé de soudage à l'arc électrique</i> :	34
II.4.1 Propriétés de l'arc de soudage :	34
II.4.2 Formation de la soudure :	39
II.4.3. Principaux procédés de soudage à l'arc :	41
II.4.4 Description du procédé TIG :	41
II.4.4.1 Méthode :	41
II.4.4.2 Matériels :	42
II.4.4.3. Polarité de l'électrode :	45
II.4.4.4. Gaz de protection :	47
II.4.4.5. Avantages et limitations :	49
<i>II.5. Les phénomènes thermiques, métallurgiques dans la zone affectée par la chaleur en.....</i> <i>Soudage</i> :	50
II.5.1. Cycles thermiques	50
II.5.2. Aspect thermique lié au soudage	51
<i>II.6. Paramètre de refroidissement en ZAT</i>	56

CHAPITRE III : Métallurgie de soudage des alliages d'aluminium

<i>III.1 La métallurgie de soudage</i>	60
<i>III.2. Étude du diagramme des phases métastables dans le système aluminium cuivre</i>	60
<i>III.3. Transformations métallurgiques liées au soudage</i>	64
<i>III.4. Recristallisation et croissance pendant la soudure</i>	66
III.4.2. Cycle thermique	66
<i>III.5. Effets des paramètres et le processus de soudage</i>	68
<i>III.6. Nettoyage et dégraissage avant la soudure</i>	70

<i>III.7. Règles générales de préparation des bords en vue du soudage.....</i>	71
<i>III.9. Défauts de soudage</i>	73
III.8.1. Porosité en aluminium et ses alliages	73
III.8.2. Enlèvement de film d'oxyde pendant la soudure	74
III.8.4. Fissuration à chaud	75
III.8.5. Fissuration à froid	76

Partie expérimentale

CHAPITRE IV : *Dispositif expérimental*

<i>IV.1 Les matériaux</i>	79
<i>IV.2. Equipements du poste soudage TIG.....</i>	80
<i>IV.3. Préparation des échantillons</i>	81
<i>IV.3.1. Enrobage.....</i>	81
<i>IV.3.2 Polissage</i>	81
<i>IV.4. Microscope optique</i>	82
<i>IV.5. Microduromètre.....</i>	83
<i>IV.6. Contrôle radiographique.....</i>	84

CHAPITRE V : Conception et réalisation

<i>V.1. Préparation des éprouvettes.....</i>	86
V.1.1. Nettoyage de la surface.....	86
V.1.2. le bridage	87
<i>V.2. Opération de soudage</i>	87
<i>V.3. Influence des paramètres de soudage</i>	88
V.3.1. Influence de l'intensité	88
V.3.2. Influence du type de gaz	93
V.3.3. influence du diamètre de l'électrode de tungstène.....	95
<i>V.4. conclusion.....</i>	96

CHAPITRE VI : Caractérisation des joints de soudure

<i>VI.1. Caractérisation non destructive</i>	97
VI.1.1. Contrôles visuels	97
VI.1.2. Ressuage	98
VI.1.3. Radiographie X	99
<i>VI.2. Caractérisation destructive</i>	99
VI.2.1. Etude métallographique	99
VI.2.1.1. Préparation des échantillons	100
VI.2.1.2. Prélèvement	100
VI.2.1.3. Enrobage	100
VI.2.1.4. Polissage	101
VI.2.1.5. Observation métallographique	101
<i>VI.3. la micrographie</i>	102
<i>VI.4. Essai de microdureté</i>	108
<i>VI.4. conclusion</i>	110
<i>conclusion générale</i>	111

Introduction générale

Depuis les années 60 les facteurs d'économie de l'énergie et la matière sont imposés pour les industries d'assemblage à savoir l'aéronautique, l'industrie navale et automobile, ce qui amène les chercheurs à développer des techniques d'assemblage et élaboration des matériaux qui ont des propriétés mécaniques, électrochimiques et thermiques très efficaces. Pour cela les alliages d'aluminium, de magnésium, titane ...sont les plus demandés sur le marché mondial, car ils possèdent une faible densité volumique, des hautes propriétés mécaniques et une très grande résistance à la corrosion. Les obstacles qui confrontent ces recherches sont les difficultés de mise en forme et d'assemblage.

Dans ce contexte, on s'intéresse au soudage de l'alliage d'aluminium 2024 T3 par le procédé TIG , ce dernier(2024 T3) est employé dans le domaine aéronautique (Air Algérie). En rappelant que l'alliage est de type 2024T3, qui possède une mauvaise soudabilité : porosité, fissurations et d'autres défauts.

Nous commençons par une recherche bibliographique sur une généralité sur les alliages d'aluminium, soudage et soudage des alliages d'aluminium .la partie expérimentale contient trois chapitres : le premier consacré aux matériels utilisés, les deuxième pour la conception et la réalisation des cordons de soudure, et les paramètres appliqués à savoir l'intensité, le gaz de protection comme étude comparative entre deux gaz argon pur et un argon industriel et le diamètre de l'électrode. Pour terminer une partie sur la caractérisation des joints de soudure où on utilise des contrôles destructifs (métallographie et essai de microdureté) et non destructifs (un contrôle visuel, un ressuage et une analyse radiographique par rayon X).

CHAPITRE I : Généralité sur l'aluminium et ses alliages

Introduction :

L'aluminium a connu un développement spectaculaire depuis sa découverte en 1854 symbolisée par la présentation à l'Académie des Sciences, par le chimiste français Sainte-Claire Deville, d'un petit lingot réalisé par voie chimique, mais le véritable développement industriel de l'aluminium et ses alliages se produit en 1886 avec l'invention du procédé d'électrolyse de l'aluminium par Paul Héroult en France et Charles Martin Hall aux Etats-Unis. L'aluminium est aujourd'hui le premier métal non ferreux en tonnage, il a supplanté l'étain dans les années 1920, le plomb dans les années 1940 le zinc puis le cuivre dans les années 1950.

I.1. Fabrication de l'aluminium et des ses alliages

L'importance prise aujourd'hui par l'aluminium n'est pas seulement celle de l'aluminium brut mais celle de toute une filière avec, en amont, le minerai et, en aval, l'industrie de transformation en produits semi-finis (voir *figure I.1*) [1].

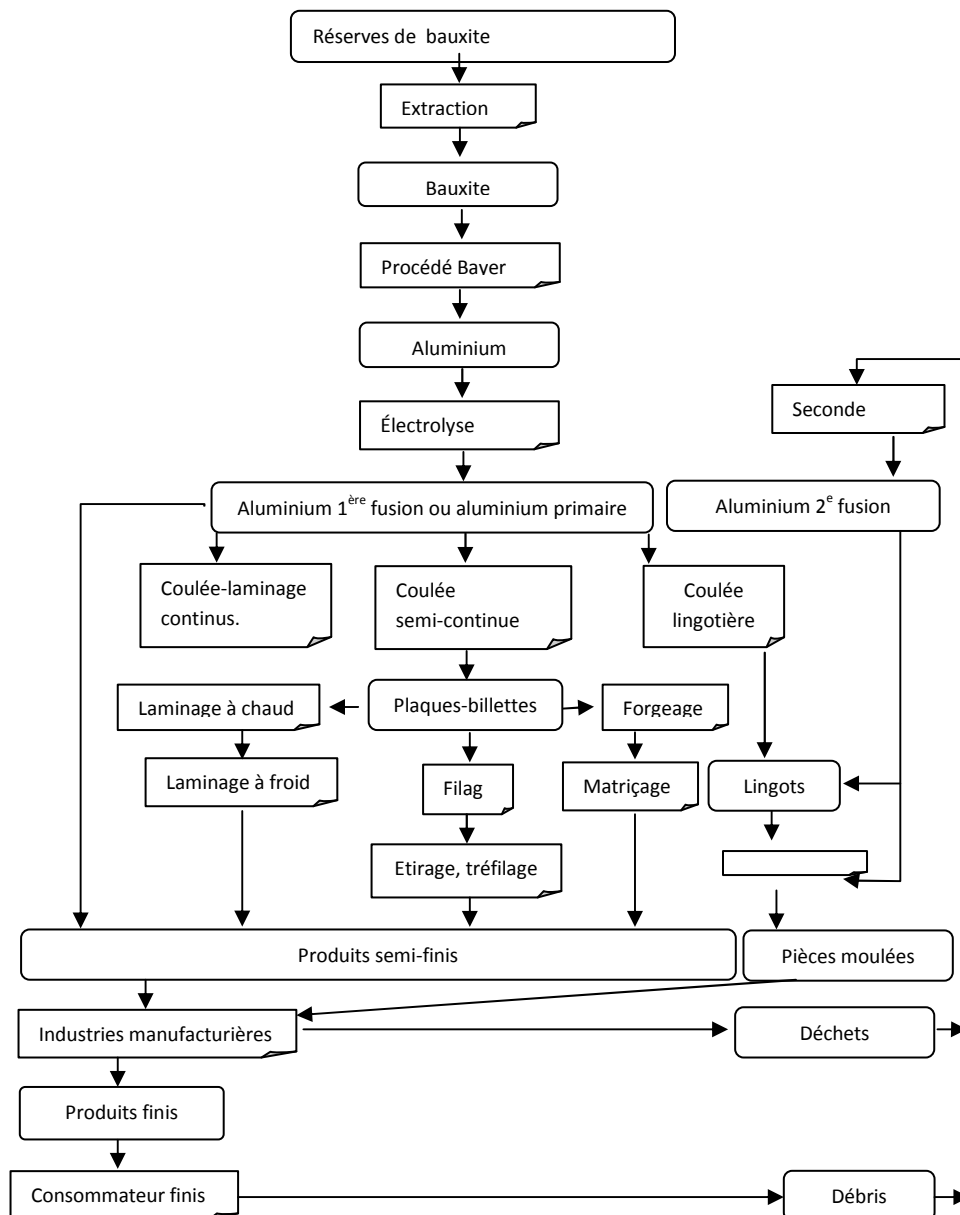


Figure I.1 : Principaux stades et flux dans la fabrication de produits en aluminium [1].

- **Minerai :**

L'aluminium est, après l'oxygène et le silicium, le troisième élément de l'écorce terrestre :

Il constitue 8% de la lithosphère sous forme de silicates plus ou moins complexes à faible teneur en aluminium. Mais dans certaines régions, sous l'action prolongée de l'eau, l'élimination d'une partie importante de la silice a donné des roches riches en alumine (45 à 60 %), ce sont les bauxites qui constituent actuellement la source quasi exclusive d'aluminium [1].

- **Production d'alumine :**

Le procédé utilisé pour obtenir l'alumine à partir de la bauxite est le procédé Bayer. Après broyage, la bauxite est attaquée à chaud, sous pression, par la soude, ce qui permet d'obtenir liqueur d'aluminate de soude insoluble en suspension. Cette liqueur est ensuite décantée : les oxydes de fer et de silicium forment une boue rouge, chimiquement inerte, qui est évacuée vers un site de déversement approprié, la liqueur restante est envoyée dans des décomposeurs pour précipitation de l'alumine, qui est ensuite récupérée par filtration et calcinée [1].

- **Production de l'aluminium :**

L'aluminium est produit actuellement dans le monde entier par le procédé mis au point par Héroult et Hall en 1886, qui consiste en l'électrolyse de l'alumine dissoute dans la cryolithe fondue à environ 1 000 °C, dans une cuve comportant un garnissage intérieur en carbone-cathode. L'aluminium formé par électrolyse se dépose au fond de la cuve, et l'oxygène de l'alumine réagit avec le carbone de l'anode pour former de l'oxyde de carbone et du gaz carbonique [1].

I.2. Propriétés d'usage des alliages d'aluminium

I.2.1. Propriétés physiques

I.2.1.1. Propriétés atomique et cristallines

Ces propriétés sont les suivantes :

- Numéro atomique : 13 ;
- Masse atomique : 26,98

- Principal isotope : A127 stable comprenant 14 neutrons et 13 protons ;
- Valence dans les composés chimique : 3 ;
- Section efficace d'absorption pour les neutrons thermiques : $0.232 \pm 0.003, 1 b = 10^{-28} m^2$;
- Structure cristalline à face centrée stable à toute température
- Constante réticulaire : $4.049596 \times 10^{-10} m$ à 25 °C ;
- Diamètre atomique : $2.86 \times 10^{-10} m$;

Volume atomique : $9.999 \times 10^{-6} m^3/mol$ [2];

- **masse volumique :**

La masse volumique est de 2699 à 2699 kg/m³ pour un titre de 99.95 %.

Cette valeur est légèrement modifiée par la présence des' éléments étrangers ou d'impuretés :

- 2700 kg/m³ pour un titre de 99.65%
- 2710 kg/m³ pour un titre de 99.00 à 99.30% [2].

I.2.2. Propriétés thermiques

- **Fusion :**

La température de fusion de 660°C pour un aluminium de pureté titrée à 99.996 % ; intervalle de fusion est de 664-657 °c pour un aluminium de titrée de 99.00 à 99.50%.

La chaleur de fusion équivaut 2.56 kJ/kg, ou 95 cal/g.

- **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 (voir *tableau I.1*) le coefficient de dilatation thermique linéaire de l'aluminium est $23 \times 10^{-6} k^{-1}$ à la température (*tableau I.2*)

$7.4 \times 10^{-11} atm$ à $+ 0727^{\circ}C$	$08.1 \times 10^{-6} K^{-1}$ à $- 198^{\circ}C$	$23.8 \times 10^{-6} K^{-1}$ de 20 à $100^{\circ}C$
$3.0 \times 10^{-6} atm$ à $+ 1127^{\circ}C$	$17.1 \times 10^{-6} K^{-1}$ à $+ 123^{\circ}C$	$24.6 \times 10^{-6} K^{-1}$ de 20 à $200^{\circ}C$
$9.8 \times 10^{-4} atm$ à $+ 1527^{\circ}C$	$24.9 \times 10^{-6} K^{-1}$ à $+ 127^{\circ}C$	$25.4 \times 10^{-6} K^{-1}$ de 20 à $300^{\circ}C$
$3.7 \times 10^{-2} atm$ à $+ 1927^{\circ}C$	$28.2 \times 10^{-6} K^{-1}$ à $+ 327^{\circ}C$	$26.5 \times 10^{-6} K^{-1}$ de 20 à $400^{\circ}C$
$7.3 \times 10^{-1} atm$ à $+ 2427^{\circ}C$	$33.5 \times 10^{-6} K^{-1}$ à $+ 527^{\circ}C$	$27.7 \times 10^{-6} K^{-1}$ de 20 à $500^{\circ}C$

Tableau I.1 : tension de vapeur de l'aluminium [1].

Tableau I.2 : variation de coefficient de dilatation thermique en fonction de la température [1].

Tableau I.3 : le coefficient de dilatation thermique linéaire [1].

- **Dilatation thermique :**

Le coefficient de dilatation thermique linéaire de l'aluminium est $23 \times 10^{-6} k^{-1}$ à la température de $20^{\circ}C$, il varie en fonction de la température (Tableau I.2).

Le coefficient moyen de dilatation thermique linéaire entre deux températures est plus souvent utilisé, il est alors fonction du domaine de température considéré (Tableau I.3).

- **Conductivité thermique :**

La conductivité thermique est de $237 W/(m \times k)$ à la température ambiante. Elle varie en fonction de la température (Tableau I.4) [2].

$302. W/(m. k)$ à $- 173^{\circ}C$
$237. W/(m. k)$ à $+ 020^{\circ}C$
$208. W/(m. k)$ à $+ 660^{\circ}C$ -état solide-
$091. W/(m. k)$ à $+ 660^{\circ}C$ -état liquide-

Tableau I.4 : Variation de la conductivité thermique en fonction de la température [2].

Au-dessous de $-173^{\circ}C$, la conductivité thermique de l'aluminium de pureté titre 99,99 et plus, est très sensible au niveau des impuretés.

- **Propriétés thermochimiques**

La capacité thermique massique est de $9010 J/(kg. K)$, soit une capacité thermique molaire de $24.29 J/(kg. K)$.

L'entropie est de 1050 J/ (kg. K), soit une entropie molaire de : 28,33 j/ (mol. K).

I.2.4. Propriétés mécaniques

Le tableau I.5 donne respectivement pour les principaux alliages d'aluminium de corroyage et de moulage les caractéristiques mécaniques typiques, déterminées à la température ambiante, à savoir :

- Les caractéristiques mécaniques de traction mesurées sur éprouvettes.
- La dureté Brinell mesurée sous 500 kg avec une bille de 10 mm de diamètre.
- La résistance au cisaillement,
- La limite de fatigue à 10^8 cycles de flexions alternés rotatives,
- Le module d'élasticité, moyenne des modules en traction et en comprissions (le module en compression étant environ 2% plus élevé que le module en traction) [1].

alliage	état	Traction			Dureté Brinell	Cisaillement R_m (MPa)	Fatigue (MPa)	Module d'élasticité (GPa)
		$R_{0.2}$ (MPa)	R_m (MPa)	A (%)				
1050	0	30	80	40	21	55	25	69
	H14	105	115	11	30	71		69
	H18	140	155	6	41	90	55	69
1080	0	25	75	42	19	50		69
	H14	95	105	11	27	64		69
1100	0	35	90	35	22	65	34	69
	H14	115	125	10	33	80	48	69
1200	H18	150	165	5	44	100	62	69
2011	T8	300	380	15	100	234	125	70
2014	T6	420	480	12	137	290	145	73
2017	T4	280	420	18	105	260	135	73
2024	T4	320	465	18	120	285	140	73
2030	T3	390	450	0	115	275	135	73
2618	T6	390	440	9	135	270	140	74
3003	0	45	115	38	28	75	50	69
	H14	140	155	8	42	95	60	69
	H18	190	205	4	55	110	70	69
3004	0	70	180	27	45	110	95	69
	H24	200	240	8	64	125	105	69
	H26	250	285	5	77	145	110	69
3005	0	55	130	30	31	80		69
	H24	165	190	8	50	110		69
3105	0	50	120	30	30	80		69
	H14	155	175	7	46	105		69
	H18	195	220	4	58	117		69
5005	0	40	120	30	28	75		69
	H24	140	160	10	41	96		69
	H28	180	200	5	51	110		69
5050	0	55	145	28	36	105	85	69
	H24	165	190	9	53	125	90	69
	H26	200	220	5	63	140	95	69
5052	0	90	190	28	48	122	110	70
	H24	205	250	12	68	142	125	70
	H28	255	285	5	77	165	140	70
5083	0	160	305	23	70	185		70
5086	0	135	278	25	63	165	108	71
5454	0	110	250	26	62	159		71
	H24	130	300	26	81	180		70
5754	0	100	200	23	50	130	100	70
	H24	215	270	10	68	150		70
6005	T6	260	285	12	90	185	97	70
6060	T5	190	220	16	75	150	72	69.5
6061	0	55	125	25	30	83	60	69.5
	T6	270	305	13	95	205	98	69
6082	T6	280	315	12	95	218	98	69
6106	T5	230	265	13	95	175	84	69.5
7020	T5	320	380	12	120	245	125	69.5
7049	T6	570	650	10				71.5
7075	T6	500	570	11	150	330	160	72

Tableau I.5 : caractéristiques mécaniques typiques des alliages d'aluminium corroyés à la température de 20°C [1].

- **Propriétés élastiques :**

- **Module d'élasticité :**

Il est égal à 66.6 GPa pour l'aluminium pur et augmente en présence d'impuretés et d'additions.

Pour l'aluminium commercialement pur, la valeur de 69 GPa est généralement admise.

Pour les alliages compris entre 69 et 72 GPa; il est particulièrement sensible à la teneur en silicium et passe de 70 à 82 GPa lorsque la teneur augmente de 2 à 18% [2].

- **Module de torsion :**

Il est égal à 25 GPa pour l'aluminium pur titré à 99.9% et à 26 GPa pour l'aluminium commercial.

- **Coefficient de Poisson :**

Il varie de 0.33 à 0.35.

- **Caractéristique mécanique de traction**

Les caractéristiques indiquées dans le *Tableau 5* doivent être considérées comme des valeurs types et non des valeurs garanties. En fait, ces caractéristiques sont susceptibles de varier en fonction de différents facteurs dont les principaux sont les suivants :

a- Les conditions de transformation et de moulage. Par exemple, sur produits filés, il est possible d'obtenir, suivant la nature de l'alliage et les conditions de filage, une texture soit recristallisée soit fibrée, ce qui se traduira par une différence sensible des caractéristiques mécaniques de traction, exemple : alliage 2014

-pour la texture recristallisée ; $R_{0.2} = 350\text{MPa}$, $R_m = 460\text{MPa}$, $A = 18\%$;

-pour la texture fibrée du même alliage $R_{0.2} = 435\text{MPa}$, $R_m = 550\text{MPa}$, $A=10\%$;

b- La sensibilité à la trempe, dans le cas des alliages à durcissement structural ;

c- Les conditions de traitement thermique

d- Les maintiens à chaud : un séjour à une température supérieure à l'ambiante abaisse plus ou moins fortement les caractéristique mécanique mesurées après retour 20 °C.

La figure I.2, permet une comparaison des principaux alliages d'aluminium du point de vue limite d'élasticité et charge de rupture dans le domaine de température compris entre 0 et 370 °C et ceci après 10000 h de maintien...

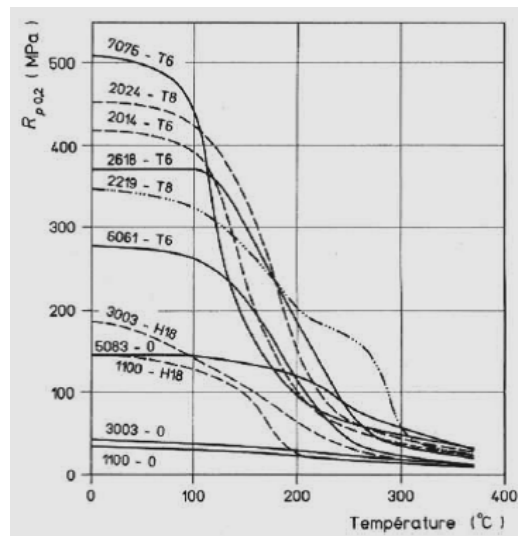


Figure I.2 : Variation de la limite d'élasticité en fonction de la température (Après 10 000 h d'exposition à la température indiquée) [3].

- **Ténacité :**

La ténacité ou résistance statique résiduelle à la propagation d'une fissure est une notion très importante en particulier dans le cas des alliages à haute résistance car elle conditionne la fiabilité et la sécurité des structures.

Le critère ou facteur critique d'intensité des contraintes est le critère actuellement généralisé pour caractériser cette propriété.

Les alliages d'aluminium traditionnels à haute résistance présentent les valeurs indiquées au *tableau I.6* : mesures effectuées dans le sens le plus défavorable, à savoir effort exercé dans le sens longitudinal.

Des variantes de ces nuances, à plus faible teneur en impuretés, sont recommandées lorsqu'on désire une ténacité améliorée sans modification des autres propriétés : cas des nuances 2124 et 7175 pas rapport aux alliages de base respectifs 2014, 2024 et 7075.

Par ailleurs, les nouveaux alliages à haute résistance 7075, 7010 et 7475 à très faibles teneurs en impuretés, de composition spécialement adoptée, présentent des niveaux de encore supérieurs (*Tableau I.7*) [1].

Alliages	
2014-T6	19 à 22
2024-T3	21 à 23
2024-T8	17 à 19
2618-T6	18 à 20
7075-T6	19 à 21
7075-T73	24 à 25

Tableau I.6 : Valeurs de K_t pour les alliages traditionnels.

Alliages	
7010 ou 7050-T76	26 à 28
7010 ou 7050-T73	32 à 35
7475-T6	32 à 36
7475-T7	38 à 44

Tableau I.7 : Valeurs de K_t pour les nouveaux alliages.

- **Résistance à la fatigue :**

Les limites de fatigue types à 10^7 cycles des principaux alliages d'aluminium sont données dans les tableaux 8.21 et 8.22. d'une façon générale, le rapport entre la limite de fatigue à 10^7 cycles, en contraintes alternées, et la charge de rupture en traction –apport d'endurance – est égal à :

a-0.35-0.45 dans le cas des alliages sans durcissement,

b-0.25-0.35 dans le cas des alliages sans durcissement,

Ce rapport diminuant lorsque la charge de rupture augmente.

La *figure I.3* à titre d'exemple dans les cas de l'alliage 7075-T6 sous forme de tôle mince, l'influence de l'effet d'entaille sur la résistance à la fatigue en contraintes alternées ($R=-1$), l'effet d'entaille étant caractérisé pas le coefficient de concentration de contrainte élastique [1].

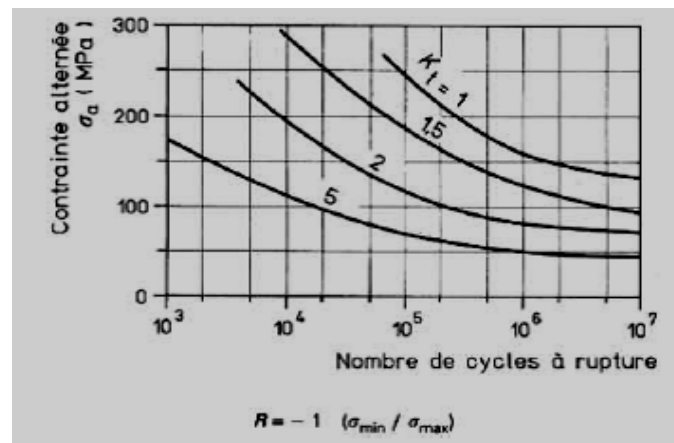


Figure I.3 : Influence du coefficient de concentration de contrainte sur la résistance à la fatigue (contraintes alternées symétriques) pour l'alliage 7075-T6 laminé [4].

- **Relation entre les propriétés mécaniques et la température :**

- **Propriétés mécanique à chaud :**

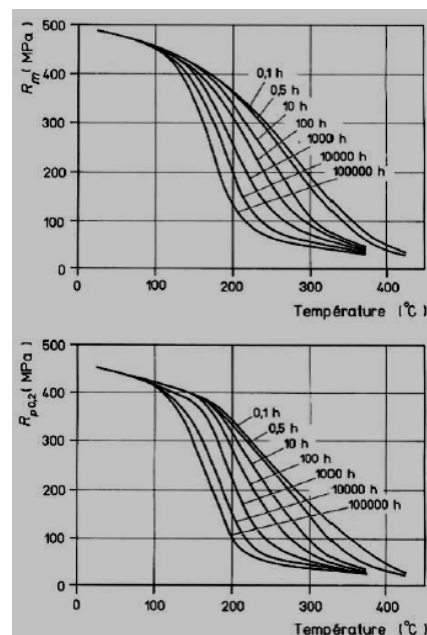
D'une façon générale, les caractéristiques mécaniques à chaud des alliages d'aluminium diminuent lorsque la température augmente. Mais cette diminution dépend de différents facteurs dont les plus importants sont la nature de l'alliage, la durée du maintien à chaud et la température de maintien.

La figure I.4 montre l'évolution de la charge rupture et de la limite d'élasticité en traction d'un certain nombre d'alliages corroyés dans le domaine de températures entre 20 et 370°C, et ceci après 10000 h de préchauffage. Dans le cas d'un tel préchauffage de longue durée, on peut faire la constatation suivante :

- Les alliages de la série 7000 (aluminium-zinc-magnésium-cuivre) ne conservent leurs caractéristiques élevées que jusqu'à 100-110°C, au-delà de ces températures, la chute des propriétés est très rapide.
- Les alliages de la série 2000 présentent le meilleur comportement à chaud dans le domaine de températures comprises entre 100-250°C,
- Les alliages de la série 5000 à l'état recuit ont des caractéristiques relativement stables en fonction de la température, si bien qu'au-delà de 250°C, l'alliage 5083, par exemple supplante tout les autres.

La figure I.4 donne, à titre d'exemple dans le cas de l'alliage 7475, l'influence de la durée du chauffage sur la charge de rupture à chaud.

Figure I.4 : Caractéristiques de traction de l'alliage 2124-T851 en fonction de la température et de la durée de maintien à cette température [4].



➤ **Propriétés mécanique aux basses températures :**

Grâce à leur structure cristalline cubique à faces centrées stables à toutes températures les alliages d'aluminium ne présentent aucun phénomène de fragilisation dans le domaine de basses températures, ceci contrairement aux métaux à structure cubique centrée tels que le fer et certains aciers [1].

I.2.5. Propriétés électriques et magnétiques

- **Résistivité électrique**

L'aluminium conduit très bien l'électricité puisqu'il se place immédiatement après le cuivre dans les métaux communs.

La résistivité électrique généralement admise pour l'aluminium de pureté à titre 99.996% à la température ambiante est de $2.6548 \times 10^{-8} \Omega \cdot m$, soit une conductivité de **64.94%IACS** (international annealed copper standard).

Les impuretés et les éléments d'addition ont une influence plus ou moins importante sur la résistivité : les éléments qui ne sont pas en solution solide ont relativement peu d'influence. Par contre, ceux qui entrent en solution solide peuvent augmenter assez fortement cette propriété. Il en est ainsi pour le manganèse et le titane.

L'aluminium commercial utilisé dans les applications électriques titre généralement 99.7% et présente une résistivité de $2.72 \mu\Omega \cdot cm$ soit 63.5 % IACS la résistivité augmente suivant la température suivant la formule :

$$\rho_t = \rho_{20}[1 + a(t - 20)]$$

Où :

$$\rho_t = \text{résistivité à } t \text{ } ^\circ C$$

$$\rho_{20} = \text{résistivité à } 20 \text{ } ^\circ C$$

α = Coefficient de température égale à 0.00429 pour l'aluminium titré à 99.996 % et qui diminue lorsque le titre de l'aluminium diminue ; ce coefficient atteint 0.004 à pour 99.00%.

La résistivité diminue lorsque la température est basse. Aux très basses températures, la résistivité est essentiellement fonction de la pureté de l'aluminium. A la température de l'hélium liquide (-296 °C), de très faibles variations dans le niveau des impuretés entraînent de très grandes variations de la résistivité.

- **Supraconductivité**

L'aluminium devient supraconducteur près du zéro absolu : la température de transition est alors comprise entre 1.14 et 1.20 K.

- **Susceptibilité magnétique :**

La susceptibilité magnétique est de $0.6 \times 10^{-3} \text{mm}^3/\text{g}$.

Il est important de souligner que cette valeur est peu influencée par la présence d'impuretés même ferromagnétiques telles que le fer. Lorsque le fer varie 0.5 à 0.4%, la susceptibilité magnétique passe de 0.58×10^{-3} à $0.7 \times 10^{-3} \text{mm}^3/\text{g}$. [1]

I.2.6. Résistance à la corrosion

La très bonne tenue à la corrosion de l'aluminium explique le développement de ses nombreuses applications dans le bâtiment, les transports, l'équipement du territoire, la construction navale..., milieu dans les conditions d'emploi qui peuvent être sévères. On dispose maintenant de nombreuses références d'équipements en service depuis plusieurs décennies, et même une référence centenaire avec la toiture de l'église San-Giocolino à Roma, installée en 1898. C'est donc avec un sérieux recul que l'on peut parler de la tenue à la corrosion de l'aluminium.

La tenue à la corrosion est en effet un critère très important dans le choix d'un métal ou d'un alliage, dès lors que celui-ci est soumis à l'action de l'humidité, des intempéries, de l'eau, du milieu marin, d'une atmosphère industrielle,.....

Or elle dépend des paramètres suivants :

- Le métal lui-même : sa composition, son état métallurgique, l'état de surface,..... ;
- Les conditions de service prévues ;

- Le mode d'assemblage éventuel des structures, les dispositions constructives ;
- La durée de service espérée, la fréquence d'entretien.

Il faut souligner qu'il n'y a pas de métal ou d'alliage (universel) en termes de tenue à la corrosion, c'est-à-dire qui serait en mesure de résister à tout les milieux possibles que ce soit des acides, des bases (minéraux ou organiques), dans toutes les atmosphères aussi bien humides que chargées en composés du soufre (SO_2 , H_2S), en poussières

C'est la raison pour laquelle les métallurgistes ont mis au point des alliages spécifiques pour répondre aux exigences particulières de résistance à la corrosion.

Généralement, il y a des différences de tenue à la corrosion entre les alliages du même métal de base. C'est aussi le cas pour les alliages d'aluminium. Il en résulte que, du seul point de vue tenue à la corrosion, ils ne sont toujours pas interchangeables.

C'est volontairement que ce texte se limite à rappeler quelques aspects essentiels de la corrosion de l'aluminium et de ses alliages tels que :

- Le rôle du film d'oxyde naturel ;
 - Les formes de corrosion habituelles que l'on peut observer sur l'aluminium et ces alliages.
- **Rôle du film d'oxyde**

La très bonne tenue à la corrosion de l'aluminium et de ses alliages est due à la présence permanente sur le métal d'un film continu d'oxyde d'aluminium, appelé **alumine** qui le rend **passif** à l'environnement. Ce film se forme dès que le métal est mis au contact d'un milieu oxydant : l'oxygène de l'air, l'eau. C'est ainsi qu'il se reforme instantanément au contact de l'air lors des opérations de mise en forme : pliage, découpage, perçage, et lors du soudage, au cours de soudage, au lors de la solidification du cordon de soudure.

Bien qu'il ait une très faible épaisseur, comprise entre 5 et 10 nanomètres, ce film d'oxyde constitue une barrière entre le métal et le milieu environnant. Sa stabilité physico-chimique a donc une très grande importance sur la résistance à la corrosion de l'aluminium et de ses alliages. Elle dépend, en particulier, des caractéristiques du milieu.

- **les différentes formes de corrosion :**

Il n'y a pas de forme de corrosion spécifique aux alliages d'aluminium. Celles qui peuvent se rencontrer habituellement sont les suivantes :

- La corrosion uniforme ;
- La corrosion par piqûres ;
- La corrosion caverneuse ou sous dépôt ;
- La corrosion feuilletant ;
- La corrosion inter cristalline ;
- La corrosion sous contrainte ;
- La corrosion galvanique [1].

I.3. Désignation des alliages d'aluminium

Les principales nuances normalisées sont divisée en deux grandes familles : les aluminiums corroyés, obtenus par déformation plastique (laminage...) et les aluminiums pour la fonderie. Les compositions et les microstructures des deux familles sont assez différentes et chacune se divise en deux groupes : ceux pouvant être traités thermiquement et ceux ne pouvant pas être traités ou non trempant. [6]

I.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 fini de surface avec des surfaces lustrées et peu ou pas de défauts [7].

- **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.8* [6].

Séries d'alliages	Éléments 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.8 : de classification d'alliages d'aluminium de fonderie [6].

I.3.2. Désignation des 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.9*).

Série	Désignation	Elément 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	-

Tableau I.9 : de désignation des alliages d'aluminium corroyés [6].

- **Désignation du traitement :**

-Etat brut de fabrication : cette désignation est d'application les produits n'ayant subi aucun contrôle spécial en ce qui concerne les conditions thermiques ou durcissement, on symbolisé cette état par la lettre **F**.

- état recuit : D'application pour les produits ayant subi un traitement thermique ce qui donne les produits de résistance les plus faibles afin d'améliorer la ductilité et la stabilité dimensionnelle, symbolisé par la lettre **O**.

-Etat durci par écrouissage : D'application pour les produits écrouis par déformation à froid qui peut être suivie d'un traitement thermique ce qui diminue la résistance en partie. La lettre H est toujours suivie de deux chiffres (voir *tableau I.10*), ce type de traitement symbolisé par la lettre **H**.

Le premier chiffre après H désigne traitement de base	
H1-uniquement écroui	H3-écroui et stabilisé
H2-écroui et partiellement recuit	H4-écroui et verni ou laqué
Le deuxième chiffre après H désigne le degré d'écrouissage	
HX2 -1/4 dur	HX8 - 4/4 dur
HX4 -1/2 dur	HX9 -extra dur
HX6 -3/4 dur	

Tableau I.10 : Subdivision de H- écrouissage [6]

-Etat traité après mise en solution : état instable qui n'est appliqué que sur des alliages qui vieillissent spontanément à température ambiante. Ce type de traitement symbolisé par **W**.

-Etat traité thermiquement : Afin d'avoir un état stable après recuit (autre que F, O et H). D'application pour des produits traités thermiquement, parfois avec un écrouissage supplémentaire, afin d'avoir un produit, ce type de traitement symbolisé par **T**, La lettre T est toujours suivie de deux chiffres (voir *tableaux I.11 et I.12*) [6].

Traitement	Signification
T1	Refroidi après transformation à chaud et mûri
T2	Refroidi après transformation à chaud, écroui et mûri
T3	Mis en solution, écroui et mûri
T4	Mis en solution et mûri
T5	Refroidi après transformation à chaud puis revenu
T6	Mis en solution puis revenu
T7	Mis en solution puis sur-revenu
T8	Mis en solution, écroui puis revenu
T9	Mis en solution, revenu puis écroui
T10	Ecroui après refroidissement et transformation à chaud et mûri
Des chiffres complémentaires indiquent que des traitements ont été appliqués (diminution des tensions propres	
TX51 ou TXX51	Diminution des tensions par détensionnement par traction
TX52 ou TXX52	Diminution des tensions par détensionnement par compression

Tableau I.11: subdivision de T-traitement thermiques [6].

Traitement	Mise en solution	Transformation à chaud	écrouissage	Vieillessement naturel	Vieillessement artificiel	écrouissage
T1		X		X		
T2		X	X	X		
T3	X		X	X		
T4	X			X		
T5		X			X	
T6	X				X	
T7	X				X*	
T8	X				X	
T9					X	X
T10		X	X		X	

Tableau I.12: subdivision de T-traitement thermique dans l'ordre chronologique [6].

I.4. Base de la métallurgie de l'aluminium et de ces alliages

I.4.1. Influence des éléments d'addition

L'aluminium non allié ayant des propriétés mécaniques faibles souvent insuffisantes pour l'utilisation, on est conduit pour améliorer ces propriétés, à ajouter des éléments qui

modifient plus ou moins profondément la microstructure du métal. Les atomes de ces éléments peuvent être en solution solide de substitution, c'est-à-dire prendre la place des atomes d'aluminium dans le réseau : plus petits (cas du cuivre), ou plus gros (cas du magnésium) que l'atome d'aluminium, ils perturbent le réseau qui devient ainsi plus difficile à déformer.

Les atomes de ces éléments peuvent également former des **précipités hors solution solide** : cohérent, semi-cohérent ou cohérent avec la matrice aluminium, qui auront le même effet, à savoir provoquer des déformations. Le **durcissement** de l'aluminium sera ainsi d'autre conséquent que le nombre et l'importance de ces perturbations seront plus grands : la nature, la teneur, la répartition de ces éléments d'addition sont primordiales à cet égard.

On réalise ainsi des alliages industriels de composition plus ou moins complexe. Cependant, on peut considérer que ces alliages comportent une ou plusieurs additions principales et des additions secondaires.

➤ **Addition principale :**

Les additions principales sont déterminantes pour les différentes propriétés métallurgiques et technologiques ; elles conditionnent de plus l'appartenance aux différents groupes d'alliages définis précédemment. Ces additions sont en fait peu nombreuses ; il s'agit du cuivre, du silicium, du magnésium, du manganèse, et des associations magnésium + silicium, zinc + magnésium et zinc +magnésium + cuivre.

➤ **Addition secondaire :**

Ce sont différents métaux rajoutés dans certains alliages, souvent en quantité plus faible (moins de 1%), pour obtenir une propriété particulière mais sans changer le groupe d'appartenance. Les principaux métaux sont :

Le fer, le chrome, le zirconium, le nickel, le strontium, le cobalt, le plomb, le bismuth, le cadmium, le titane, le béryllium, le bore [1].

I.4.2. Durcissement par écrouissage

De même que pour bon nombre de métaux, l'écrouissage de l'aluminium ou d'un alliage d'aluminium a pour effet d'augmenter sa dureté et sa résistance mécanique -limite d'élasticité et charge de rupture-, mais, en contrepartie, de diminuer sa plasticité, c'est-à-dire son allongement à la déformation.

L'aluminium et les alliages d'aluminium à l'état écroui sont très utilisés dans de nombreuses applications industrielles, lorsque l'on recherche des bonnes propriétés mécaniques et lorsque l'on n'est pas gêné technologiquement par la relative plasticité de ces états ; rappelons que ces états écrouis sont désignés par les symboles H1X [4].

I.4.3. Traitements thermiques d'adoucissement par restauration ou recuit

- Différents types de traitements de restauration

Les traitements de restauration correspondent à un perfectionnement du réseau du métal écroui. Ce perfectionnement est d'autant plus important qu'il est effectué à une température inférieure à celle du seuil de recristallisation. Par ailleurs, la *figure I.5* a montré que, pour un alliage donné, il était essentiellement fonction de la température et de la durée du traitement.

Dans la pratique industrielle, deux types de traitements sont essentiellement utilisés pour obtenir les états restaurés, à savoir :

- Les traitements de courte durée (quelques minutes) généralement effectués dans des fours à passage: ces traitements consistent alors en des chauffages rapides à température relativement voisine de celle de la recristallisation, avec tolérances faibles de temps et de température ;
- Les traitements de longue durée (quelques heures) consistant en un chauffage à température plus basse que précédemment, mais avec des tolérances assez grandes de temps [8].

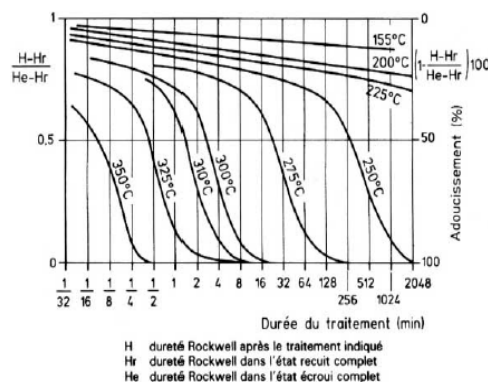


Figure I.5 – Courbes isothermes d'adoucissement de l'alliage 5754 [8].

- **Les avantages des traitements de restauration**

Les traitements de restauration présentent plusieurs avantages essentiels :

- au cours de la restauration, il n'y a pas, par définition, de recristallisation et, par conséquent, les risques de recristallisation grossière sont inexistantes, ce qui est d'un intérêt essentiel pour les mises en forme ultérieures ;
- à égalité de résistance mécanique, la plasticité est meilleure sur métal restauré que sur métal écroui [8].

- **Inconvénients éventuels des traitements de restauration**

Les traitements de restauration présentent deux caractères qui peuvent parfois se révéler gênants :

- ils ne permettent pas des adoucissements beaucoup supérieurs à 40 % ou, dans les cas les plus favorables, à 50 %, ce qui exclut d'obtenir toutes les qualités à partir d'une seule nuance écrouie ;
- ils ne changent pas la texture d'orientation du produit (l'orientation préférentielle de l'état écroui étant conservée : ce qui, en fait, n'est pas toujours désavantageux, mais ne permet pas de régler l'isotropie lors du traitement final comme le font certains transformateurs d'alliages d'aluminium. Ce caractère cesse d'ailleurs d'être un inconvénient s'il est possible d'obtenir l'isotropie au moyen d'un recuit intermédiaire bien réglé. Par ailleurs, il peut également être possible de compenser l'orientation d'écrouissage en opérant un début de recristallisation : on fait alors coexister les deux phénomènes de restauration et de recristallisation, mais de tels traitements sont relativement délicats d'exécution industrielle [8].

I.4.4. Traitement de durcissement structural

- **Différents stades du traitement de durcissement structural :**

L'aluminium est capable de former des solutions solides avec la plupart des métaux qui lui sont associés comme constituants d'alliage. La possibilité de traiter thermiquement un alliage est due à l'augmentation, avec la température, de la solubilité à l'état solide des éléments d'addition. Autrement dit, pour qu'un alliage soit traitable thermiquement, il y a lieu que l'un au moins des constituants donne avec l'aluminium un diagramme d'équilibre binaire du type de celui de la *figure I.6* qui représente le cas de la solubilité du cuivre dans l'aluminium.

Le traitement thermique dit de durcissement structural comporte trois grands stades :

- mise en solution solide : chauffage à température élevée (400 à 600 °C suivant les alliages considérés). Dans le cas de l'alliage

Al-4 % Cu par exemple, il a pour but théorique la mise en solution dans l'aluminium à l'état solide des 4 % de cuivre. D'après le diagramme d'équilibre binaire (*figure I.6*), la température minimale de mise en solution est de 500 °C. Il faut en effet atteindre le point F sur la courbe AG traduisant la limite de solubilité, à l'état solide, du cuivre dans l'aluminium en fonction de la température ;

- refroidissement : si maintenant l'alliage est refroidi assez lentement pour qu'à chaque température l'équilibre ait le temps de s'établir, il va y avoir séparation en deux phases dès que la température passera au-dessous de 500°C : c'est la précipitation.

Comme la solubilité du cuivre dans l'aluminium diminue avec la température, la quantité de précipités va augmenter lorsque la température va diminuer.

Cependant, si au lieu de refroidir lentement la solution homogène, on l'amène brusquement à la température ambiante par trempe, la précipitation n'a pas en général le temps de se former durant le refroidissement.

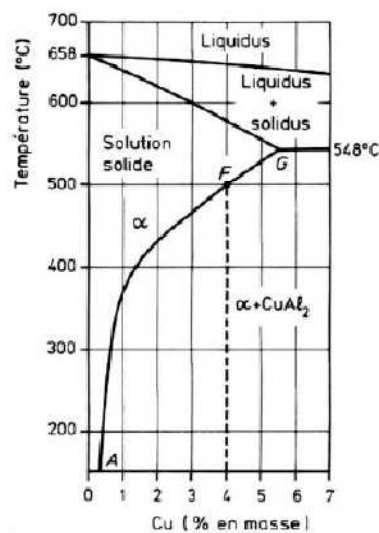


Figure I.6 : Diagramme d'équilibre aluminium-cuivre [8].

On peut ainsi obtenir, à la température ambiante, la solution solide homogène qui était stable au dessus de 500 °C, mais qui se trouve alors sursaturée ;

- durcissement structural proprement dit : cette solution solide, qui se trouve à l'état métastable, va avoir tendance à retrouver l'équilibre en rejetant sous forme de précipité une partie du cuivre qui est en sursaturation : c'est ce phénomène qui est responsable du durcissement structural par maturation à la température ambiante. Toutefois, ce retour à l'équilibre de la solution solide sursaturée peut être très lent à la température ambiante par suite des faibles vitesses de réaction : cette évolution peut être accélérée par des maintiens à température supérieure, qui constituent les traitements de revenu et qui se traduisent généralement par un durcissement plus important de l'alliage.

- **Durcissement par précipitation des alliages d'aluminium :**

Lorsqu'ils sont maintenus à des températures inférieures à 250 °C, après passage à haute température (450 °C ou plus), certains alliages d'aluminium voient croître leur résistance mécanique (*figure I.7*). La découverte de ce phénomène de durcissement structural par vieillissement des alliages légers par Wilm [9] en 1906 devait conduire au développement du premier alliage industriel, le Duralumin.

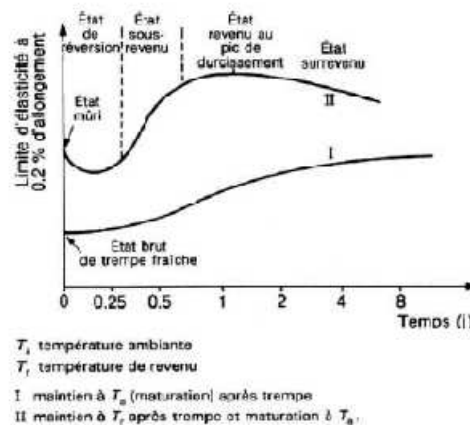


Figure I.7 – Évolution schématique de la limite d'élasticité d'un alliage d'aluminium à durcissement structural [9].

- **Séquence de précipitation dans les alliages d'aluminium trempant :**

Pour des raisons d'ordre thermodynamique et cinétique, on retient que la solution solide sursaturée par la mise en solution suivie d'une trempe ne donne presque jamais lieu directement à la précipitation de la phase intermétallique d'équilibre stable. Le durcissement des alliages à température ambiante puis au cours de revenu résulte généralement d'une

décomposition séquentielle de la solution solide α et d'un appauvrissement progressif en soluté de cette dernière suivant les étapes schématiques (figure I.8) [9]:

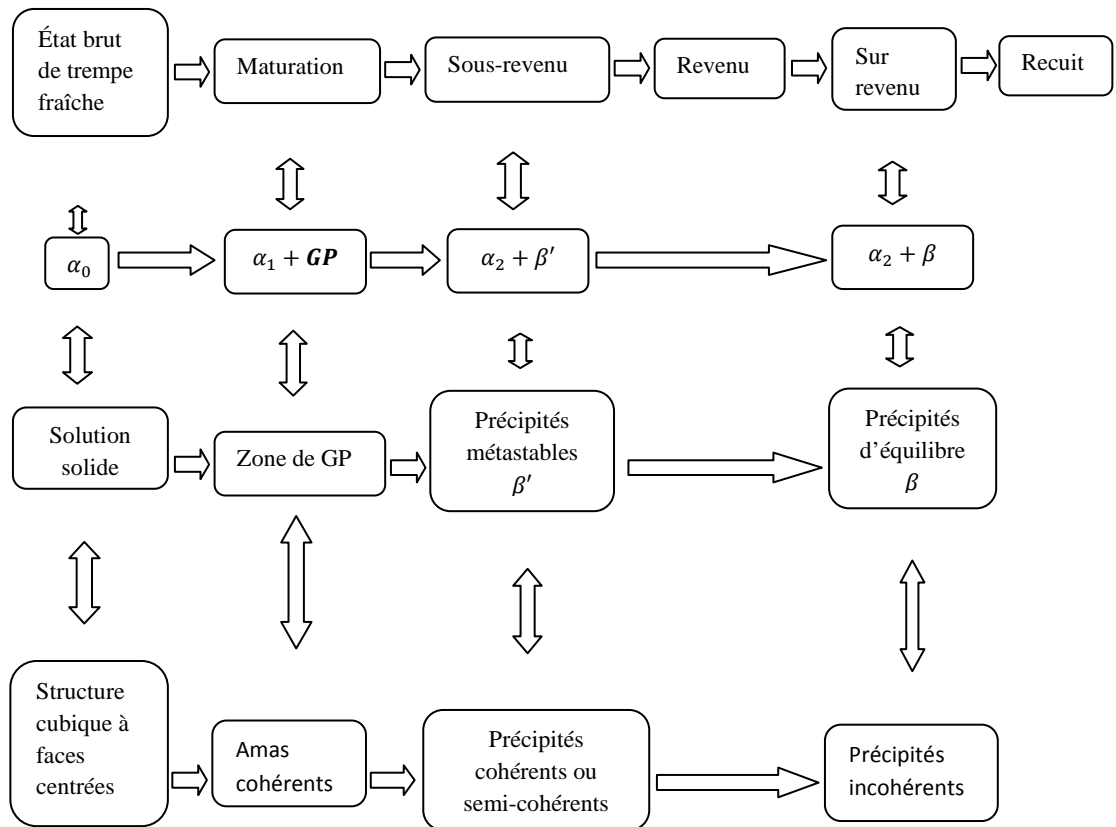


Figure I.8 : Appauvrissement de la phase principale (solution solide) en soluté [9].

I.5. Application de l'aluminium et de ses alliages

Le tableau I.13 donne les grands domaines d'utilisation de l'aluminium dans les pays gros consommateurs. On constate que le domaine des transports a une place privilégiée et arrive au premier rang en Europe, et particulièrement en France. Des différences très sensibles apparaissent par ailleurs dans les autres secteurs : c'est ainsi que les utilisations dans le domaine de la construction électrique ont une place importante en France, que celles concernant le bâtiment sont au tout premier plan au Japon, alors qu'elles sont moins développées en France, et enfin que les applications dans l'emballage dominent aux USA grâce à l'essor des boîtes boissons [1].

	France	Europe	USA	Japon
Transports	33	26	22	29
Electricité	16	10	10	7
Bâtiment	12	21	22	32
Emballage	10	11	29	8

Tableau I.13 : utilisation de l'aluminium (en%) dans les principaux pays consommateurs [1].

I.5.1. 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.

- **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.

- **Transports ferroviaires et routiers :**

Dans les matériels ferroviaires, l'allègement dû à l'emploi de l'aluminium est d'autant plus intéressant que la fréquence des arrêts est plus importante ou que le tracé des lignes est plus accidenté. C'est pourquoi les voitures plus récentes du métro de paris, celles des métros de Lyon, Marseille, Lille, les remorques d'autorail des lignes du Massif central – pour ne parler que de la France- sont entièrement en aluminium : structure intégrée à partir de larges profilés en alliages 6005, 6061 ou 6082, alliages dont la soudabilité permet une fabrication aisée.

- **Transports maritimes**

Grace à sa bonne résistance-sans protection- en milieu marin, eau de mer ou atmosphère marine, l'aluminium reçoit depuis 1945 un développement ininterrompu dans les fabrications suivantes :

- Bateaux de plaisance ;
- Bateaux de course transatlantique ;
- Bateaux de pêche ;
- Bateaux de service

Les produits utilisés sont principalement :

- ✓ Les tôles pour la réalisation de la coque, en alliages de série 5000 : nuances 5454, 5754, 5083, 5086 ;
- ✓ Les profilés pour la fabrication des mâts, des renforts de la coque, en alliages de la série 6000 : nuances 6005, 6060, 6061, 6082 ;
- ✓ Les pièces moulées pour les pièces d'alliage, en alliages 42000 (A-S7G) 44000 (A-S13) ; 51000 (A-G3T) et 41000(A-S2GT)

- **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.

I.5.2. Aluminium dans l'industrie électrique et électronique

L'aluminium s'est solidement implanté dans le domaine des conducteurs électriques. Les premières réalisations en France datent de 1895 – première ligne électrique de 2.5 km de long en aluminium pur, et 1916 le premier câble mixte aluminium-acier. Actuellement, en France, la totalité des lignes de transport d'énergie électrique à haut et moyenne tension, ainsi que la majeure partie des lignes de basse tension des isolés de moyenne tension, des barres de connexion sont en aluminium.

De nouveaux marchés s'ouvrent à ce métal : les fils d'installation domestique, les câbles souples, les files isolés de bobinage ...

Les nuances utilisées sont les suivantes :

- L'aluminium non allié 1350 et 1370 ;
- L'alliage 1340 pour les fils fins émaillés pour bobinage ;
- L'alliage 1310 pour les fils fins destinés aux câbles souples ;
- Les alliages – dénomination commerciale **Almelec**, utilisé sous forme de fils à l'état trempé, écroui, revenu-restauré, permettant de réaliser des câbles à haute résistance en remplacement des câbles aluminium-acier.

Une nuance spéciale d'alliage 6101 est commercialisée depuis 1985, **Almeco** pour les fils d'installation domestique conçue pour donner des fils dont les caractéristiques mécaniques permettent une installation facile : plage, tirage, dans les conduits, montage dans les appareillages.

De plus, la présence de nickel sur toute la surface empêche la formation d'oxyde et donne ainsi à l'utilisation l'assurance de contacts électriques de qualité et stables dans le temps.

L'aluminium raffiné est utilisé avec une pureté de 99.98% à 99.99% pour la fabrication des condensateurs électrolytiques. Un nouveau champ d'application apparaît pour les circuits intégrés avec une nuance ultra-pure : 99.995-99.9995%, dont les teneurs en uranium et thorium sont inférieures à 100 parties par million ; la limitation des teneurs en ces éléments étant pour éviter les erreurs de logiciels dans les mémoires de haute capacité.

I.5.3. Aluminium dans le bâtiment et l'architecture

Dans ce domaine, l'aluminium est présent sous forme de produits laminés, filés, moulés. Du fait de la richesse des coloris et des tons qu'il est possible d'obtenir par les procédés d'anodisation et de thermolaquage, l'aluminium offre une multitude de possibilités favorisant son insertion dans un milieu architectural donné.

Parmi les nombreuses et diverses applications, il est intéressant de citer :

- Les panneaux de façade et murs-rideaux qui sont une des applications les plus spectaculaires dans le bâtiment : aérogare d'Orly, Maison de la Radio, tour Maine-Montparnasse, tour modernes de la Défense ... ;
- Les couvertures : bacs autoportants, en alliages 1050, 3003...., pour les toits à faible pente, les bâtiments à usage industriel ou administratif ... ;
- La menuiserie métallique constituée de profilés en alliage 6060 anodisés, très utilisés pour les fenêtres, les châssis coulissants, les portes et devantures de magasins, les verrières et vérandas. Rappelons qu'en France, en 1985, sur les 4500000 fenêtres

fabriquées, un tiers était en aluminium. De même sur les 60 000 vérandas installées chaque année, 80% sont en aluminium ;

- Les balcons et leurs garde-corps : alliages 6005, 6106... [1]

I.5.4. 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 [1].

CHAPITRE II : Soudage, procédés et caractéristiques physiques et métallurgiques.

II.1 Introduction

A titre d'introduction, et pour éviter tout malentendu, il est utile de rappeler les définitions des termes qui apparaissent dans le titre de ce texte. Pour ce faire, on peut se référer au document intitulé « Termes et définitions utilisés en soudage et techniques connexes » édité par les Publications de la Soudure Autogène et le Conseil International de la Langue Française.

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

Soudabilité : On voit apparaître la notion fondamentale de « continuité de la nature des matériaux assemblés » et plus particulièrement de « continuité métallique ». Cette exigence implique la mise en jeu, entre les éléments à assembler, de forces de liaison interatomiques de type métallique (pour les métaux). L'intervention de ces dernières exige l'absence de tout corps étranger susceptible de constituer une barrière à leur action. Ces considérations permettent déjà de noter que :

- L'identité chimique des métaux assemblés n'est pas fondamentalement nécessaire ;
- Les techniques d'assemblage mécaniques (rivetage, boulonnage, agrafage...) ou par adhésion (collage) ne répondent pas à la définition du soudage [10].

II.2 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.

II.2.1 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. [11]

II.2.2. Elimination 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...).
- Eléments 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. [11]

II.3. Caractéristiques et classification des procédés de soudage

On peut classer les procédés de soudage suivant la façon dont ils répondent aux exigences suivantes : comporter une source d'énergie permettant d'unir par fusion ou pression ; pouvoir éliminer la contamination superficielle des faces à unir ; éviter la contamination atmosphérique ou ses effets et, avoir le contrôle métallurgique de la soudure. L'énergie est presque toujours fournie sous forme de chaleur de la sorte que le classement peut être fait suivant les méthodes par lesquelles la chaleur est produite localement. Ces méthodes peuvent être définies et groupées comme suit :

- a) Mécanique : la chaleur est produite par choc ou par frottement, ou libérée par déformation élastique ou plastique du métal.
- b) Thermomécanique : des réactions exothermiques, des flammes et des plasmas d'arc fournissent de la chaleur.
- c) A résistance électrique : la chaleur est fournie soit par le passage d'un courant introduit directement dans le métal à souder, soit par un courant induit dans le métal de base.
- d) A arc électrique : les arcs en courant alternatif ou continu, à l'électrode fusible ou réfractaire entre dans cette catégorie.
- e) A radiation : la caractéristique essentielle de ce procédé est que l'énergie est focalisée sur la pièce en engendrant de la chaleur seulement à l'emplacement où le rayon est intercepté. Cette catégorie regroupe les procédés récents comme le laser et le soudage par bombardement électronique ainsi que les procédés qui peuvent être prochainement mis au point dans ce domaine [13].

On peut résumer les procédés de soudage dans *la figure II.1*.

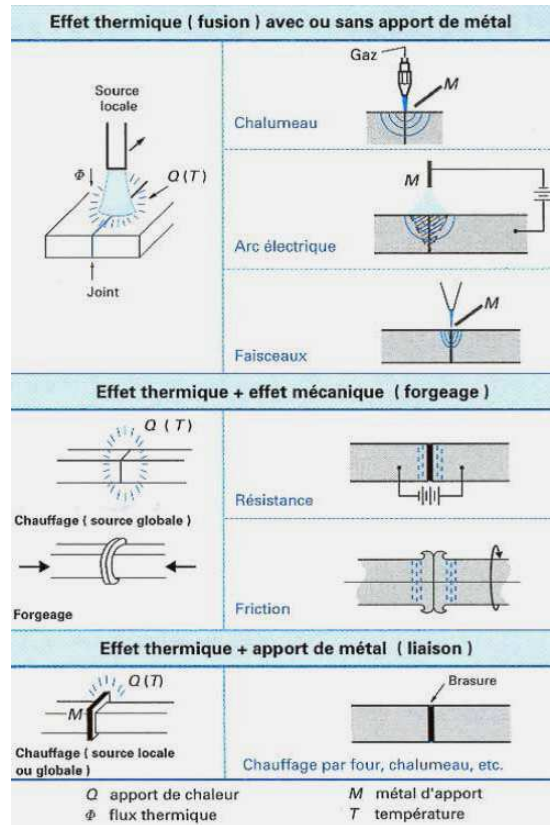


Figure II.1 – Schémas de principe des différents procédés [13].

Dans le cadre de ce travail on s'intéresse au procédé de soudage à l'arc électrique.

II.4. Procède de soudage à l'arc électrique

II.4.1. Propriétés de l'arc de soudage

Un arc est une décharge électrique établie et entretenue dans un gaz entre deux électrodes reliées aux pôles d'un générateur et dégageant lumière et chaleur ; il forme une colonne ionisée conductrice qui répond à des lois physiques essentiellement :

- électriques, reliant tension et courant, auxquelles se rattachent les caractéristiques et le fonctionnement des générateurs ;
- thermiques auxquelles se rattachent les phénomènes de fusion.

L'arc électrique est la source de chaleur à la base d'un certain nombre de procédés de soudage s'appuyant sur :

— ses effets thermiques aux électrodes : l'arc de soudage est un arc court entre une électrode, formant l'outil, et les pièces à souder portées localement à la température de fusion;

— les phénomènes de transfert de métal qui s'instaurent naturellement et simultanément de l'électrode, lorsqu'elle est fusible, à la pièce, formant un dépôt continu se diluant avec les bords à souder pour constituer après refroidissement la liaison métallique recherchée. Dans les procédés où l'électrode est réfractaire, il n'y a évidemment pas de transfert de métal électrode-pièce.

1. Propriétés électriques

Lorsqu'un arc est amorcé et entretenu entre deux électrodes placées en regard, ou plus précisément entre une électrode et une pièce métallique reliées aux bornes d'un générateur approprié, on constate que le circuit est traversé par un courant I et qu'il apparaît aux bornes une tension U .

U_2 et I_2 ne sont pas indépendants et il existe entre eux une relation $U_2 = f(I_2, \ell, \dots)$ représentée par un réseau de courbes appelé caractéristiques d'arc (*figure II.2*). Cette relation n'est pas simple car de nombreuses variables y figurent parmi lesquelles, pour s'en tenir aux plus significatives : la nature de l'atmosphère gazeuse siège de l'ionisation, la nature, la forme et la distance des électrodes, le pouvoir émissif de la cathode, etc. Compte tenu de la diversité des situations rencontrées dans la pratique, il n'est possible de tracer ces courbes représentatives que dans des cas particuliers où les conditions sont connues.

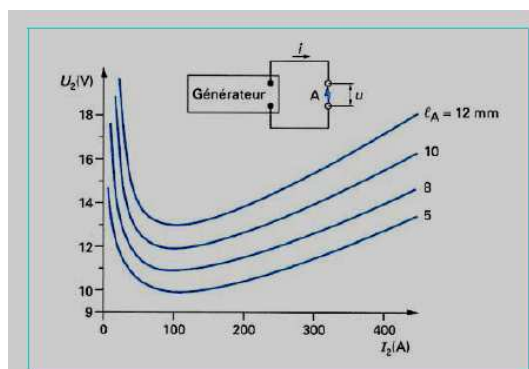


Figure II.2—Caractéristiques d'arc pour différentes de la longueur ℓ [14]

a) Courant :

Pour une longueur d'arc ℓ donnée, on augmente le courant en agissant sur la force électromotrice du générateur. Dans le même temps, la tension aux bornes de l'arc s'accroît ainsi que la puissance totale $U I$ engendrée. Les lois physiques sont telles que la température et le volume ionisé augmentent dans le même temps (*figure II.3*). C'est donc en agissant sur le courant que l'on règle la puissance de l'arc en soudage.

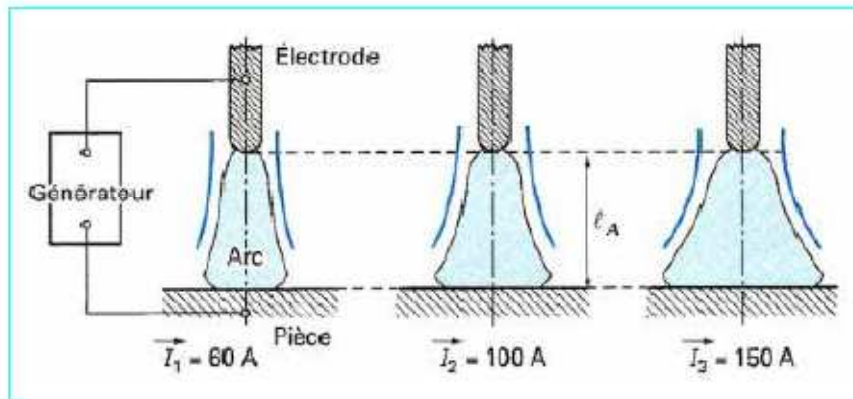


Figure II.3—Effet du courant sur l'arc [14].

b) Tension :

Pour un gaz donné (*tableau II.1*), la tension qui apparaît aux électrodes résulte de la distance qui les sépare et du courant qui le traverse. Elle traduit l'existence le long de la colonne ionisée des trois chutes de potentiel suivantes (*figure II.4*) : chute anodique, chute cathodique et chute dans la colonne.

Les deux premières sont liées aux phénomènes électroniques prenant place à la surface des électrodes. Elles occupent une épaisseur négligeable, mais l'existence de l'arc en dépend, car elles déterminent une valeur de sa tension au-dessous de laquelle il n'y a pas de fonctionnement possible. La troisième s'étend donc pratiquement d'une électrode à l'autre et donne lieu à un gradient électrique uniforme. Lorsque la longueur d'arc augmente, la tension augmente également de façon proportionnelle. La mesure de la tension donne par suite une information sur sa longueur.

Vapeurs métalliques			
Al	5,986	K	4,341
B	8,298	Li	5,392
Ba	5,212	Mg	7,646
C	11,260	Mo	7,099
Ca	6,113	Na	5,139
Co	7,86	Ni	7,635
Cr	6,766	Si	8,151
Cs	3,894	Ti	6,82
Cu	7,726	W	7,98
Fe	7,870		
Gaz			
Ar	15,760	CO ₂	13,77
He	24,587	H ₂	13,598
O ₂	12,07	N ₂	15,58

Tableau II.1 – Potentiels d'ionisation (en volts) de vapeur métallique [14]

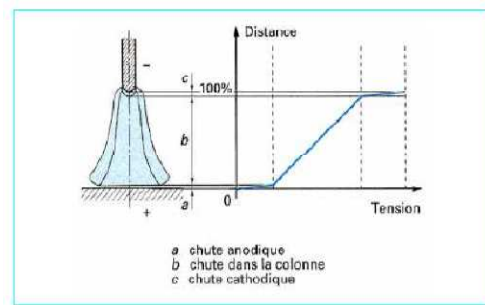


Figure II.4–Répartition du potentiel le long de l'axe principal [14]

c) Puissance :

Le produit UI (valeurs instantanées) donne à chaque instant la puissance p instantanée dissipée dans l'arc. Il est important de rappeler qu'un arc électrique ne répond pas à la loi de Joule de forme RI^2 .

On retiendra simplement les quelques règles suivantes :

- pour une distance fixe entre électrodes, la tension d'arc est une fonction croissante du courant ;
- pour un courant donné, la tension est une fonction croissante de la distance entre électrodes ;
- la puissance dissipée passe par un maximum en fonction de la distance ;
- toutes choses égales par ailleurs, la tension d'arc est en relation avec le ou les potentiels d'ionisation du ou des gaz où l'arc est établi. Ainsi, pour un même courant, à un gaz au potentiel d'ionisation élevé correspond une tension d'arc élevée et par suite une puissance élevée.

2. Propriétés thermiques :

a) Répartition de la chaleur :

La puissance p dissipée dans l'arc se transforme en quantité de chaleur Q par unité de temps qui se répartit en trois ($Q_T = Q_1 + Q_2 + Q_3$) :

Q_1 et Q_2 absorbées respectivement par l'électrode et par les pièces et servant seules au soudage,

Q_3 rayonnée et perdue dans l'espace environnant. Le rendement η est égal à $(Q_1 + Q_2)/Q_T$. La répartition de l'énergie Q_T selon Q_1 , Q_2 et Q_3 dépend, ainsi que l'indique de façon schématique la figure II.5, de la longueur d'arc et du courant. Pour un même courant, lorsque l'on écarte les électrodes, la puissance de l'arc et par suite Q_T croît. Mais Q_3 croît plus rapidement et le rendement η de l'arc diminue.

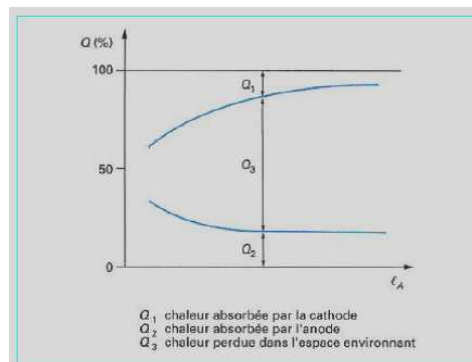


Figure II.5—Allure de la répartition de la chaleur dans l'arc, pour un courant donné en fonction de la longueur d'arc [14]

b) Transfert de métal :

Lorsque l'électrode est fusible et quelle que soit sa polarité, s'installe dans l'arc le phénomène naturel de transfert de métal par lequel l'extrémité de l'électrode en fusion se projette à grande vitesse (10^5 mm/s) sur le joint à souder. C'est un phénomène fondamental auquel les procédés de soudage à l'arc doivent leur existence. Il provient :

- des effets de pincement électrodynamique du courant, lequel agit par son carré (indépendance de la polarité), sur le métal liquide de l'extrémité de l'électrode en y formant des gouttes ou en le vaporisant car la densité de courant s'élève considérablement ;
- des effets de répulsion qui s'ensuivent (indépendance de la gravité). On distingue dans la pratique trois modes de transfert de métal qui apparaissent en fonction de la densité du courant et de la viscosité du métal de l'électrode (figure II.6).
- le transfert par gouttes isolées ou globulaire (drop), transfert discontinu ;
- le transfert par fines gouttelettes (transition), transfert continu ;
- le transfert par pulvérisation (spray), transfert continu. Tronc commun [14].

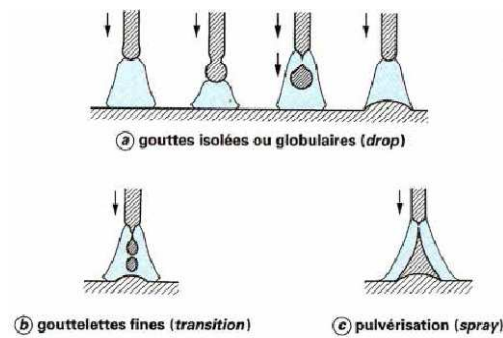


Figure II.6–Différents types de transfert de métal [14].

II.4.2. Formation de la soudure

L'arc est donc la source de chaleur extérieure produisant, localement sur la pièce et indépendamment du transfert de métal, un flux de chaleur d'allure globalement gaussienne et de valeur suffisante pour obtenir un gradient conduisant à la fusion et à la formation du cordon de soudure.

Le flux thermique moyen d'un arc de soudage est de l'ordre de 5 à 100 W/cm². Le gradient de température qui en résulte ne produit pas de pénétration importante ; celle-ci est en effet du même ordre que la largeur de la zone fondue qui apparaît au départ sous la forme d'un bain de soudure (welding pool) se creusant par suite d'effets divers (capillarité, souffle gazeux). La figure II.7 donne une idée de l'allure des isothermes formées par l'arc à l'arrêt et en déplacement. Comme dans tous les procédés de soudage par fusion, chaque point du cordon a connu une séquence

échauffement/fusion/refroidissement à laquelle se rapporte la métallurgie locale de la soudure et les caractéristiques mécaniques finalement obtenues.

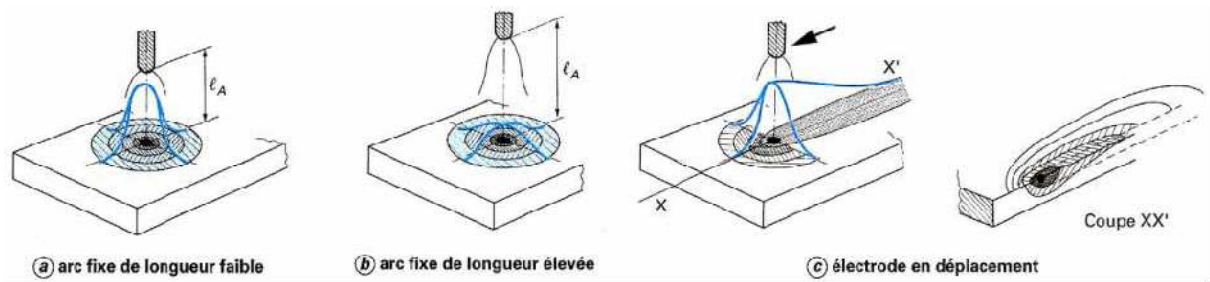


Figure II.7–Répartition de l'énergie sur la pièce [14].

L'apport de métal, par fusion naturelle de l'électrode ou effectué séparément, a pour effet de combler la dépression du bain et de former un cordon bombé de morphologie particulièrement favorable (figure II.7). Lorsque les épaisseurs à souder sont supérieures à la pénétration naturelle, la soudure à l'arc est alors appropriée au soudage par remplissage, au moyen de passes multiples superposées ou par un balayage transversal, d'un chanfrein pratiqué sur les bords à souder ou formé naturellement lors d'un soudage d'angle (soudure en L ou en T). La notion de pénétration disparaît lors du soudage par passes multiples car on peut ainsi réaliser, malgré le faible pouvoir pénétrant des arcs de soudage, des soudures liant les pièces sur la totalité de leur épaisseur. La liaison métallique est obtenue par l'intermédiaire du métal provenant de l'électrode, ou métal déposé, et par l'intermédiaire également des deux zones attenantes, plus ou moins importantes, dans lesquelles le métal de l'électrode s'est dilué dans le métal de base. La figure II.8 illustre les différents types de soudures formés par soudage à l'arc [14].

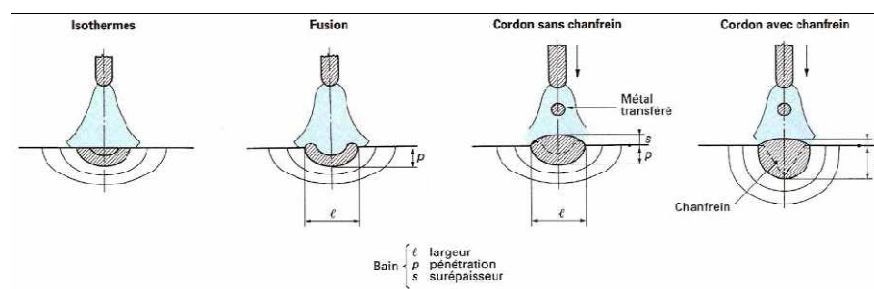


Figure II.8 – Formation de la soudure : isothermes, fusion, cordon avec ou sans chanfrein. [14]

II.4.3. Principaux procédés de soudage à l'arc

Différents procédés de soudage sont fondés sur les phénomènes précédents. Ils se caractérisent chacun par deux éléments essentiels :

- la nature de l'électrode : baguette, fil fusible ou tige réfractaire ;
- la nature du milieu, gaz ou vapeurs, dans lequel s'établit la décharge électrique et qui doit avoir des propriétés protectrices vis-à-vis de l'atmosphère ambiante.

On distingue ainsi :

- le soudage à l'électrode enrobée (ou baguette), se conduisant à la main et appelé également soudage manuel ;
- le soudage sous flux en poudre, utilisant comme électrode un fil métallique fusible se déroulant de façon continue. Le flux assure la protection du bain ;
- les soudages semi-automatique et automatique sous gaz. L'électrode est également un fil fusible, et la protection est réalisée par un gaz inerte (soudage MIG) ou actif (soudage MAG) ;
- le soudage à électrode de tungstène non fusible (TIG). La protection est réalisée par un gaz nécessairement inerte. L'apport de métal, facultatif, s'effectue indépendamment.

Chacun d'eux fera l'objet d'un paragraphe particulier. Il existe en outre des procédés dérivés des précédents dont les plus importants sont : le soudage au plasma, le soudage au fil fourré, le soudage des fortes épaisseurs, le soudage à l'arc tournant et le soudage des goujons, qui feront l'objet d'un paragraphe séparé. Le tableau 2 synthétise les principales caractéristiques des différents procédés permettant de faire un choix rapide et grossier entre les quatre grands procédés de soudage à l'arc [14].

Pour le cas de la soudure des alliages d'aluminium on utilise le procédé TIG.

II.4.4. Description du procédé TIG

II.4.4.1. Méthode

Le soudage TIG ou GTAW (Gas Tungsten Inert Arc Welding) est un procédé de soudage à l'arc dans lequel l'arc éclate entre la pièce à souder et une électrode de tungstène infusible au sien d'une atmosphère formée par un gaz neutre qui protège l'électrode et le bain de fusion. Une buse à gaz est fixée à l'extrémité du pistolet à souder amène le gaz inerte. L'électrode est située au centre de cette buse.

On peut utiliser du matériau d'apport, soit sous forme de baguettes présentées manuellement, soit sous forme de fil d'apport en alimentation automatique. Les outils de mécano-soudure TIG sont utilisés pour des tuyaux et celui des plaques tubulaire sur les échangeurs de chaleur.

Le soudage TIG se caractérise par :

- la stabilité de l'arc ;
- une maîtrise parfaite du résultat ;

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. En termes de productivité le soudage TIG ne peut pas rivaliser avec des méthodes telles que le soudage à l'arc court [15].

II.4.4.2. Matériels

Le matériel nécessaire au soudage TIG inclut:

a. Un pistolet à souder :

Le pistolet à souder doit être facile à manier et parfaitement isolé. Ce ci est dans le soudage manuel.

Il existe deux types de pistolet :

- pistolet à refroidissement par air (intensité maximale de soudage d'environ 200A).
- le pistolet à refroidissent par eau (intensité maximale d'environ 400A).

b. L'amorçage de l'arc :

L'arc est généralement amorcé par un générateur à haute fréquence. Le générateur produit l'étincelle qui fourni le chemin conducteur pour le passage du courant de soudage à basse tension. La fréquence de l'impulsion initiale peut atteindre plusieurs MHz avec une tension de plusieurs kV. Cette méthode présente l'inconvénient de provoquer de fortes interférences électriques.

Il est fortement déconseillé d'amorcer l'arc en frottant l'électrode contre la pièce à souder : si l'électrode est en contact directe avec la pièce lors de l'amorçage de l'arc, cela risque d'entraîner l'inclusion de tungstène dans la soudure et la dégradation de l'électrode,

contaminée par le matériau de la pièce à souder. On peut néanmoins amorcer l'arc par contact (méthode dite « lift arc ») à condition de pouvoir contrôler la source d'alimentation. On règle l'intensité du courant suffisamment bas lors du contact initial de l'électrode avec la pièce pour empêcher toute dégradation puis on amorce l'arc en écartant l'électrode et la pièce à souder. L'intensité du courant s'établit alors au niveau préréglé.

c. Electrode :

L'électrode doit présenter les caractéristiques suivantes :

- faible résistance électrique ;
- point de fusion élevée ;
- forte émission électronique ;
- bonne conductivité thermique. [15]

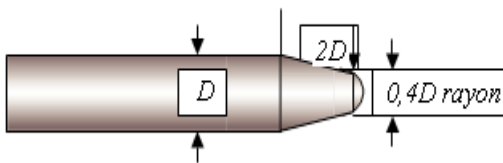
Le tungstène est le matériau qui répond le mieux à ces exigences.

Additif	Proportion(%)	Code couleur	Type	Courant
-	0	Verte	WP	CA
Thorium	2	Rouge	WT20	CC
Zirconium	0,8	Marron	WZ8	CA
lanthane	1	Noir	WL10	CA, CC
cérium	2	Gris	WC20	CC, CA

Tableau II.2-exemples d'électrodes de soudage TIG conformes ISO 68 48 [15].

Les électrodes en tungstène pur sont utilisées pour le soudage de matériaux légers en CA. Pour les autres applications de soudage, on y incorpore 2% d'oxyde de thorium afin d'améliorer la stabilité de l'arc et de faciliter son amorçage. Le thorium est radioactif, mais pas au point qu'il faille prendre des précautions particulières, sauf d'éviter d'inhaler les poussières lors du meulage de l'électrode. On peut utiliser à la place du thorium des oxydes non radioactifs tels que les oxydes de zirconium, oxydes de cérium ou l'oxyde de lanthane (*Tableau II.2*).

Le diamètre de l'électrode est un paramètre important *figure II.9* et *tableau II.3*. Pour obtenir un arc stable, il faut une charge de courant élevé et ceci signifie que le diamètre de l'électrode doit être tel que la pointe de l'électrode ne soit ni trop chaude ni trop froide (*figure II.10*).



Diamètre de l'électrode de tungstène (mm)	Courant (A)
1.0	20–50
1.6	50–80
2.4	80–160
3.2	160–225
4.0	225–330
5.0	330–400
6.4	400–550

Figure II.9 -Forme recommandée d'électrode de tungstène [16]

Tableau II.3- diamètres recommandés d'électrode - Zirconium, le gaz de protection l'argon [16]

Pour souder en CC, on meule le bout de l'électrode pour obtenir une pointe à 45° environ. L'utilisation d'une machine à meuler les électrodes garantit la régularité d'angle indispensable si l'on veut éviter les variations de l'arc et de sa pénétration dans la pièce à souder. Les électrodes utilisées pour le soudage en CA ne sont pas meulées, mais on augmente l'intensité du courant pour faire fondre l'extrémité de l'électrode et lui donner un léger arrondi [16].

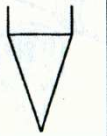

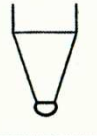
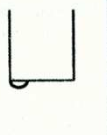
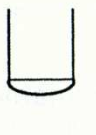
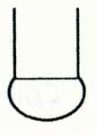
Type de courant	Électrode en tungstène	Courant		
		Trop faible	Normal	Trop fort
==	Thorium			
~	Tungstène pur			

Figure II.10-pointes d'électrodes pour soudage TIG montrant l'effet du courant de soudage par rapport au diamètre de l'électrode.[15]

II.4.4.3. Polarité de l'électrode

II.4.4.3.1. Courant avec électrode négative

L'électrode est reliée à la borne négative du générateur. Comme le montre la figure II.11, des électrons sont émis de l'électrode de tungstène et accélérés tout en voyageant par l'arc. Une quantité significative d'énergie, appelée la fonction de travail, est exigée pour un électron pour être émise de l'électrode. Une quantité d'énergie équivalente à la fonction de travail est libérée. C'est pourquoi dans TIG avec DCEN plus de puissance (environ deux-tiers) est située à la fin de travail de l'arc et de moins (environ un tiers) à l'extrémité d'électrode. Par conséquent, une soudure relativement étroite et profonde est produite.

II.4.4.3.2. Courant avec électrode positive

Appeler également la polarité renversée, l'électrode est reliée à la borne positive du générateur, comme le montre la figure II.11, l'effet thermique des électrons est maintenant sur l'électrode de tungstène. Par conséquent, une soudure peu profonde est produite et en outre un grand diamètre, un refroidissement à l'eau des électrodes doit être utilisé afin d'empêcher le

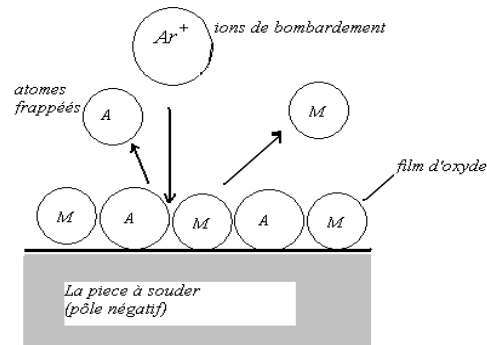


Figure II.12-action de nettoyage de surface dans la soudure TIG avec courant continu (électrode négative)[17]

bout d'électrode à se fusionner. Les ions positifs du gaz de protection bombardent la pièce à souder, comme montré dans la figure II.12, frappant des films d'oxyde et produisant une surface propre à souder. Donc, le DCEP peut être employé pour la soudure des tôles minces avec une couche d'oxyde tels que les alu minium et le magnésium, où la pénétration profonde n'est pas exigée.

II.4.4.3.3. Courant alternatif

Raisonnement deux actions sont obtenues : une bonne pénétration et un bon nettoyage d'oxyde, comme illustré dans la figure II.11. Il est souvent employé pour la soudure des alliages d'aluminium.

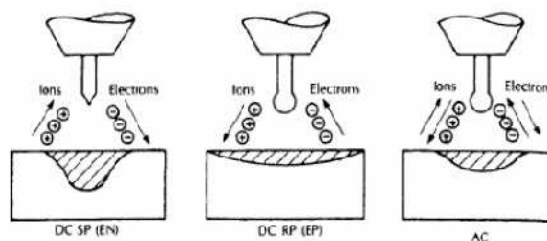


Figure II.11-les trois types de polarité en soudage TIG [17].

II.4.4.3.4. Courant pulsé

Le courant continu en mode pulsé engendre une succession de temps froids, avec maintien de l'arc, et de temps chauds (pics d'intensité) assurant la pénétration (*figure II.13*). Cette technique permet de mieux maîtriser l'énergie apportée à la pièce [17].

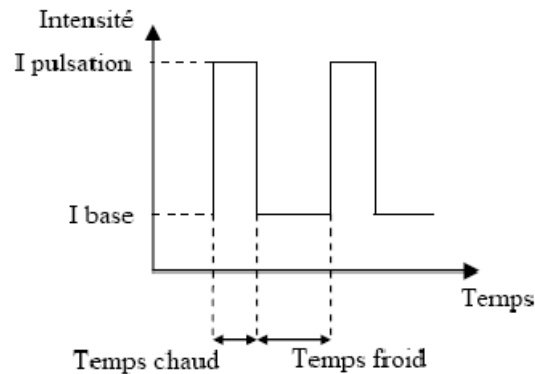


Figure II.13: Cycle d'apparition du courant pulsé [17].

II.4.4.4. Gaz de protection

Les deux gaz, l'argon et l'hélium peuvent être employés. *Le tableau II.4* énumère les propriétés de certains gaz de protection. Comme montré, *les potentiels d'ionisation* pour l'argon et hélium sont respectivement 15.7 et 24.5 eV (d'électron volts). Puisqu'il est plus facile d'ioniser l'argon que l'hélium, le déclenchement d'arc est plus facile et la chute de tension à travers l'arc est inférieure avec l'argon. En outre, puisque l'argon est plus lourd que l'hélium, il offre une armature efficace et plus grande résistance à l'ébauche en travers que l'hélium. Avec DCEP ou CA, l'argon a également une plus grande action de nettoyage d'oxyde que l'hélium.

<i>Gaz</i>	<i>Symbole chimique</i>	<i>Masse Molaire (g/mol)</i>	<i>Gravité spécifique par apport à 1 atm et 0°C</i>	<i>Densité (g /l)</i>	<i>Potentiel d'ionisation (eV)</i>
<i>Argon</i>	<i>Ar</i>	<i>44.01</i>	<i>1.38</i>	<i>1.784</i>	<i>15.7</i>
<i>dioxyde Carbone</i>	<i>CO2</i>	<i>39.95</i>	<i>1.53</i>	<i>1.978</i>	<i>14.4</i>
<i>Hélium</i>	<i>He</i>	<i>4.00</i>	<i>0.1368</i>	<i>0.178</i>	<i>24.5</i>
<i>Oxygène</i>	<i>H2</i>	<i>2.016</i>	<i>0.0695</i>	<i>0.090</i>	<i>13.2</i>
<i>Nitrogène</i>	<i>N2</i>	<i>32.00</i>	<i>1.105</i>	<i>1.43</i>	<i>14.5</i>
<i>Hydrogène</i>	<i>O2</i>	<i>28.01</i>	<i>0.967</i>	<i>1.25</i>	<i>13.5</i>

Le tableau II.4 –propriétés des gaz de protection utilisés dans le soudage

Ces avantages plus le coût inférieur de l'argon le rendent plus attrayant pour TIG que l'hélium [17].

Donc le choix du gaz de protection dépend des matériaux à souder :

Les aciers : Alliés, faiblement alliés ou inoxydables, on utilise de l'argon pur, auquel on ajoute de l'azote ou de l'hélium lorsque le soudage est mécanisé.

Pour les aciers inoxydable duplex on ajoute une faible quantité d'azote afin d'obtenir un équilibre austéno-ferritique.

Pour réaliser des joints de qualités par soudage TIG, on utilise un gaz de protection de racine afin d'empêcher l'oxydation de l'envers de la soudure en particulier les aciers inoxydables ou matériaux facilement oxydables. Le gaz de protection de racine est généralement un mélange d'azote et d'hydrogène ou de l'argon pur.

Aluminium et ses alliages : On utilise généralement de l'argon, auquel on peut ajouter de l'hélium, car ce dernier améliore le transfert de chaleur, il est utilisé pour le soudage des matériaux épais.

Pour des soudures horizontales ou en corniche avec courant continu électrode négative, on utilise l'hélium pur. L'hélium accroît la tension d'arc et l'apport de la chaleur au matériau de base, permettant d'accroître la vitesse de soudage. L'utilisation de l'argon, améliore la désoxydation, la stabilité de l'arc, et la qualité de la soudure.

Cuivre et ses alliages : L'argon convient pour souder le cuivre dans toutes les positions. il donne d'excellents résultats pour des épaisseurs jusqu'à 6mm. Un préchauffage est

généralement nécessaire en raison de la forte conductivité thermique de ce métal. Lorsque l'épaisseur des matériaux à souder dépasse les 6mm, le gaz de protection le plus adapté est l'hélium ou mélangé avec 35% d'argon.

Titane : Pour réussir la soudure de titane il faut utiliser un gaz pur de 99,99% au moins. Et en plus une grande quantité que les autres métaux. On peut utiliser de l'hélium ou l'argon avec une préférence pour l'argon dans le cas des métaux d'une épaisseur supérieur à 3 mm, car il est plus dense et une meilleure capacité de protection. L'hélium pour des pièces plus épaisses car la température de l'arc est plus élevée [15].

II.4.4.5. Avantages et limitations

II.4.4.5.1. Les avantages du TIG

- Produits de hautes qualité, et soudure de basse déformation.
- Peut être employé avec ou sans métal d'apport.
- Peut être employé avec une gamme d'alimentation d'énergie différente.
- Procède utilisé presque pour tous les matériaux.
- Commande précise pour la température de soudage.

II.4.4.5.2. Limitations

- Basse production de déposition que le soudage à l'électrode.
- Moins économique que le soudage à l'électrode pour les profondeurs supérieures à 9,5 mm.
- Difficulté de protection de la zone de soudure envers l'environnement venteux [18].

II.5. Les phénomènes thermiques, métallurgiques dans la zone affectée par la chaleur en Soudage

Les opérations de soudage modifient profondément les structures métallurgiques et les propriétés locales des pièces à assembler. Dans les cas extrêmes, elles causent des défauts tels que les fissures, porosités et fragilisation locale. Il importe donc de bien connaître l'influence

des différents facteurs tels que les cycles thermiques de soudage et la composition chimique des pièces à assembler [19].

II.5.1. 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. En mettant en place des couples thermoélectriques lors de la préparation des pièces à assembler, on peut enregistrer 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. Les résultats obtenus prennent les formes schématisées sur *la figure II.14*. On voit déjà que le métal est soumis à :

— un chauffage très rapide jusqu'à une température maximale (T) variant, suivant la distance entre le point considéré et la zone m fondue, depuis la température initiale du métal (au plus loin du métal fondu) jusqu'à la température de début de fusion de celui-ci (au plus près du métal fondu) ;

— un refroidissement généralement rapide qui succède immédiatement à l'arrêt du chauffage. Une description spatiale de l'état thermique à un instant donné au cours de l'exécution d'une soudure est apportée par le solide thermique tel que l'ont initialement décrit Portevin et Seferian. C'est une représentation de l'état des différentes isothermes dans le métal de base et dans le métal fondu à l'instant où la source de chaleur passe au droit de l'origine des coordonnées [19].

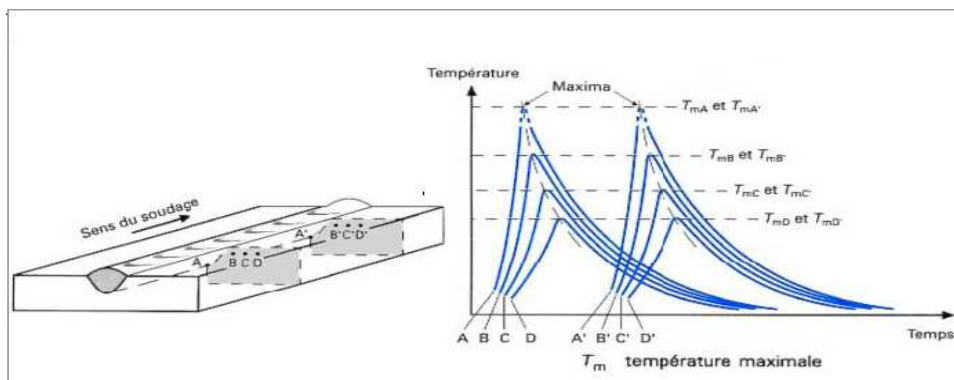


Figure II.14—Schéma des enregistrements des cycles thermiques de soudage [19].

II.5.2. Aspect thermique lié au soudage

Pendant le soudage, le refroidissement est dû par la conduction dans le métal voisin plus froid, le cycle thermique en tout point voisin de la zone soudée traduit ainsi l'évacuation de chaleur correspondant au soudage, et dépend des variables suivantes : quantité de chaleur effective mise en jeu liée au procédé de soudage, conductivité thermique liée au matériau et la géométrie de l'assemblage, l'apport de chaleur localisée à un déplacement relatif par rapport à la pièce dans le cas du soudage à l'arc ou laser.

Considérant une vitesse de déplacement constante, on peut déterminer les caractéristiques thermiques d'un régime quasi stationnaire, où la distribution de la 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[11] dès 1935, prolongée par Rykline[11], Clyde[11] et Adams [11]. 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) :

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

Avec :

θ : Température t : temps

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

λ : conductivité thermique

ρC : capacité calorifique volumique ($J m^{-3} \text{ } ^\circ K^{-1}$)

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 :

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

Pour le cas de 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 s'écrit :

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

Où :

- d désigne l'épaisseur des pièces à souder.
- r distance du point considéré par rapport à la source de chaleur ($r = \sqrt{\xi^2 + x^2 + y^2}$).
- q apport calorifique(j).
- v : vitesse de déplacement de la source (m/s).
- θ_0 : température initiale.

Portevin[11] et Sférian[11] ont proposé l'expression imagée de « solide thermique » pour décrire la représentation spatiale des températures en soudage, exprimées par l'expression III. La figure II.15 présente l'exemple d'une telle représentation schématique, l'axe Ox désigne la direction de soudage, l'axe Oy la distance à l'axe du joint soudé, l'axe Oz la température.

Pour une distance donnée y_1 par rapport au cordant de soudure, le cycle thermique $\theta(t)$ est décrit par l'intersection du solide thermique avec le plan parallèle à l'axe (xOz) en y_1 . De meme, à une température donnée θ_1 , la forme de l'isotherme est décrit par l'intersection du solide thermique avec un plan parallèle à (xOy) à θ_1 .

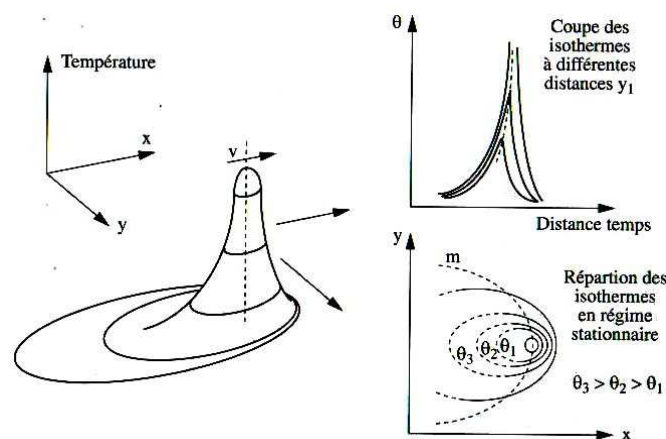


Figure II.15 représentation schématique tridimensionnelle de la distribution de température en soudage dans le cas d'une source mobile [11].

On observe ainsi que le réseau d'isothermes est beaucoup plus dense en amont du passage de la source de chaleur, ce qui traduit que la phase d'échauffement est plus rapide que le refroidissement. La distribution de chaleur est plus étalée dans le sens longitudinal et transversal, il provient de la non dissipation de la chaleur dans le sens d'épaisseur *figure II.16*.

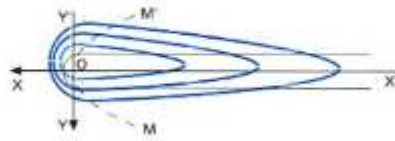


Figure II.16- Répartition des températures lors de soudage des tôles minces [14].

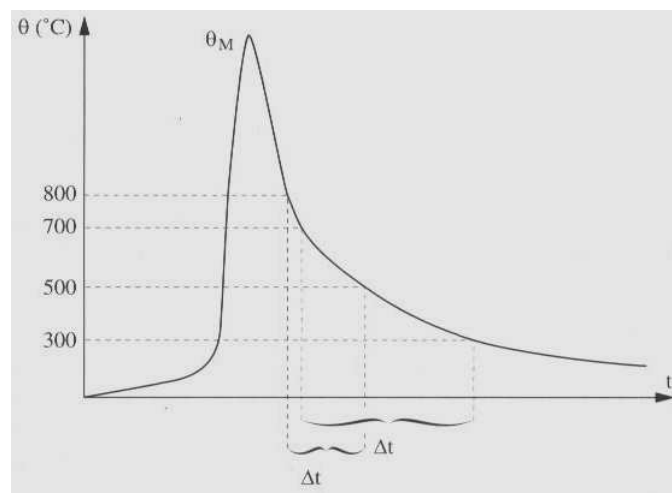


Figure II.17 Aspect de cycle thermique dans la zone affectée par la chaleur (schématique)[11].

Nous allons maintenant revenir sur le cycle thermique $\theta(t)$ subi par tout point de la ZAT. Quelque soit le type de procédé de soudage (source fixe ou mobile), celui-ci comporte typiquement (*figure II.17*) :

- Une phase d'échauffement très rapide, dont la vitesse moyenne est typiquement de quelque

102 °C/s (soudage à l'arc), allant jusqu'à 104 °C/s pour les procédés à haute densité d'énergie tels que le soudage laser [20].

- 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.

On a vu que des expressions du type (e) et (f) décrivaient l'évolution de la température en fonction du temps dans les cas respectifs du soudage de produits épais ou minces. 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) :

$$\frac{1}{\theta_M - \theta_0} = \frac{\sqrt{2\pi e} \rho C d r}{2q/v} + \frac{1}{\theta_f - \theta_0}$$

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.18 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).

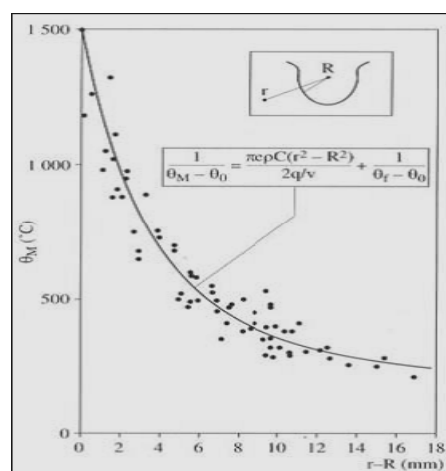


Figure II.18- Evolution de la température maximale en fonction de la distance à la ligne de fusion comparaison des températures calculées analytiquement et relevées expérimentalement (soudage à l'arc submergé). [11]

II.6. Paramètre de refroidissement en ZAT

Des relevés de cycles thermiques sur joints soudés 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, 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 : $E_e = UI/v$

E_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 η_p varie de 0,2 à 0,8.

On notera que le rendement du soudage TIG est généralement faible et varie avec de nombreux facteurs: intensité, courant direct ou alternatif, gaz de protection...

L'énergie linéaire de soudage est également le produit d'un coefficient η_G lié à la géométrie du dépôt sur plat (diffusion de la chaleur dans un angle de 180°) sera tel que : $\eta_G=1$, et d'autres valeurs pour différents assemblages.

L'énergie linéaire de soudage « effective » s'écrit donc : $E_e = \eta_p \times \eta_G \times UI/v$

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 [11] a pu préciser le domaine des produits épais et minces vis-à-vis de l'écoulement de la chaleur en soudage [11].

II.7. Caractéristiques de la soudure

Le soudage est le procédé qui permet de reconstituer la continuité métallique entre les surfaces des éléments à assembler. Pour activer les surfaces, la fusion est une méthode très efficace qui permet également le nettoyage des surfaces afin d'assurer l'installation de la liaison métallique. On obtient ainsi, après solidification, un joint homogène de même composition que le métal de base, ou un joint hétérogène dans le cas de métaux différents. Quel que soit le procédé de soudage par fusion, la structure d'une soudure

typique d'un alliage est composée de 4 zones principales (*Figure II.19*) :

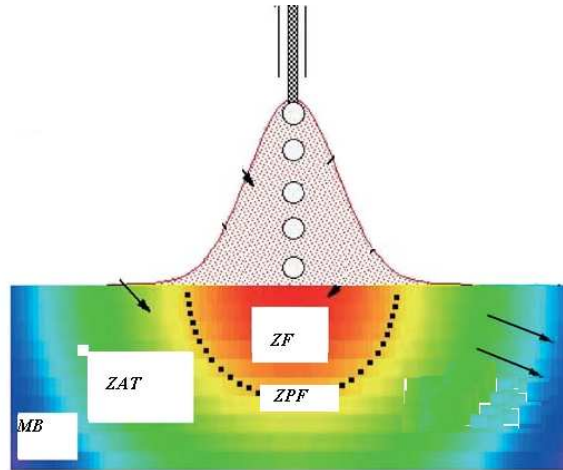


Figure II.18 – illustration schématique des différentes régions dans le joint de soudure [21].

La zone de fusion (ZF) est la région chauffée au-dessus de la température du liquidus. Le bain de fusion est similaire à un système de fonderie où le métal de base est considéré comme un moule qui étire la solidification du métal fondu par un processus de ségrégation qui débutera aux parois du moule engendrant la germination et par suite la croissance. La structure du métal de base initiale est changée par les processus de fusion et solidification, et la composition peut également varier par évaporation de certains éléments de l'alliage. Un mélange complet des éléments est obtenu par les mouvements de convection forcés.

La zone partiellement fondue (ZPF) est directement adjacente à l'interface de soudure se trouve une zone de fusion partielle. Le cycle thermique de soudage s'opère dans cette zone à des températures comprises entre le liquidus et le solidus de l'alliage. Dans certains alliages, contenant des inclusions et des impuretés à bas points de fusion, ou des ségrégations d'éléments d'alliages aux joints de grain, la liquation de ces régions microscopiques peut se produire et s'étendre de l'interface de soudure à l'intérieure de la zone de fusion partielle.

La vraie zone affectée thermiquement (ZAT) est la zone où la température est comprise entre la température du solidus et une température plus basse mais suffisamment élevée pour permettre des réactions ou des transformations à l'état solide, en modifiant la structure du métal de base.

Le métal de base (MB) est la partie du matériau qui ne subit pas de modifications microstructurales. Bien que du côté métallurgique est inchangé, en revanche, le métal de base(MB) est le siège de concentration des contraintes résiduelles transversales et longitudinales dépendant du degré de retrait imposé à la soudure [22].

CHAPITRE III

Métallurgie de soudage des alliages d'aluminium

Introduction

Le soudage des alliages d'aluminium n'est pas une simple équation. Même les spécialistes ne sont pas toujours d'accord sur la réponse des différents alliages au soudage et l'impact sur leurs propriétés mécaniques. Ici, nous nous efforcerons donc de donner des informations générales utiles et quantifiables.

Le soudage de l'aluminium crée systématiquement une zone affectée thermiquement (ZAT) dans laquelle les propriétés mécaniques peuvent être réduites jusqu'à 50 % par rapport aux valeurs nominales, dépendant de l'alliage soudé et du procédé utilisé. Généralement, pour le calcul de structures, il est entendu d'étendre cette zone à 2,5 cm de chaque côté du joint, à moins de pouvoir traiter thermiquement la pièce après soudage. La conception de la pièce doit donc prendre en considération cette réalité [23].

III.1. La métallurgie de soudage

Dans le meilleur des cas une bonne construction soudée est signifiée un bon joint de soudure, les zones affectées thermiquement (ZAT) et le métal de base adjacent devront avoir les mêmes propriétés que le métal de base. Il y a, cependant, un certain nombre de problèmes liés à la soudure de l'aluminium et de ses alliages qui le rendent difficile de réaliser cet idéal. Les dispositifs et les défauts qui peuvent contribuer à la perte de propriétés comportent ce qui suit:

- Porosité de gaz.
- Inclusions d'oxyde et pelliculage d'oxyde.
- fissuration à chaud.
- fissuration a froid.
- réduction des propriétés mécanique dans la soudure (ZAT).
- Manque de pénétration.
- Résistance à la corrosion réduite.
- Résistance électrique réduite.

Mais avant de présenter les causes de ces défauts, une brève introduction sur les phénomènes de durcissement structural des alliages d'aluminiums (cas du 2024T3) est utile [24].

III.2. Étude du diagramme des phases métastables dans le système aluminium cuivre

Introduction

Trois phases métastables peuvent se former dans un alliage d'aluminium contenant moins de 5,7% en poids de cuivre, après une trempe à partir de la région monophasé α ; leur stabilité augmente dans l'ordre : zones Guinier-Preston, θ'' , θ' . La figure III.1 représente les limites de solubilité des zones GP et de θ'' selon Beton[25] et Rollason[25], de θ' suivant Hornbogen[25] et de la phase stable θ (Al_2Cu) d'après Hansen [25].

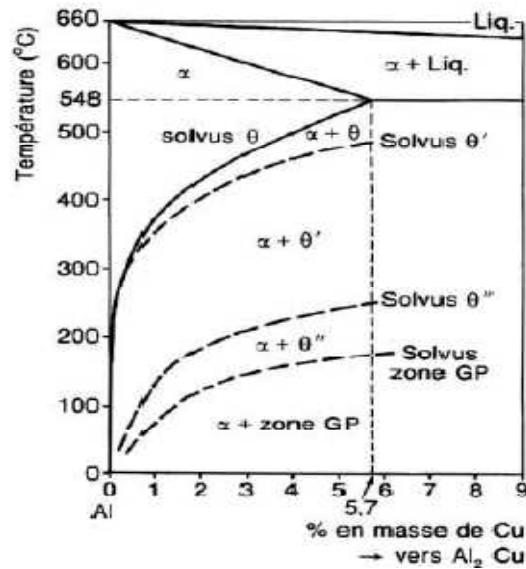


Figure III.1 Diagramme de phases partiel du système Al-Cu [9].

Le traitement de trempe structurale des alliages d'aluminium comprend une **mise en solution solide** suivie :

- D'un refroidissement suffisamment rapide pour maintenir à température ambiante la solution solide existant à des températures plus élevées ;
- D'un traitement de revenu ultérieur à l'ambiante (maturation) ou à une température supérieure qui conduit à un durcissement de l'alliage.

Le cas des alliages d'aluminium à 4% de cuivre.

Le diagramme d'équilibre des alliages Al-Cu (*figure III.1*) possède un domaine de solution solide α dont l'étendue croît avec la température. L'alliage de composition à 4% Cu est constitué d'une solution solide homogène pour les températures comprises entre T_S et T_L . Des atomes de cuivre sont repartis au hasard dans le réseau (solution solide désordonnée).

Si après mise en solution entre les températures T_S et T_L , on refroidit lentement l'alliage, ce lui-ci est constituée au dessous de T_S (donc à l'ambiante) de deux phases : α et θ (composé intermétallique Al_2Cu).

Par contre si après la mise en solution, on refroidit la solution solide α rapidement, cette solution solide peut être maintenue à l'ambiante dans un état de sursaturation.

Ce phénomène de trempe, et la vitesse minimale pour maintenir la solution solide à l'ambiante et la vitesse critique de trempe. Tout de suite après trempe, on dit que l'alliage est dans un état de trempe fraîche.

Ci après la trempe, on effectue un maintien à une température T_R , on observe un durcissement important de l'alliage. C'est le revenu.

Le durcissement obtenu est en fonction de temps et de la température de maintien ce durcissement s'explique par un phénomène de précipitation résultante de la décomposition de la solution solide sursaturée (hors d'équilibre) au cours de maintien isotherme.

Par revenu à des températures élevées on peut obtenir directement la phase θ .

Mais aux plus basses températures, pour lesquelles on observe le plus fort durcissement, la solution solide se décompose en plusieurs étapes. Par exemple, pour une température légèrement inférieure à 200°C le schéma de décomposition en fonction du temps est le suivant :

Solution solide initiale (α) \rightarrow zones GP +matrice 1 \rightarrow θ'' + matrice 2 \rightarrow θ' + matrice 3 \rightarrow θ + matrice 4.

Les zones de GP sont constituées par des rassemblements d'atomes de cuivre parallèlement aux plans $\{100\}$ de la matrice. Cette précipitation est cohérente (*figure III.2.a*).

La phase θ'' correspond à la formation de plaquettes de 2.5 nm d'épaisseur et de 15 nm de diamètre. Dans ces plaquettes qui sont encore cohérentes et parallèles aux plans $\{100\}$ de la matrice (comme les zones de GP), les atomes d'aluminium et de cuivre sont ordonnés (*figure III.2.b*). Leur composition est différente de celle de GP et la matrice a une composition différente que nous appelons « 2 ».

La phase θ' est un composé tétragonal qui est visible au microscope optique sous forme de plaquettes. Ce composé est semi cohérent avec la matrice dont la composition devient « 3 ».

La phase θ est le composé d'équilibre Al_2Cu , qui est totalement incohérent avec la matrice. L'alliage tend vers l'état d'équilibre (*figure III.2.c*).

Suivant la température de revenu la décomposition

On de la solution solide plus ou moins complexe :

- En dessous de 200°C, la décomposition s'arrête à θ'' ou θ' .

- Au dessus de 200°C, les zones de GP ne sont pas observées et on peut obtenir directement θ'' ;
- A températures ambiantes, le traitement qui s'appelle maturation ne conduit qu'aux zones de GP [26].

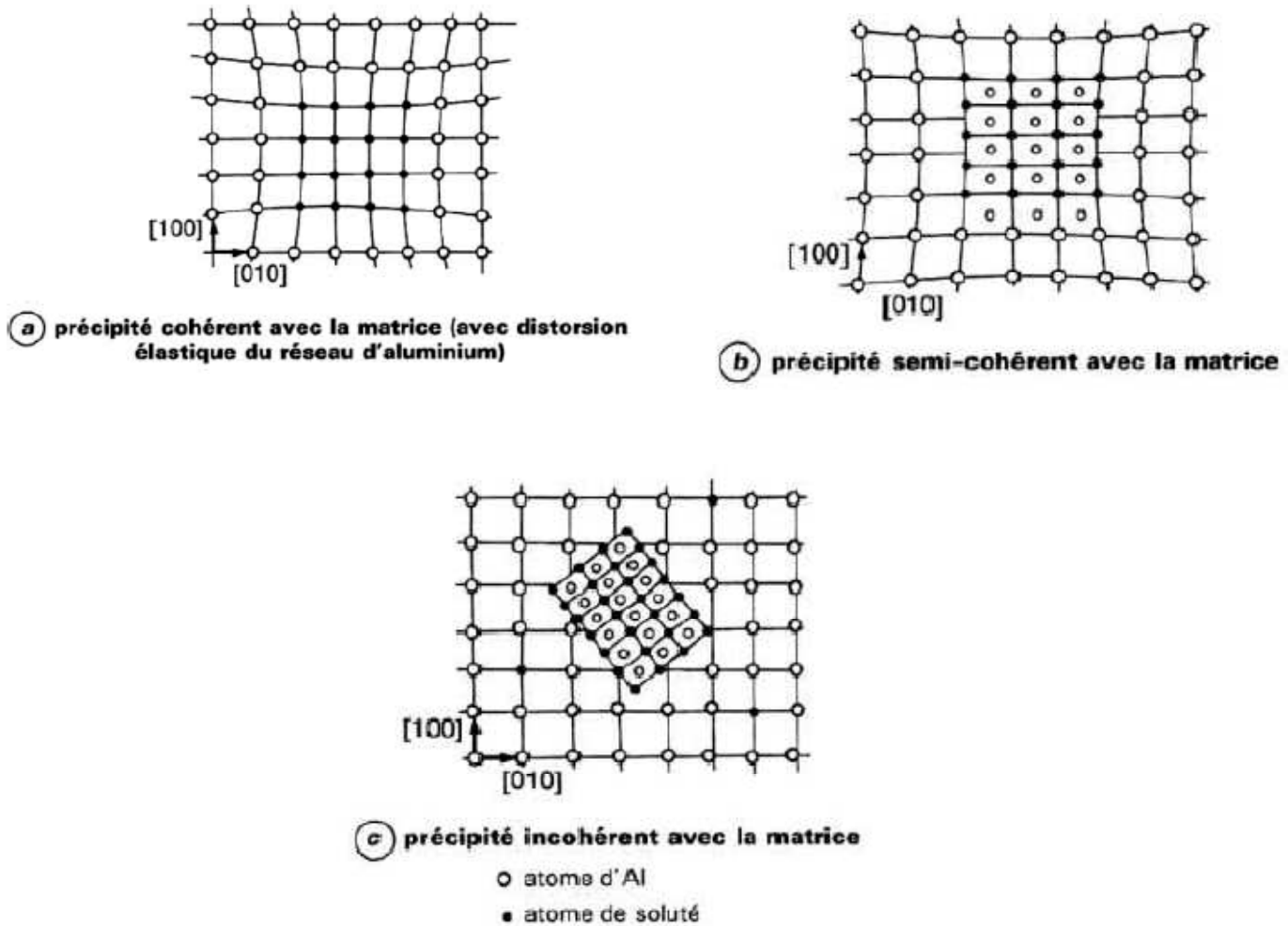


Figure III.2 : Schémas de cohérence entre précipités et matrice : (a) cohérente, (b) semi cohérente, (d) incohérente [26].

III.3. Transformations métallurgiques liées au soudage

Le soudage est réalisé, avant ou après traitement thermique, en fondant localement les parties à joindre. D'importantes amplitudes de cycles thermiques sont donc mises en jeu. De ce fait, la zone touchée par la chaleur s'étend de part et d'autre de la source de chaleur sur une plus ou moins grande distance selon la puissance de la source de chaleur. Le matériau subit dans cette zone des changements microstructuraux qui peuvent affecter les propriétés mécaniques. En effet, l'état de précipitation brut de soudage dans les alliages d'aluminium de la série 6000 se décompose en plusieurs zones (du centre de la soudure vers le métal de base).

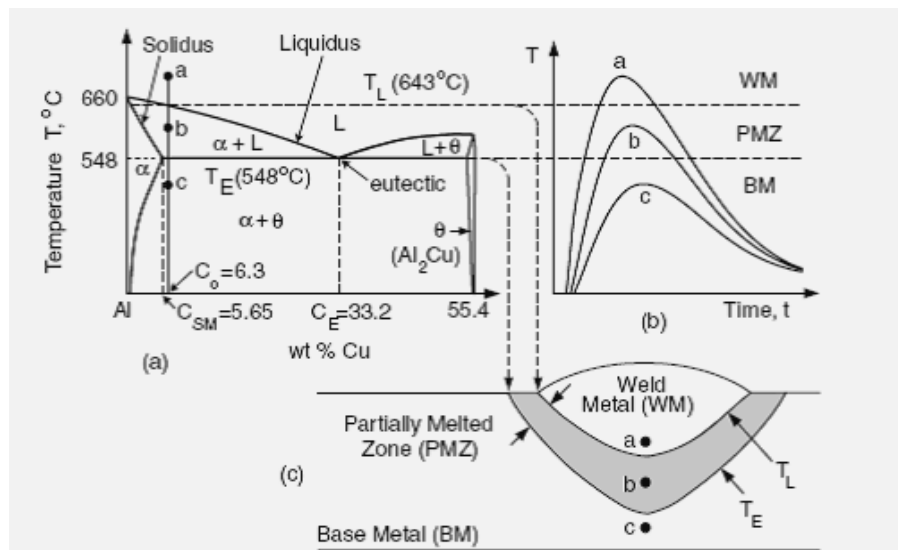


Figure III.3 : (12.3) Formation de ZL dans la soudure d'aluminium 2219: (a) diagramme de phase Al-Cu; (b) cycle thermique; (c) cordant de soudure [17].

D'après la figure III.3, sur un cordant de soudure on a définie trois zones sont (a) correspond à la zone fondue, (b) correspond à la ZAT et (c) correspond au MB, chaque zones à son cycle thermique approprié. Les cycles thermiques sont liés directement au diagramme d'équilibre, ce qui nous permet d'avoir la microstructure de chaque zone.

La zone fondue (ZF) est la zone où, comme son nom l'indique, le matériau passe par l'état liquide lors de l'opération de soudage. En dehors de la ZF, au-delà des lignes de fusion, le matériau est resté à l'état solide ou semi-solide. La composition de la ZF peut

être différente de celle du métal de base selon le choix d'un éventuel métal d'apport (MA). Par exemple, un 4047 réduit la sensibilité au retrait et à la fissuration à chaud [27]. Généralement dans les espaces inter dendritiques, il y a des précipités eutectiques. Par ailleurs, la vitesse de soudage influence la macrostructure de la ZF, qui se décompose en une zone basaltique où les dendrites ont une croissance en colonne et une zone où les grains sont équiaxes comme le montre la *figure III.4*. Dans le cas présent, la structure est proche de celle représentée par la *figure III.5-a.b*.

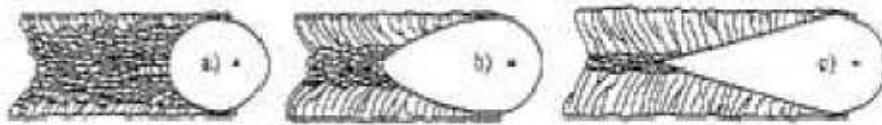


Figure III.4: Influence de la vitesse sur la macrostructure de la ZF [27].

La zone affectée thermiquement (ZAT), lors du soudage, peut enregistrer des températures élevées qui restent toutefois en dessous de la température de fusion. Cela entraîne des modifications métallurgiques à l'état solide. Pour les alliages à durcissement structural, cette zone peut se décomposer progressivement en trois zones. Dans la première, la température est telle que la dissolution est totale. Dans la deuxième zone, les précipités de type β'' se transforment progressivement en respectivement β' . Dans la troisième enfin, les précipités de type β'' , qui ont subi l'équivalent d'un revenu ont simplement grossi [28].

Le métal de base (MB) : cette partie de la structure soudée est suffisamment loin de la source de chaleur pour qu'il n'y ait pas eu de transformation métallurgique significative lors de l'opération de soudage.

La *figure III.5* montre cette évolution de la précipitation du centre de la soudure jusqu'au métal de base. Shaw montre, dans son cas, la présence de 4 ZAT dans les alliages de la série 2000 comme l'indique le schéma de la *figure III.5-b* [28].

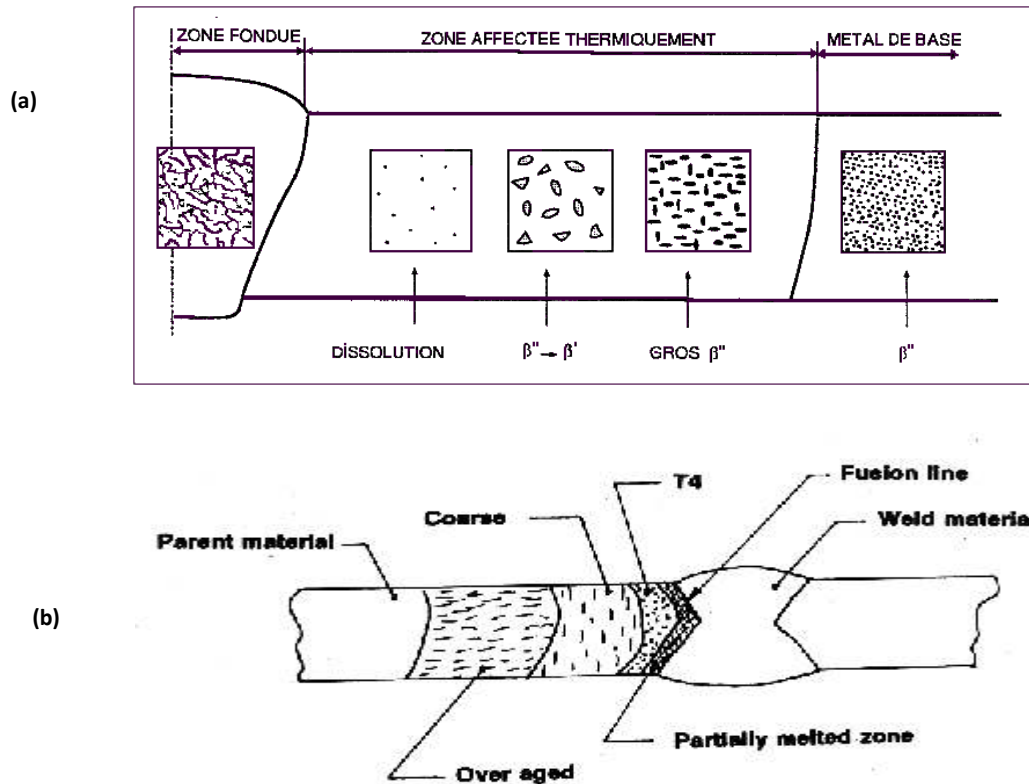


Figure III.5: Évolution des zones de soudage (a) dans les alliages d'aluminium 6000 [6] complétée par le schéma des dendrites en ZF et (b) dans les alliages 2000 [29].

III.4. Recristallisation et croissance pendant la soudure

L'effet du durcissement par précipitation est complètement perdu dans la zone de fusion en raison de la fusion, et est partiellement perdu dans la ZAT en raison de la recristallisation et de la croissance des grains. Ces pertes de propriétés mécaniques devraient être prises en considération dans des conceptions des structures soudées [17].

III.4.2. Cycle thermique

La perte de propriétés mécaniques dans le ZAT peut être expliquée avec l'aide des cycles thermiques, comme représenté sur la figure III.6 plus on rapproche de la frontière de la zone fondue, plus la température devient plus haute et plus le matériau reste au-dessus de la température efficace de recristallisation, T_x . Sous le chauffage rapide pendant le soudage, la température de recristallisation peut augmenter parce que la recristallisation exige la diffusion

et qui prend du temps. Puisque la diminution du durcissement avec l'augmentation de la température et temps d'adoucissement, la dureté de la ZAT diminue pendant que la frontière de fusion est approchée. La figure III.7 donne les expositions des profils de dureté de la ZAT d'aluminium 5083 .Il s'avère que plus le métal de base est dur, plus la perte de dureté est grande

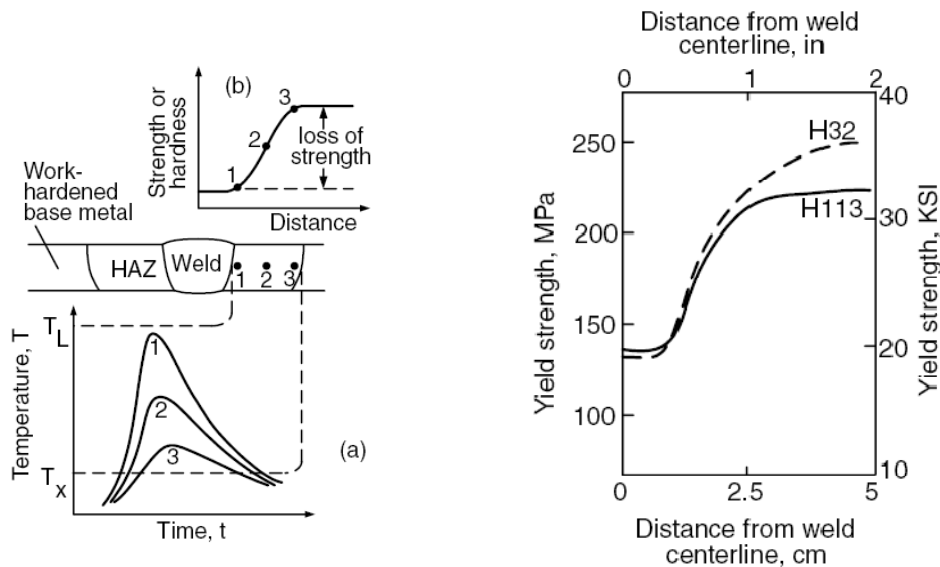


Figure III.6 : adoucissement du matériau durci provoqué par la soudure : (a) cycles thermique ;(b) profil de dureté[17].

Figure III.7 : profil de dureté d'un cordant de soudure pour l'aluminium 5083[17]

La croissance des grains de la ZAT peut également être expliquée avec l'aide de l'allure ascendante des cycles thermiques, comme représenté sur la figure III.8. Plus qu'on s'approche de la zone fondue plus la température augmente, le métal reste à températures élevées et une longue durée. Puisque la croissance de grain augmente avec l'augmentation de la température et du temps d'adoucissement (la figure III.9), la taille de grain dans le ZAT augmente pendant que la ZF est approchée [17].

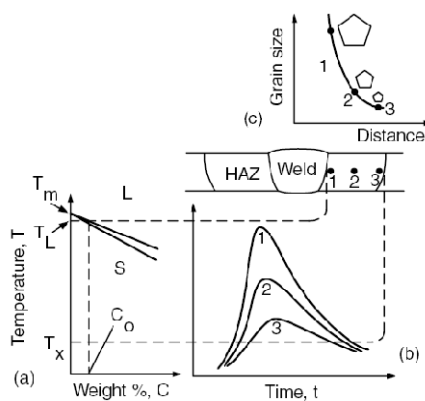


Figure III.8 croissance du grain : (a) diagramme de phase, (b) cycle thermique, (c) variation de la taille du grain [17].

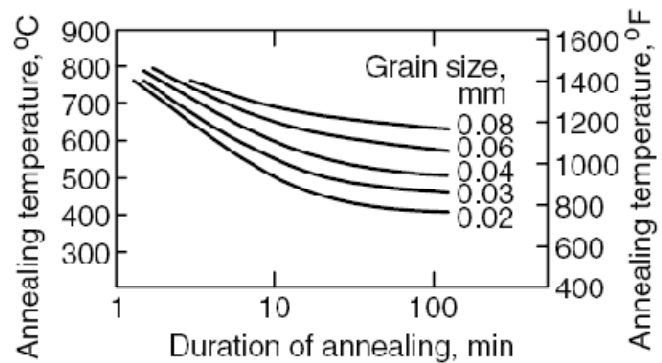


Figure III.9 Croissance du grain de laiton de Cu-35Zn laminée à froid à la réduction de 63% [17].

III.5. Effets des paramètres et le processus de soudage

L'effet des paramètres de soudage sur les propriétés mécaniques de la ZAT est expliqué sur la figure III.10. La taille de la ZAT et le temps de conservation au-dessus de la température efficace T_x de recristallisation augmentent avec l'augmentation de l'entrée de la chaleur par unité de longueur de la soudure, c.-à-d., le rapport de la chaleur entrée à la vitesse de soudure.

En conséquence, la perte de propriétés dans la ZAT devient plus grave à mesure que l'entrée de la chaleur par unité de longueur de la soudure est augmentée. La figure III.11 montre l'effet des paramètres de soudage sur la dureté de la ZAT d'un alliage aluminium 5356-H321.

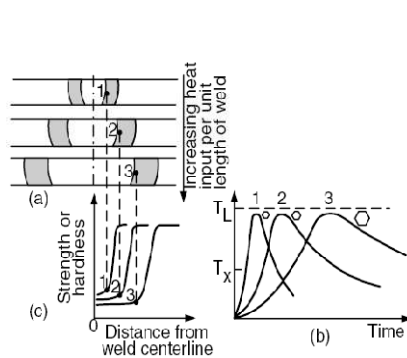


Figure III.10 effet de la quantité de chaleur par unité de longueur de soudage dans : (a) largeur de la ZAT, (b) cycle thermique, (c) profil de dureté [17].

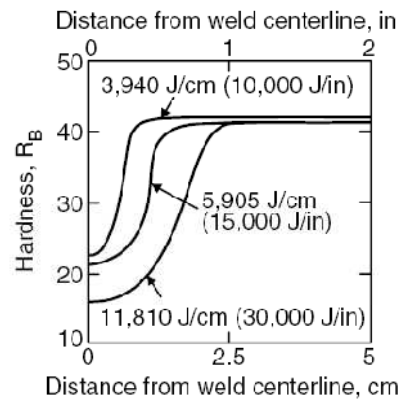


Figure III.11 : l'effet de la densité de chaleur de la soudure sur la dureté de ZAT pour aluminium 5356 [17].

En conclusion, la figure III.12 et III.13 montre l'effet du procédé de soudure sur la microstructure de ZAT d'un aluminium 2219. En raison de la basse chaleur entrée, un refroidissement très rapide pour le procédé *EBW*, on observe une recristallisation très petite dans la ZAT. D'autre part, en raison de la chaleur plus élevée entrée et un abaissement du taux de refroidissement dans le procédé *TIG*, une recristallisation et même une croissance de grain sont observées dans la ZAT.

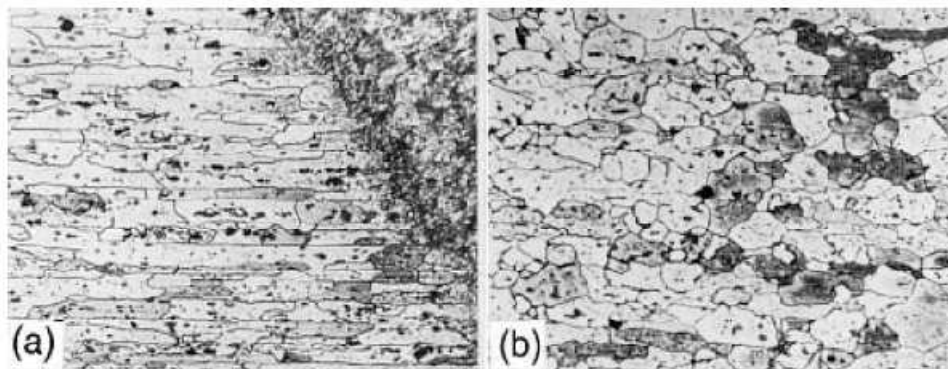


Figure III.12 : Microstructure ZAT-ZL-ZF d'aluminium 2219-T37 durci : (a) soudure de faisceau d'électron, (b) soudure TIG. 80× [17].

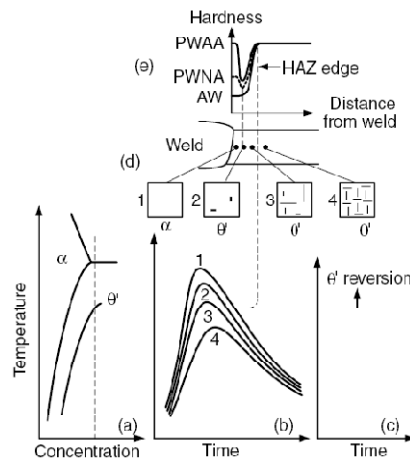


Figure III.13: Alliage (6061) soumis à un traitement thermique pour contenir θ' avant la soudure: (a) diagramme de phase ; (b) cycles d'courant ascendant; (c) réversion de θ' ; (d) microstructure ;(e) profil de dureté [17].

III.6. Nettoyage et dégraissage avant la soudure

Les pièces pour la soudure peuvent être plates, préformées, cisailées, sciées ou fraisées pour donner la forme désirée ou pour fournir la préparation de la soudure. Dégraisser peut être accompli par l'essuyage, le brossage, la pulvérisation ou le dégraissage à vapeur de solvants avec des dissolvants disponibles dans le marché. C'est le meilleur fait avant que n'importe quel nettoyage mécanique ait lieu. Mécaniquement les bords de coupe peuvent porter des bavures le long du bord de coupe qui emprisonnera la saleté et la graisse. Ces bavures devraient donc être enlevées, des préparations de soudure par l'éraflure avec un outil d'aspiration avec une brosse métallique. L'éraflure est également une excellente méthode pour enlever le film d'oxyde. Des brosses métalliques d'acier inoxydable, les laines de fil d'acier inoxydable peuvent également être employées pour éliminer l'oxyde. Comme mentionné ci-dessus dans la section 4.6, il est déconseillé d'utiliser les aciers au carbone, le laiton ou le cuivre, afin d'éviter contamination de l'aluminium.

Dans certains cas, en particulier en tâchant de réaliser des soudures avec l'absence de la porosité, le nettoyage chimique ou le marinage peuvent être exigés. Un magasin de marinage est illustré dans la figure III.14.

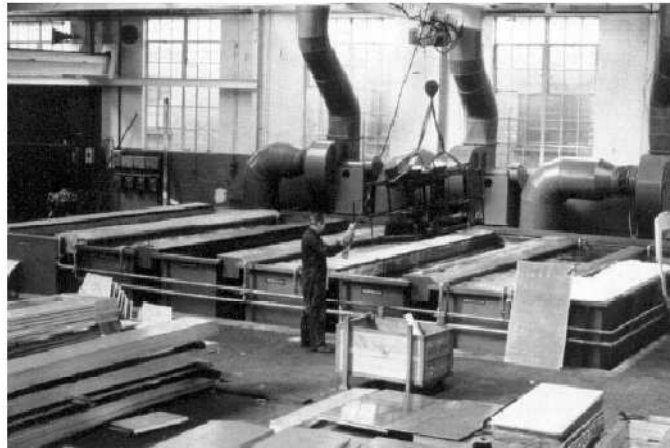


Figure III.14: Magasin de marinage typique [30].

Une fois dégraissé et nettoyé les pièces doivent être soudées au cours d'une période courte, en général quatre heures seraient considérées comme raisonnables. La pièce doit être maintenue en état propre, pendant ce temps et ceci peut exiger de la pièce doit être couverte de feuilles de polythène ou de papier brun, et si elle est laissé se reposer durant la nuit les joints peuvent exiger un nettoyage additionnel ainsi il est recommandé de nettoyer seulement les pièces qui peuvent être soudées au cours d'une période de production de quatre ou cinq heures [30].

III.7. Règles générales de préparation des bords en vue du soudage

Dans un contexte de pièces mécaniques soudées à l'aide des procédés classiques à l'arc, la préparation des bords en vue du soudage se doit d'être étudiée en considérant divers critères parmi les plus importants desquels figurent (*figure III.15*) :

- l'accessibilité ou non de chacune des faces ;
- l'épaisseur à souder ;
- le procédé de soudage ;
- l'orientation du fibrage dans chacun des éléments ;
- les dimensions de chaque élément ;
- la position du plan de joint lors de l'assemblage (pièces volumineuses non positionnables).

Quelques règles fondamentales sont à respecter en matière de préparation des bords ; elles s'appuient sur les notions suivantes :

— symétrie d'écoulement thermique à la racine du joint, afin d'éviter la création de défauts de compacité en cet endroit lors de la réalisation de la première passe (impératif en soudage sur aluminium et alliages en raison de la forte diffusivité thermique de ces matériaux) d'où symétrie de préparation par rapport au plan de joint lorsque la position de ce dernier le permet :

— équilibrage des déformations angulaires dues au retrait, par chanfreinage à double ouverture (X ou K) ;

— limitation de la section de métal à déposer en respectant toutefois une accessibilité convenable de la racine pour les premières passes de soudage [31].

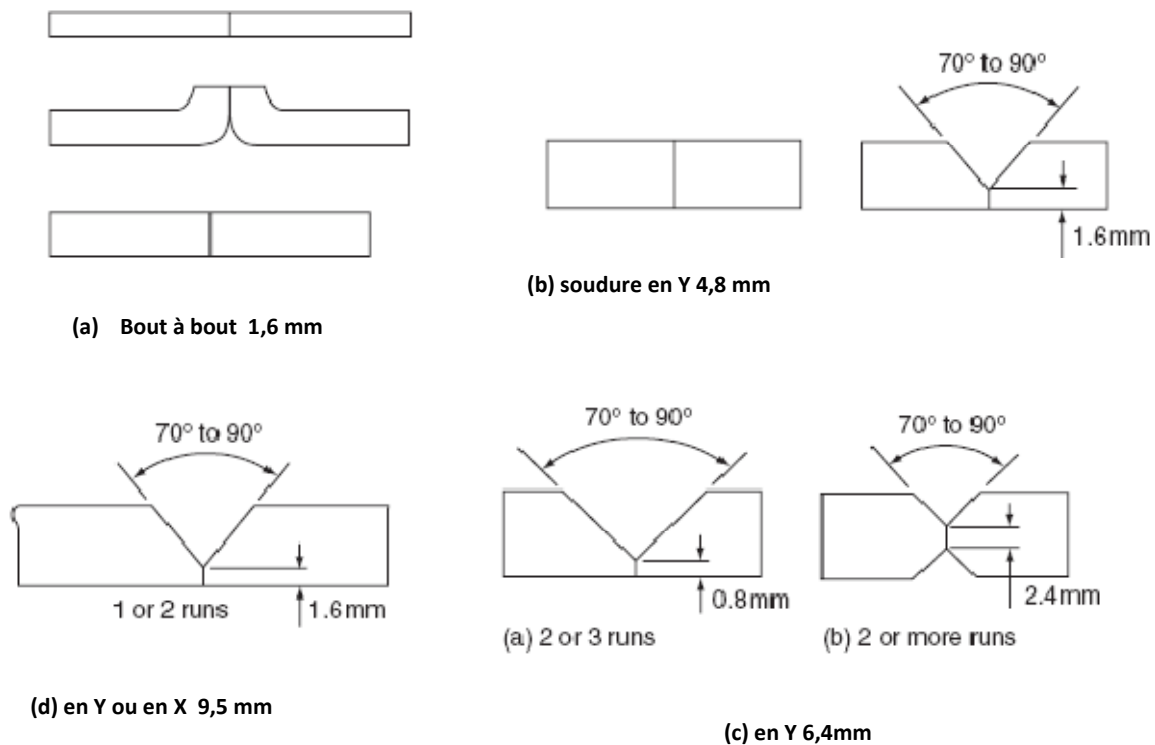


Figure III.15. Règle de préparation des bords pour soudage TIG [31]

III.9. Défauts de soudage

III.8.1. Porosité en aluminium et ses alliages

La porosité est un problème confiné au métal de soudé. Elle résulte du gaz dissous dans le métal fondu de la soudure devenant emprisonné pendant qu'elle solidifie, de ce fait formant des bulles dans la soudure solidifiée *Figure III.16*.

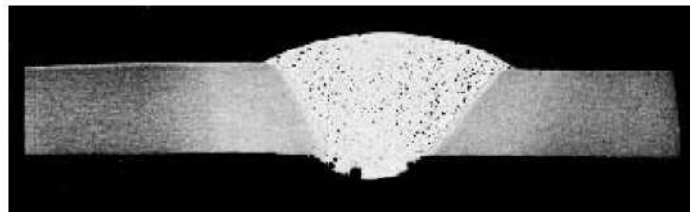


Figure III.16 distribution de porosité dans le soudage bout à bout par procédé TIG [30].

La porosité peut s'étendre d'être microporosité extrêmement fine. Le plus favorable dans le cas de l'aluminium est l'hydrogène, qui a la solubilité élevée en aluminium fondu mais la solubilité très basse dans le solide, comme illustré dans *Figure III.17*. Ceci montre une diminution de la solubilité à l'ordre de 20 fois pendant que la solidification a lieu, une baisse dans la solubilité ainsi prononcée qu'il est extrêmement difficile de produire une soudure sans porosité en aluminium.

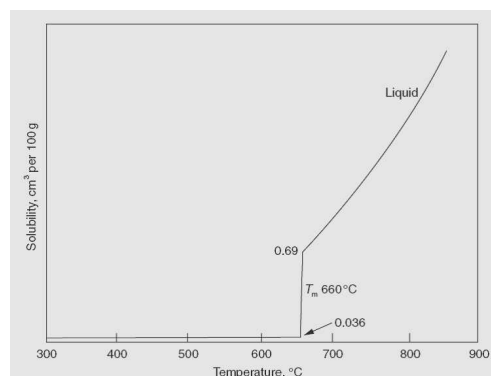


Figure III.17 : Solubilité de l'hydrogène dans l'aluminium [30].

La porosité tend à être la plus basse en soudures autogènes. Quand le métal de remplissage est employé les niveaux de porosité tendent à augmenter en raison de la contamination du fil.

Les sources de l'hydrogène sont généralement les consommables de soudure.

Dans les processus à protection gazeuse dont le gaz est la source de l'humidité. Pour garantir la non contamination de la soudure par l'hydrogène il est essentiel d'avoir un gaz avec un bas point de condensation et un degré élevé de pureté.

Une autre source de contamination peut venir des tuyaux de gaz eux-mêmes. Les plastiques utilisés sont poreux, ces pores contiennent des particules d'eau qui se trouvent dans l'air.

La propreté du métal de base est également importante en réalisant les niveaux bas de la porosité. Dégraissage complet est essentiel, suivi d'un nettoyage mécanique tel que le fil d'acier inoxydable balayant pour enlever la couche d'oxyde qui peut être hydratée. Une fois que dégraissé et balayait de parent devrait être soudé au cours d'une période courte, une période de quatre heures fréquemment étant considérées comme acceptable [30].

III.8.2. Enlèvement de film d'oxyde pendant la soudure

La nécessité d'enlever le film d'oxyde avant de souder pour réduire le risque de porosité a été couverte ci-dessus. Il est également nécessaire de disperser ce film pendant la soudure si des défauts tels que le manque de fusion et l'inclusion des films d'oxyde doivent être évités.

L'oxyde d'aluminium ($Al_2 O_3$) est très tenace et une formation rapide, qui donne à aluminium une excellente résistance à la corrosion. L'oxyde d'aluminium a un point de fusion très élevé, 2060°C comparé au métal pur qui fond à 660C. , pendant la soudure, l'oxyde flottera sur la piscine de soudure comme scories fondues. L'aluminium chauffé à son point de fusion sans disperser le film d'oxyde aura comme conséquence un bain en fusion d'aluminium inclus dans une peau d'oxyde. Cette peau doit être enlevée par quelques moyens appropriés. Avec des processus jaillis, le flux doit être très agressif pour dissoudre le film. Le manque d'enlever ces flux sur l'accomplissement peut provoquer des échecs de service de la corrosion et, en plus de la porosité.

Heureusement, dans la soudure TIG il y a un phénomène connu sous le nom de nettoyage cathodique qui peut être utilisé pour donner le résultat désiré. Quand l'électrode est reliée au pôle positif de la source et du courant continu d'énergie est passé, il y a un écoulement des électrons de l'objet à l'électrode avec des ions voyageant dans la direction opposée et bombardant la surface d'objet. Ce bombardement d'ion vers le haut casse et disperse le film et les oxydes du métal de soudure fondre avec le métal de base. En employant C.A. l'élimination

de film d'oxyde a eu lieu sur le demi cycle positif et se refroidie sur le demi cycle négatif [30].

III.8.4. Fissuration à chaud

Fissuration à chaud est un problème de soudure qui ne se produit pas en métaux purs mais peut être trouvé dans certains systèmes d'alliage. Le mécanisme fondamental est le même en tout des systèmes d'alliage, et est une fonction de la façon dont les systèmes d'alliage se solidifient.

L'addition des éléments d'alliage à un métal pur causera un changement pour la température de solidification de l'alliage, de cela le métal pur et peut avoir comme conséquence un certain nombre de différentes phases - une solution pleine, un composé eutectique et intermétallique. Ces changements d'état et des proportions relatives de chaque phase sont représentés sur des diagrammes de phase. La plus basse composition de point de fusion de l'alliage est connue comme composition eutectique qui se solidifie à l'une température spécifique. Les autres compositions non-eutectiques se solidifient sur une gamme de températures.

Le premier solide formé est une cellule d'unité qui agit en tant que noyau auquel les atomes s'attachent, formant ce qui est connu comme dendrite. La dendrite augmente dans la taille jusqu'au moment où elle commence à se heurter ses voisins. Le point auquel cette collision a lieu devient la frontière entre les dendrites. La conséquence de ce procédé de solidification est que la composition en alliage le plus bas point de fusion est poussée en avant de la dendrite, jusqu'à ce qu'elle devienne emprisonnée entre les dendrites adjacentes. Si la différence dans le point de fusion entre l'eutectique et la majeure partie du métal est suffisamment grand, le film liquide est réparti le long des joints de grain, pendant que le métal se refroidit et se contracte. Les résultats de ceci sont illustrés dans *figure III.18*. [30]

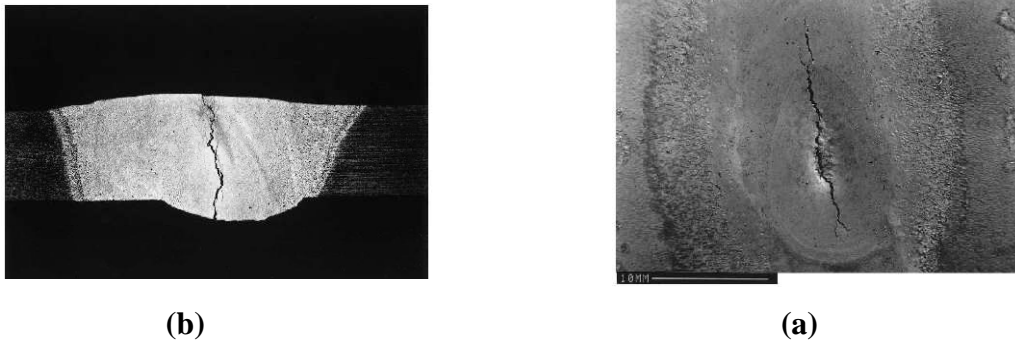


Figure III.18 : Fissuration à chaud : (a) soudure TIG d'alliage A5083 ;(b) dans une soudure 3mm épaisse de TIG de métal de A6082 avec métal d'apport 4043 [30].

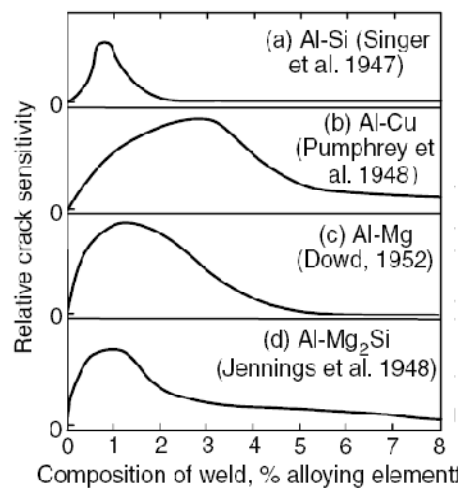


Figure III.19 : Effet de la concentration sur la sensibilité de fissuration [30].

Tous les alliages d'aluminium montrent une crête dans la sensibilité de fissuration à chaud, avec une composition de l'élément d'addition comme montré dans la figure III.19.

III.8.5. Fissuration à froid

Ces fissures apparaissent à basses températures. De ce fait elles sont fines et présentent une surface non oxydée. Elles ne sont pas d'orientation privilégiée par rapport à la microstructure. Elles se développent le plus souvent dans la zone affectée thermiquement mais peuvent parfois se rencontrer dans le métal fondu lorsque celui-ci possède une très haute limite d'élasticité (figure III.20). Elles sont tributaires du champ de contraintes, ce qui explique

qu'elles prennent naissance dans la zone de concentration que constituent les défauts de surface (mauvais mouillage, caniveaux) ou les discontinuités liées à la conception de l'assemblage.

Pour apparaître, ces fissures nécessitent la conjugaison de trois facteurs :

- une structure peu ductile.
- des contraintes.
- de l'hydrogène.

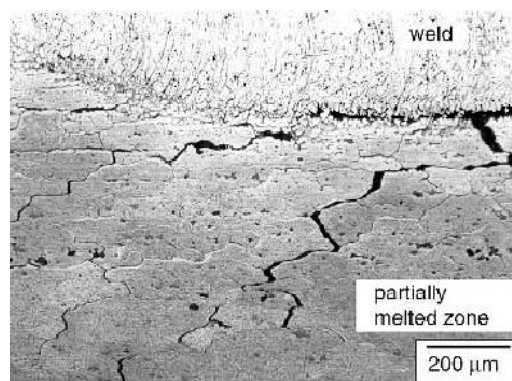


Figure III.20 : fissuration à froid dans une soudure de 2019 avec métal d'apport 1100 [30].

De ces diverses considérations découlent les actions à entreprendre pour éviter la fissuration à froid:

- 1) Minimiser la quantité d'hydrogène introduite dans le bain liquide
 - propreté de joint : humidité, huile, graisse, etc.
 - Choix des produits de soudage : bas hydrogène diffusible.
 - Etuvage et conservation des produits : selon recommandations du fournisseur.
- 2) Utiliser c'est possible des produits d'apports à très faible limite d'élasticité et très bas d'hydrogène pour l'exécution de la première passe et de la passe de reprise des assemblages en forte épaisseur.
- 3) Minimiser les contraintes internes ou externes :
 - Procédure de soudage [26].

III.8.6. La fissuration au préchauffage

La fissuration au préchauffage, de caractère inter granulaire, se rencontre essentiellement dans la zone affectée thermiquement à gros grains et occasionnellement dans le métal fondu. Elle s'initie lors du traitement thermique post-soudage ou en service à température élevée.

Cette fissuration résulte de la relaxation de fortes contraintes résiduelles provenant de la fabrication lorsque les déformations qui l'accompagne se concentrent au niveau des joints de grains. C'est le cas dans la zone affectée thermiquement à gros grains des matériaux durcis par précipitation car, au cours du soudage, les carbures qui durcissent ces alliages sont remis en solution dans la zone portée à très haute température au voisinage de la zone de liaison et le restent lors du refroidissement du fait de la rapidité des cycles thermiques de soudage. Lors d'un réchauffage ultérieur, en service ou durant le traitement thermique post-soudage, ils vont précipiter à l'intérieur des grains sur les dislocations créées par l'écroutissage résultant des cycles thermiques de soudage et renforcer considérablement la matrice, si bien que la déformation par fluage associées à la relaxation des contraintes vont se localiser au niveau des joints des grains qui peuvent ne pas supporter.

En pratique pour minimiser les risques lorsqu'un matériau sensible doit être utilisé, on aura intérêt à :

- Concevoir autant que possible les joints de manière à réduire le niveau de bridage
- Choisir un produit de soudage ayant les plus faibles caractéristiques de traction à chaud compatible avec l'application.
- Utiliser un procédé de soudage à faible énergie afin de limité le volume des passes et réduire ainsi la dimension de la ZAT à gros grains [26].

CHAPITRE IV : Dispositif expérimental

IV.1 Les 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 mis en solution à une température de $495 \pm 5^\circ\text{C}$, trempé à l'eau, écrouis et muri (vieillissement naturel), des tôles laminées de 2 à 2.5 mm d'épaisseur et de 200×200 mm de dimension [9], avec une composition chimiques donnée par le *tableau IV.1*.

Composition	Cu	Mn	Mg	Si	Zn
Teneur en % massique	3,8 – 4,9	0,3 – 0,9	1,2 – 1,8	0,5	0,25

Tableau IV.1 composition chimique du 2024 [18].

Le métal d'apport est un alliage d'aluminium à 3% de magnésium de nuance 5554.

IV.2. Equipements du poste soudage TIG

Les procédures expérimentales sont entièrement conçues, réalisées et mises au point à l'atelier de soudage du CSC dans le cadre des études de soudage TIG. Une vue d'ensemble de cet équipement est présentée dans la figure IV.1.

Figure IV.1 : Le poste de soudage est de type : FIM467-A Lincoln SQUARE WAVE TIG 355 CR99-15.



Le Square Wave TIG est un générateur de courant à caractéristiques plongeantes prévu pour les applications TIG continu ou alternatif et électrodes enrobées. Il est équipé d'un générateur de haute fréquence pour l'amorçage de l'arc électrique. Le Square Wave TIG 355 permet à l'opérateur un contrôle complet du courant de soudage avec en outre la possibilité de pré-régler les courants de soudage et d'amorçage. Il est équipé de fonctions telles que :

- Balance, 2 temps/ 4 temps
- Start control
- Contrôle du cratère final
- Soudage par points.

Ces fonctions simplifient considérablement le procédé de soudage TIG en permettant de « pré-régler » ou « programmer » le cycle de soudage. D'autre part le poste est équipé des fonctions pré-gaz et post-gaz

IV.3. Préparation des échantillons

IV.3.1. Enrobage

Afin d'éviter toute transformation structurales il est recommandé d'utiliser des résines d'enrobage à froid (*figure IV.2 et IV.3*).



*Figure IV.2 : enrobage à froid
TECHNOVIT 4071*



*Figure IV.3: accessoires pour l'enrobage
Moules d'enrobage en caoutchouc silicone.*

IV.3.2 Polissage

Des draps de différentes granulométries sont employés : 80, 120, 180, 400, 600, 800, 1000. Pour affiner le polissage, il est exigé de passer par l'étape de finition qui consiste à passer l'échantillon par le papier feutre avec une solution d'alumine de 5 et 3 μm et suivis d'une pate diamantée soluble dans l'eau (0,3 μm).

Le polissage est effectué au niveau du laboratoire du département de génie métallurgie d'école nationale polytechnique d'Alger, avec deux types de polisseuse. (*Figure IV.4*).



*Figure IV.4 : la polisseuse utilisée de type
« MECAPOL P200 »*

IV.4. Microscope optique

Un microscope optique utilisé dans le laboratoire de métallurgie au niveau du centre de recherche de soudage et contrôle, il est de type : Zeiss de différents agrandissements X50, X100, X200, X500, X1000 (*Figure IV.5*), doté d'une caméra CCD avec utilisation d'un logiciel ATLAS de traitement d'images (*Figure IV.6*).

La microscopie optique, du fait de son pouvoir de résolution insuffisant, n'est utilisée en pratique que pour la visualisation de la précipitation grossière sur des échantillons polis puis éventuellement attaqués par des réactifs spécifiques. Les images obtenues sont celles de figures d'attaque, riches d'enseignements sur la distribution des phases les plus grossières, les phases précipitées aux joints de grains et de sous-grains [9].



Figure IV.5 : les différents agrandissements de microscope Zeiss X50, X100, X200....

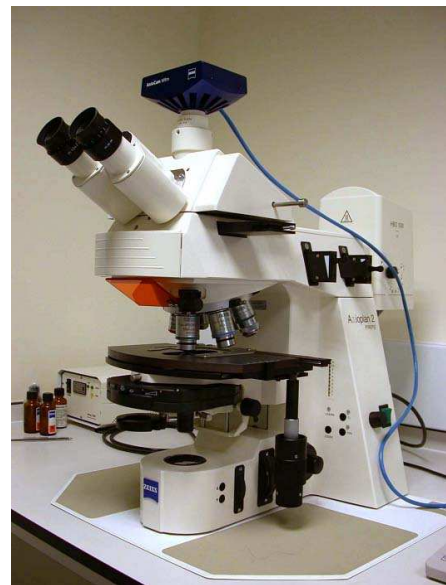


Figure IV.6 : un microscope de type Zeiss de différents agrandissement figure et occupée par une caméra CCD.

IV.5. 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 microdureté est réalisé au niveau du laboratoire de métallurgie du centre de recherche de soudage et contrôle (figure IV.8). Le principe est de mesurer les diagonales des empreintes laissées par un cône (figure IV.9), et avec une charge de 500g, ce choix nous a permet de comparer avec d'autre graphes de l'étude bibliographique.

Les empreintes sont réalisées par une pyramide droite à base carrée à l'aide d'une charge F. Le choix de F dépend de la dimension du pénétrateur utilisé et de l'épaisseur de l'éprouvette. La dureté de Vickers « Hv » est définie par :

$$\text{— en Kg/mm}^2$$

F : la charge appliqué.

d : la diagonal de l'empreinte

Comme $\alpha = 136^\circ$ est fixe on peut écrire : $Hv = 1.8544 F/d^2$



Figure IV.8: le microduromètre utilisée est de type BUEHLER LTD LAKE ILLINOIS.

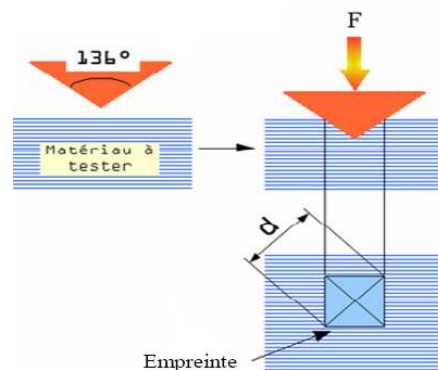


Tableau IV.9 essai de Vickers

IV.6. Contrôle radiographique

Le contrôle par radiographie consiste à faire traverser le matériau par un rayonnement électromagnétique de très courte longueur d'ondes (rayons X ou γ) et à recueillir les modulations d'intensité du faisceau incident sous forme d'une image sur un récepteur surfacique du type film photographique argentique ou capteur électronique du type amplificateur de brillance ou autre (figure IV.10) [32].

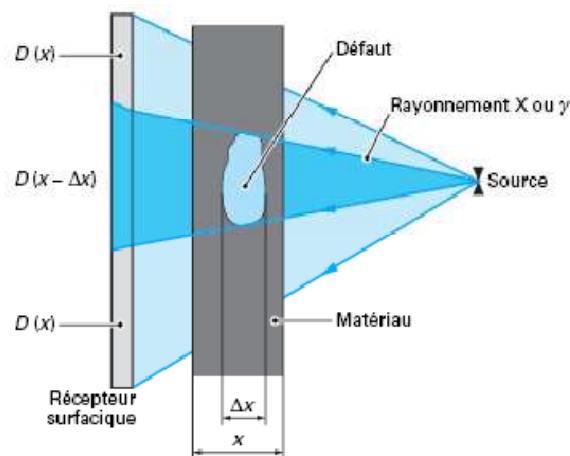


Figure IV.10 : Principe du contrôle par radiographie [32].

Le contrôle radiographie est réalisé au niveau du laboratoire de l'entreprise de grands travaux pétroliers de REGHAIA(GTP) .L'utilisation de cette technique permet de révéler les défauts de soudage : le manque de pénétration, fissurations, microfissuration, porosités.

IV.7. Le ressuage

Le contrôle par ressuage est une méthode de contrôle non destructif, très utilisée dans l'aéronautique, l'industrie de production d'énergie, les transports.

Le principe est :

1. Coupe d'un matériau comportant un défaut débouchant type fissure
2. La surface du matériau est enduite de pénétrant.
3. Le pénétrant est éliminé par lavage.
4. Le matériau est enduit de révélateur. Le défaut devient visible [33].

Ces quatre étapes sont présentées sur *la figure IV.11*.

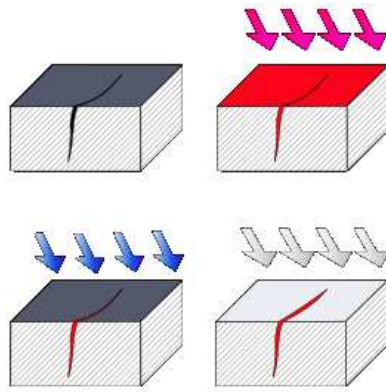


Figure IV.11 principe du ressuage [33].

CHAPITRE V : Conception et réalisation

La problématique à laquelle nous sommes confrontés est la mauvaise soudabilité de l'aluminium 2024, et la grande solubilité d'hydrogène à hautes températures ce qui provoque un taux élevé de porosité voir de fissuration à chaud.

V.1. Préparation des éprouvettes

V.1.1. Nettoyage de la surface

La préparation des éprouvettes s'effectue par un nettoyage de toutes saletés (graisse) et oxydes de surface (l'alumine) par un décapage mécanique par une brosse métallique « acier inoxydable ». On rappelle que le chanfreinage n'est pas nécessaire car les tôles sont de faibles épaisseurs (2 mm), on a appliqué le procédé TIG avec une position de bout à bout *figure V.1*, et différents paramètres,

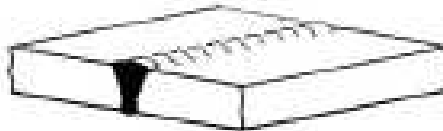


Figure V.1 soudage bout à bout

V.1.2. le bridage

Dans le cas de soudage d'aluminium cette étape est primordiale, car pendant le soudage les phénomènes de dilations et retraits provoquent des déformations (*figure V.2*). La *figure V.3* présente un bridage pour un soudage bout à bout.

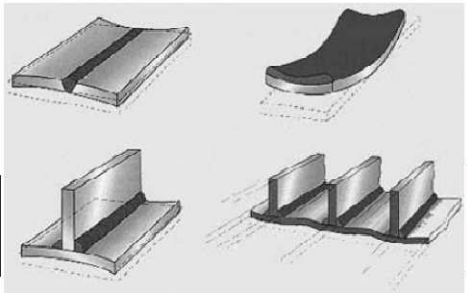


Figure V.2 Déformation longitudinale, transversale et angulaire [17]

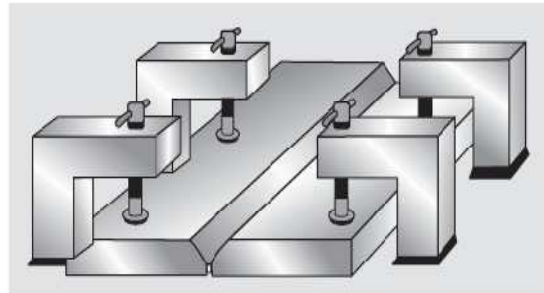


Figure V.3 bridage pour soudage bout à bout [17]

V.2. Opération de soudage

Cette opération est réalisée sur plusieurs éprouvettes avant de réussir la soudure sur l'alliage 2024. En effet, plusieurs paramètres sont testés à savoir :

- Deux types de gaz : argon industriel et argon pur.
- Intensité du courant utilisé.
- Diamètre de l'électrode de tungstène.

Quand à la vitesse de soudage qui est aussi un des paramètres influant, il nous est difficile d'apprécier son influence pour la simple raison que le facteur humain est rentré en jeu dans cette opération. L'automatisation du procédé TIG pourrait mettre en évidence cette influence.

On a utilisé un courant alternatif avec un courant superposé de haute fréquence (HF). Ce type de courant, nous assure une bonne pénétration pendant le cycle négatif et en même temps un bon nettoyage des films d'oxydes durant le cycle positif. Le courant superposé a 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 le zéro.

V.3. Influence des paramètres de soudage

Ces paramètres sont : l'Intensité(I), la tension(V) et la vitesse de soudage, ils déterminent l'énergie nominale définie par :

$$E_n = IU / v \text{ (J/mm)}.$$

Où v est la vitesse définie par la longueur soudée par le temps pris pour réaliser ce cordant :

$$v = x / tps \text{ (mm/s)}.$$

V.3.1. Influence de l'intensité

Afin de déterminer les paramètres idéaux de soudage, on a procédé à plusieurs testes de soudure, en variant l'intensité, les paramètres appliqués sont résumés dans chaque les tableaux ci-dessous.

Eprouvette 1 :

L'éprouvette 1 est soudée bout à bout sans métal d'apport et avec un gaz d'argon industriel, d'autres paramètre sont présentés dans *le tableau V.1.*

<i>Paramètres appliqués</i>	<i>Eprouvette 1</i>
I (A)	60
U (Volt)	14
V (mm/s)	0.72
E_n (J/mm)	1166.7
Type de gaz	Argon industriel
Débit de gaz (l/min)	9
Diamètre d'électrode de tungstène (mm)	2.5
Métal d'apport	sans
Diamètre de la buse (mm)	8

Tableau V.1 Paramètre de soudage pour l'éprouvette 1

Ces paramètres nous ont permis d'avoir:

- Une bonne pénétration avec formation de fessier.
- Un bel aspect du cordon.
- Une légère concavité.

Ces remarques sont exposées par la *Figure V.4*.



Figure V.4 Soudage de l'éprouvette 1

Eprouvette 2, 3 et 4 :

Pour améliorer la qualité du cordon, on a soudé avec un métal d'apport, afin d'éliminer toutes concavités.

L'éprouvette 2 est soudée avec deux passes dont la première passe sans métal d'apport et la seconde avec métal d'apport.

Les éprouvettes 3 et 4 ne sont soudées qu'avec un métal d'apport en une seule passe.

Les paramètres appliqués sont présentés dans *le tableau V.2*.

<i>Paramètres appliqués</i>	<i>Eprouvette 2</i>	<i>Eprouvette 3</i>	<i>Eprouvette 4</i>
I (A)	77	75	65
U (Volt)	12	12	13
V (mm/s)	1.11	0.9	1.2
E_n (J/mm)	832	1000	705
Type de gaz	Argon industriel	Argon industriel	Argon industriel
Débit de gaz (l/min)	10	10	9
Diamètre d'électrode de tungstène (mm)	3	3	2.5
Métal d'apport	avec	avec	avec
Diamètre de la buse (mm)	14	14	8

Tableau V.2 Paramètres appliqués sur les éprouvettes 2, 3 et 4

Les résultats obtenus sont les suivant :

- Un bel aspect du cordon.
- Disparition des concavités.
- Très bonne pénétration pour l'éprouvette 2.
- Manque de pénétration en certains endroits (éprouvette 3 et 4).

Ces résultats sont montrés dans les figures V.5, V.6 et V.7. :

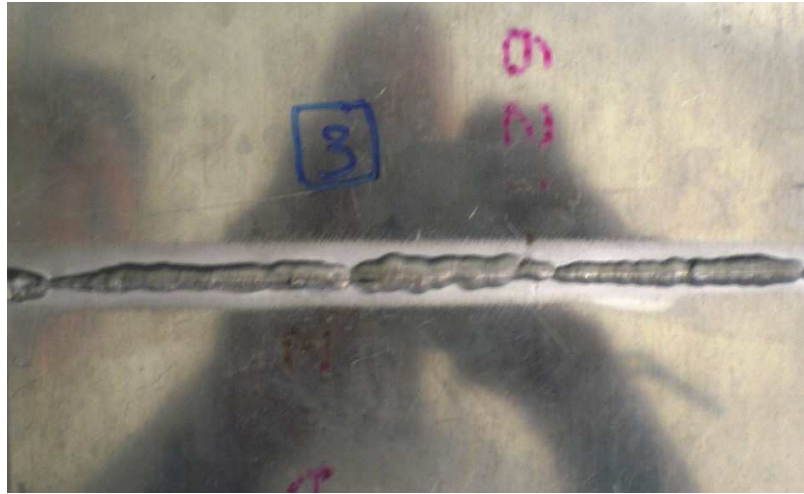


(a)



(b)

Figure V.5 Eprouvette 2



(a)



(b)

Figure V.6 Epreuve 3



Figure V.7 Eprouvette 4

V.3.2. Influence du type de gaz

Pour apprécier l'effet du gaz sur le soudage des tôles d'aluminium 2024 T3, on a choisis deux types de gaz, de l'argon industriel de l'ENGI et de l'argon pur dont les caractéristiques sont données par le certificat de conformité.

- Pureté : 99,9999%
- Hydrocarbures $\leq 0,1$ ppm
- $H_2O \leq 0,5$ ppm
- $O_2 \leq 0,5$ ppm
- $N_2 \leq 0,5$ ppm
- $CO + CO_2 \leq 0,1$ ppm
- Pression à 15°C : 200 Bar.

Eprouvette 5, 6, 7 et 8 :

Pour ces types de soudures on a utilisé de l'argon pur, les autres paramètres sont mentionnés dans le tableau V.3.

L'éprouvettes 5,6 et 7 sont soudées en bout à bout, sans métal d'apport et avec de l'argon pur.

L'éprouvette 8 soudé en bout à bout, avec métal d'apport et de l'argon pur.

<i>Paramètres appliqués</i>	<i>Eprouvette 5</i>	<i>Eprouvette 6</i>	<i>Eprouvette 7</i>	<i>Eprouvette 8</i>
I (A)	50	60	60	52
U (Volt)	15	14	14	15
V (mm/s)	0.52	1.43	1.44	1.5
E_n (J/mm)	1250	587.4	583.4	520
Type de gaz	Argon pur	Argon pur	Argon pur	Argon pur
Débit de gaz (l/min)	9	9	9	9
Diamètre d'électrode de tungstène (mm)	2.5	2.5	2.5	2.5
Métal d'apport	sans	sans	sans	avec
Diamètre de la buse (mm)	8	8	8	8

Tableau V.3 paramètres appliqués sur les éprouvettes 5, 6, 7 et 8

On a remarqué pour les mêmes conditions de soudage (les mêmes paramètres appliqués : métal d'apport, diamètre de l'électrode de tungstène, le débit..), que l'éprouvette 4 soudée par de l'argon industriel et l'éprouvette 8 soudée par de l'argon pur, une forte énergie d'ionisation produite lors du soudage à l'argon pur, ce qui nous a imposé de diminuer l'intensité jusqu'à 52 A comparée avec celle de l'éprouvette 4 qui est de 65.

V.3.3. influence du diamètre de l'électrode de tungstène

Cette influence est bien remarquable, car les cordons soudés par l'électrode de tungstène de 3 mm de diamètre sont plus larges que ceux soudés avec l'électrode à 2.5 mm. Autre observation qu'on a constatée est la variation de l'intensité, qui est proportionnelle au diamètre de l'électrode.

Les éprouvettes 2 et 3 sont soudées par une électrode de 3 mm. La moyenne de la largeur du cordon est de 12mm pour l'éprouvette 2, et de 10 mm pour l'éprouvette 3, par contre on a enregistré de 6 à 8 mm pour les éprouvettes soudées par l'électrode de 2.5 mm (*figure V.8*). Concernant les intensités les éprouvettes soudées avec l'électrode de 3 mm dépasse les 70 A, et par une électrode de 2.5 mm les intensités sont inférieures à 65 A.

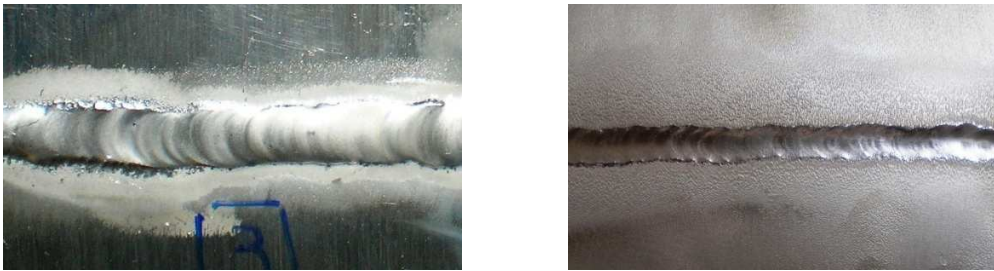


Figure V.8 Influence du diamètre d'électrode sur la largeur du cordon de soudure.

V.4. Conclusion

Des résultats obtenus, on est arrivé à déterminer les paramètres de soudage qui nous ont permis d'avoir un bon cordon de soudure et une bonne pénétration. Ces résultats, on peut les avoir avec une vitesse de soudage de 1.44 mm/s avec une intensité de 50 à 60 A, et un diamètre d'électrode de 2.5 mm.

L'utilisation des diamètres plus grands à 2.5mm nous donnera un cordon de soudure plus large ce qui n'est pas intéressant même si on obtient des résultats satisfaisants. En effet, un cordon moins large aura de meilleures propriétés qu'un cordon plus large du fait de l'augmentation de la zone d'influence thermique conséquence d'un apport important d'énergie.

Les impuretés dans le gaz de protection influent sur l'intensité de soudage, telle que pour un gaz industriel l'intensité utilisée est de 65 et pour un gaz d'argon pur l'intensité est de 50A.

CHAPITRE VI : Caractérisation des joints de soudure

Dans ce chapitre, plusieurs techniques de caractérisation non destructives en premier lieu et destructives en second lieu ont été utilisées.

VI.1. Caractérisation non destructive

Après chaque opération de soudage un contrôle visuel à la loupe binoculaire a été effectué suivi par un contrôle par ressuage et un contrôle par radiographie de rayons X.

VI.1.1. Contrôles visuels :

Ce contrôle nous permet de détecter tous défauts superficiels, pour notre cas des défauts de manque de pénétration (*figure VI.1*), des fissurations à chaud et à froid (*figure VI.2*), des inclusions de tungstène sont observés (*figure VI.3*) et perçage de tôles (*figure VI.4*).

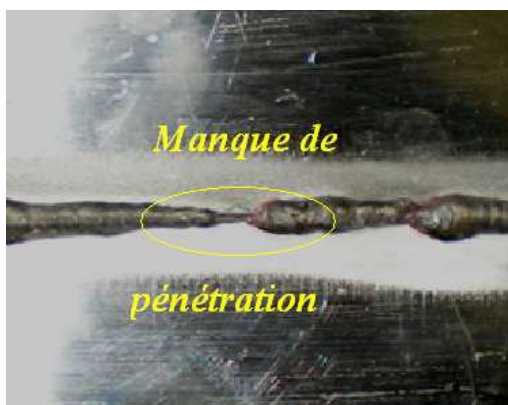


Figure VI.1 manque de pénétration

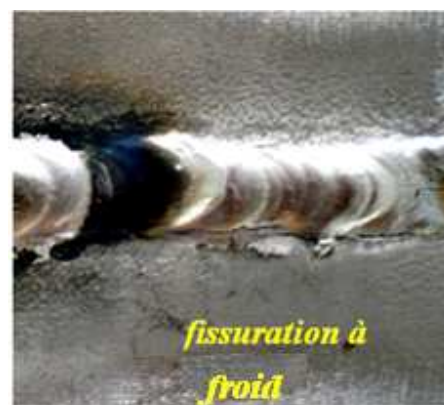


Figure VI.2 fissuration à froid



Figure VI.3 Perçage



Figure VI.4 Inclusions

VI.1.2. Ressuage :

Le ressuage est la technique de CND la plus utilisée. C'est le premier contrôle à effectuer sur une pièce afin de détecter les défauts débouchant en surface (craques, retassures,...) qui sont les plus courants et les plus dangereux. Le ressuage permet donc rarement de déterminer la nature, la forme et la dimension de ce défaut. La surface à contrôler est d'abord nettoyée et séchée puis elle est recouverte d'un pénétrant liquide contenant des traceurs fluorescents qui doit s'étaler parfaitement sur la surface et pénétrer dans les moindres discontinuités. L'excès de pénétrant restant en surface est éliminé par l'application d'un émulsifiant par immersion, puis la surface est séchée dans une étuve. Un révélateur fluorescent est appliqué sous forme de nuage de poudre micronisée qui fait ressortir le pénétrant hors des discontinuités. L'excès de poudre est ensuite éliminé par soufflage d'air et l'examen des indications est réalisé dans une chambre noire en utilisant un éclairage sous lumière ultraviolette pour détecter l'émission fluorescente provenant des défauts éventuels qui apparaissent en couleur jaune verte sous fond bleu. A la suite de cet examen sur les cordons de soudures endroit et envers des assemblages TIG de notre étude, aucun défaut de surface n'a été détecté.

VI.1.3. Radiographie X :

Le contrôle par radiographie de rayons X permet la détection des hétérogénéités, comme les inclusions métalliques, ainsi que les défauts de continuité, comme les défauts volumiques (soufflures, porosités, retassures, cavités, etc.) et les défauts bidimensionnels (manques de liaison dans le cas des soudures).

Ce contrôle est appliqué pour deux éprouvettes, l'une soudée par argon industriel et l'autre par l'argon pur, on rappelle que ces éprouvettes ont une très bonne pénétration et manque de tous défauts superficiels. Des résultats très satisfaisant sont obtenus, une absence de porosité et de fissuration.

VI.2. Caractérisation destructive

Elle 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 micro-dureté à travers le cordon de soudure.

VI.2.1. Etude métallographique :

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

- ✓ Préparation des Echantillons
- ✓ Enrobage
- ✓ Polissage

On dispose de deux types d'étude métallographique :

- La macrographie.
- La micrographie.

Seule la seconde sera traitée dans ce travail.

VI.2.1.1. Préparation des échantillons :

Cette étape consiste à prélever des échantillons du cordon en les coupant à froid, enrobage à froid et la dernière étape le polissage.

VI.2.1.2. Prélèvement :

On prend des coupes de 10 mm de largeur et 40 mm de longueur sur les pièces soudées *figure VI.5*, ces échantillons sont prélevés de façon aléatoire et d'éviter les endroits où présente les défauts.

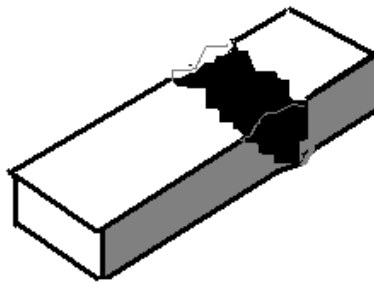


Figure VI.5 échantillon prélevé

VI.2.1.3. Enrobage

C'est un procédé de moulage qui consiste à envelopper l'échantillon dans une résine polymère. Cette opération est nécessaire pour faciliter la manipulation surtout des échantillons minces et d'assurer une planéité pendant l'opération de polissage. L'enrobage à froid se fait dans un moule de résine auto durcissant ; il est utilisé dans tous nos travaux pour éviter toutes les transformations qui peuvent être engendrés par l'échauffement de l'alliage. Il s'effectue dans des moules en plastique dans lesquels est placé l'échantillon au dessus duquel on verse la résine

liquide. Après environ 20 mn la résine se solidifie, l'échantillon est retiré du moule pour passer au polissage.

VI.2.1.4. 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 :

1^{ère} étape : polissage grossier : 80, 180, 400, 600

2^{ème} étape : polissage fin: 800, 1000, 1200.

3^{ème} étape : de finition en utilisant l'alumine (5 et 3 μm) et solution d'oxyde de chrome de 1 μm .

Concernant l'étape 2 et 3, entre deux opérations de polissage l'échantillon est rincé par l'éthanol, ensuite séché par séchoir. Pour rassurer un bon nettoyage des échantillons, un passage par l'ultra son a été fait.

VI.2.1.5. Observation métallographique :

L'observation de l'évolution structurale des matériaux, se fait par la microscopie optique. Cette technique comporte :

- La macrographie : utilisée avec des grossissements de l'ordre de 12,5 ;
- La micrographie : à une limite de grossissement de 50 jusqu'à 1200.

La micrographie de l'échantillon à l'état miroir ne permette pas d'avoir la structure, c'est pour ce la on utilise des attaques chimiques, par des réactifs relatifs à la nature du matériau et le type de la 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).

VI.3. la micrographie :

L'analyse métallographique nous montre clairement l'existence de quatre zones telles que présentées sur la bibliographie. Dans ce qui suit nous allons présenter les évolutions structurales des différentes zones.

La zone fondue (ZF) : caractérisée par des structures à grains fins equiaxes dendritiques *figure VI.6*. Caractéristique d'une transformation liquide solide avec une vitesse de refroidissement relativement lente.

La zone partiellement fondue (PFZ) communément connue comme zone de liaison : caractérisée par une structure à gros grains allongés avec une épitaxie caractéristique d'une transformation de la zone mixte liquide solide vers un solide avec une vitesse de refroidissement relativement rapide en comparaison avec celle de la ZF. Ceci est expliqué d'une part par une surchauffe des grains (grossissement exagérée du grain) et d'autre part par la vitesse de refroidissement rapide due au cycle thermique du soudage en cet endroit *figure VI.7*.

La zone affectée thermiquement (ZAT) : caractérisée par l'existence de deux types de morphologie de grains. Des grains à grain fins se trouvant dans la zone adjacente à la zone PFZ et des grains plus grands se trouvant à la zone de transition ZAT-MB *figure VI.8*.

Les grains fins sont expliqués par les températures de mises en solution atteinte lors de l'opération de soudage et des vitesses de refroidissements lentes dans cette zone. C'est ce qui est montré dans la bibliographie [34]. Quand à la deuxième morphologie de grain dans cette zone, elle est expliquée par une mise en solution partielle en cet endroit.

La zone métal de base (MB) : caractérisée par des grains polyédriques allongés caractéristique des structures de laminage *figure VI.9*.

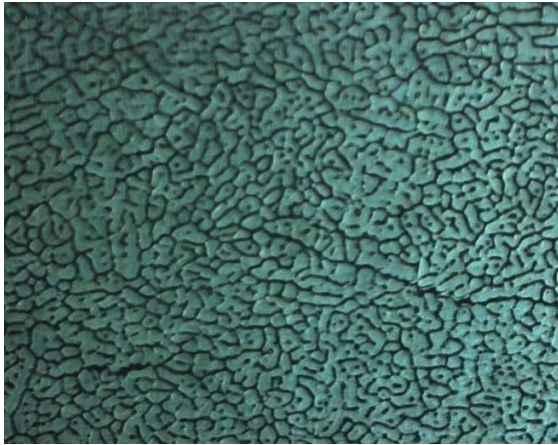


Figure VI.6 Zone fondue GX200

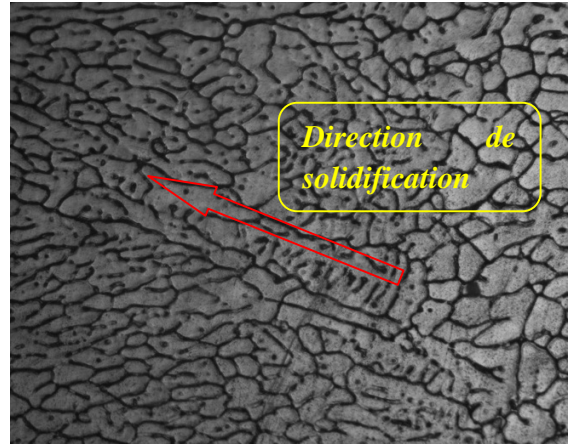
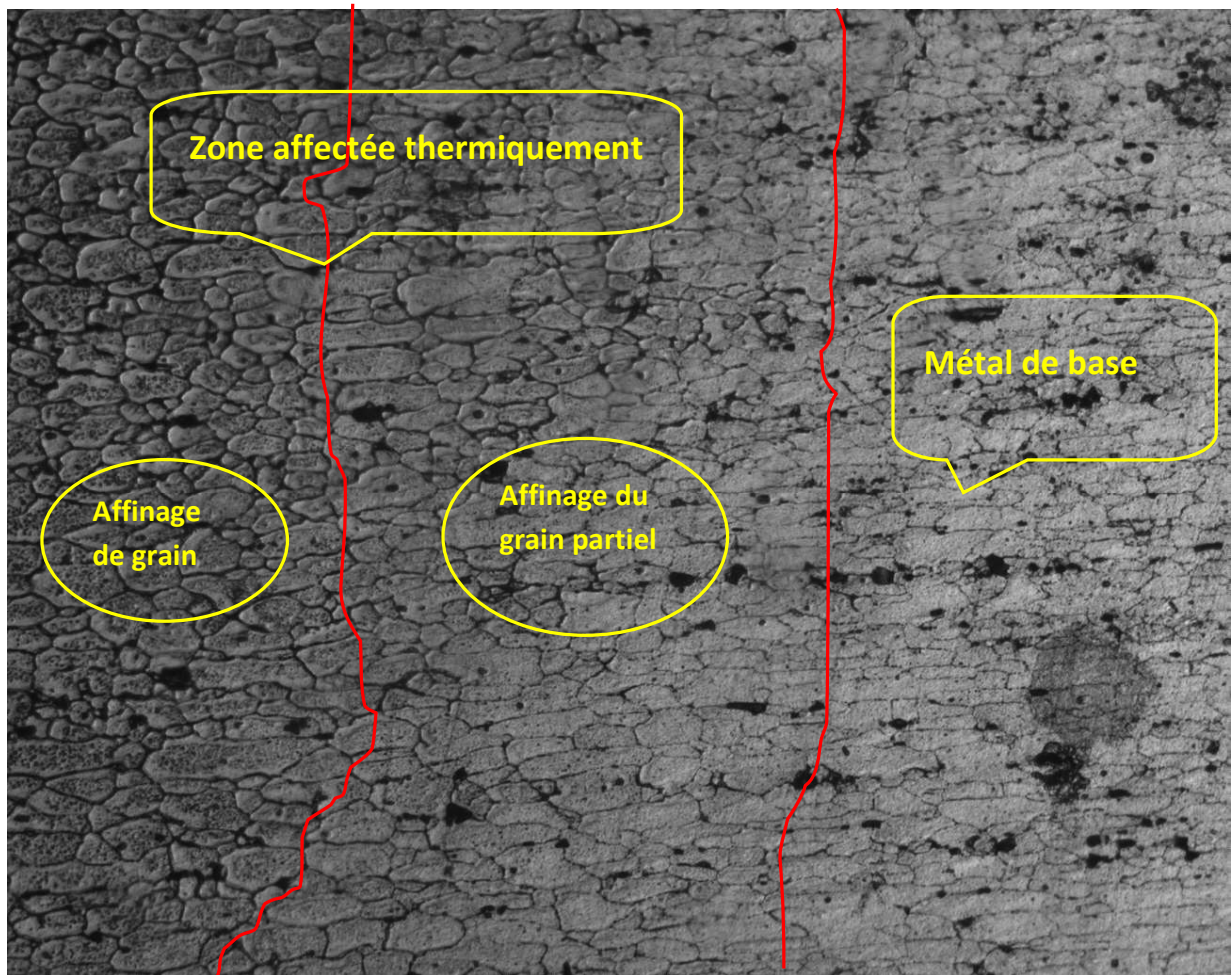
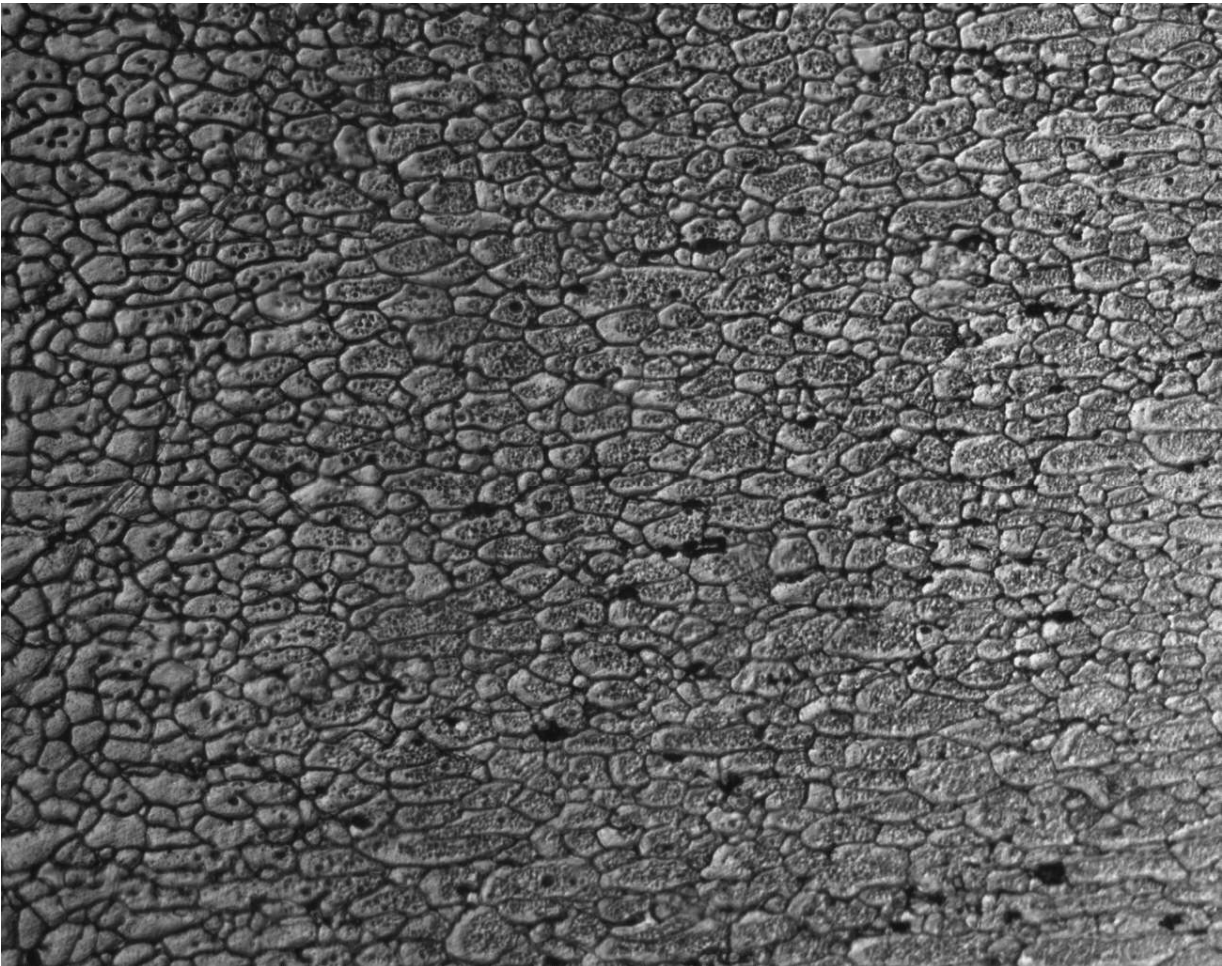


Figure VI.7 Direction de la dendrite (PFZ) GX500



(a)



(b)

Figure VI.8 affinage du grain dans la ZAT, (a) :GX100 ;(b) :GX200

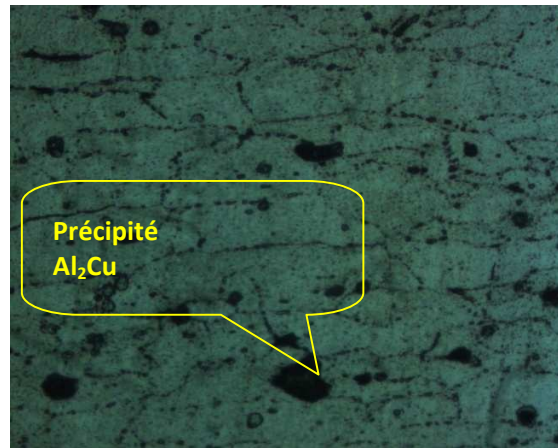


Figure VI.8 le métal de base GX 50

Les trois zones ZF, ZL, ZAT sont montrées dans la figure VI.9 et la figure VI.10.

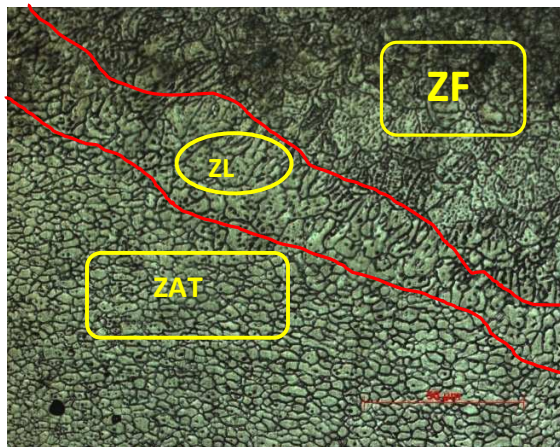


Figure VI.9 ZF_ZL_ZAT GX50

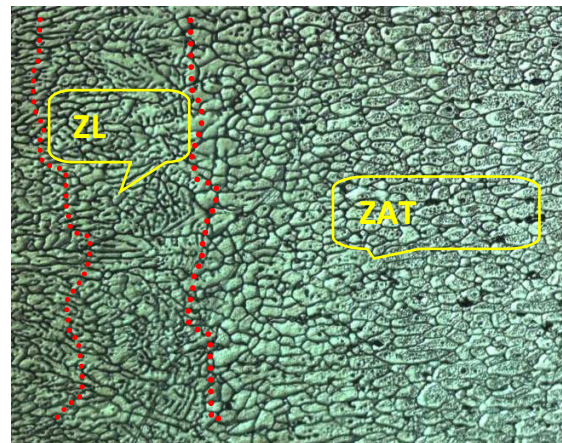


Figure VI.10 ZF_ZL_ZAT GX100

L'examen micrographique nous dévoile aussi les défauts internes, des soufflures, (**qui n'étaient pas visibles par le contrôle radiographique que nous expliquons par une mauvaise qualité du contrôle ou mauvaise qualité du film radiographique qui nécessite une plus grande sensibilité**) des fissurations, des microfissurations et des cavités, comme montrés sur les figures suivantes :

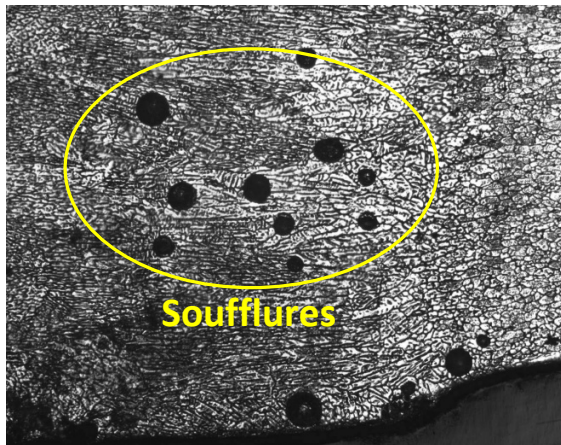


Figure VI.11 Porosité au niveau du bain de fusion GX50

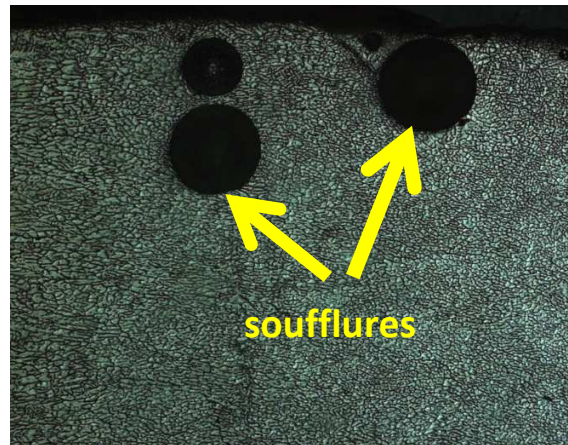


Figure VI.12 soufflures GX 50

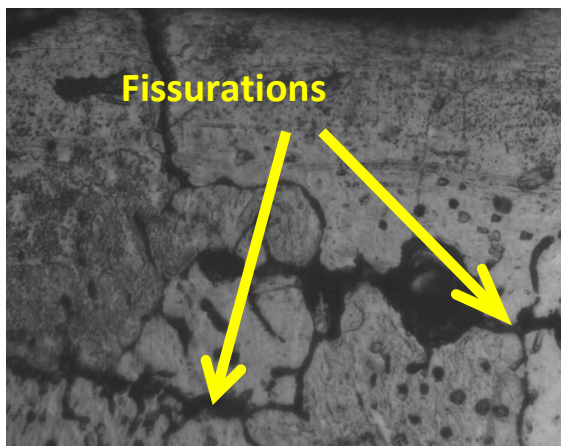


Figure VI.13 fissurations au niveau de la zone de liaison GX50

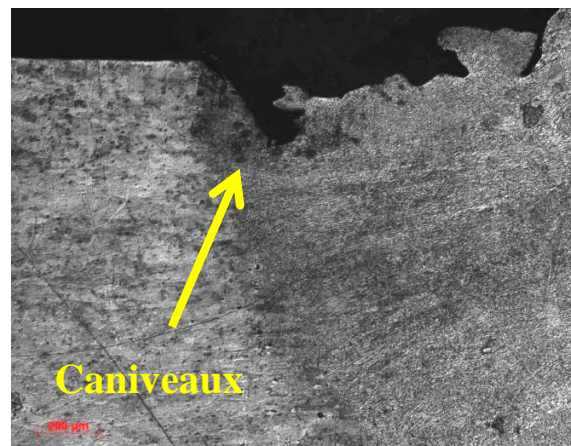


Figure VI.14 Formation de caniveaux GX50

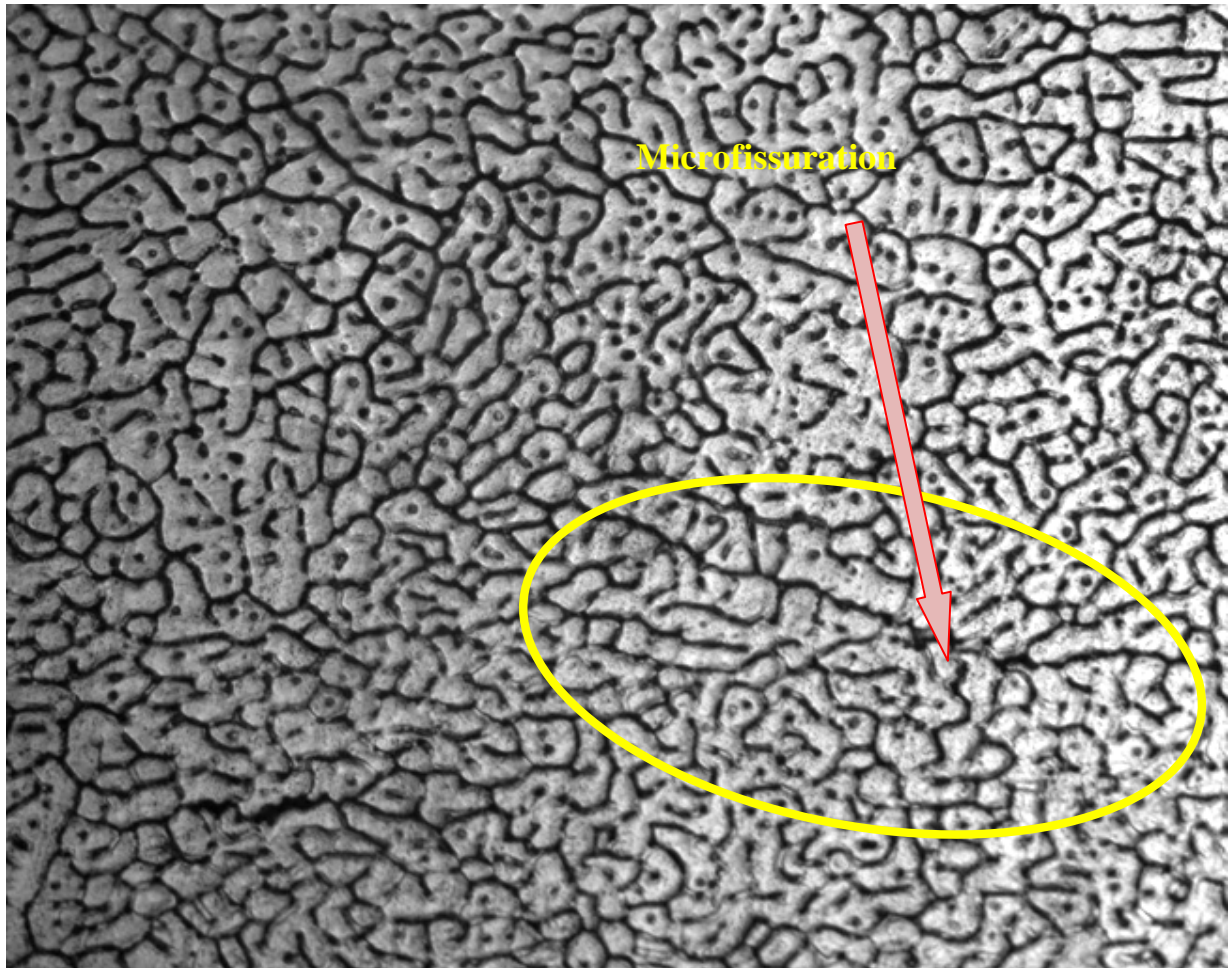


Figure VI.15 initiation à la microfissuration GX200

Les causes de ces défauts sont multiples comme l'a spécifié la bibliographie à savoir : la présence d'humidité, les additions de l'alliage et présence des films d'oxydes.

VI.4. Essai de microdureté :

L'utilisation de la microdureté nous permet d'évaluer les propriétés mécaniques d'évolution structurale obtenue. C'est un essai très utilisé dans le cas des soudures d'aluminium. Trois profils de mesures de dureté (*figure VI.16*) sont effectués du centre de la ZF vers le MB avec un pas de 0.3mm sous une charge de 500g. Les résultats expérimentaux sont donnés par le tableau suivant.

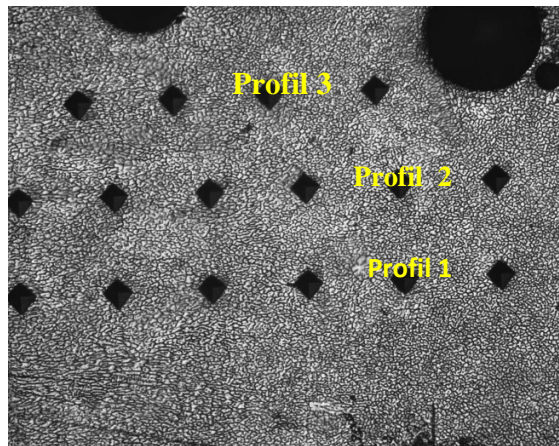


Figure 2.16 empreintes des trois profils d'essai de micro-dureté GX50

Distance (mm)	0	0,3	0,6	0,9	1,2	1,5	1,8	2,1	2,4	2,7	3,0	3,3	3,6	3,9
Profil 1(HV)	99.4	99.1	104.3	101	100	111	103	96	100	104	107	125	125	134
Profil 2(HV)	104	107	102	105	106	110	90	97	106	111	130	130	129	138
Profil 3(HV)	105	106	109	109	102	92	96	96	106	95	102	107	123	130

distance	4,2	4,5	4,8	5,1	5,4	6,6	6,9	8,1	8,4	8,7	9,0	9,3	9,6	9,9
Profil 1	130	133	135	130	132	137	140	128	123	112	125	112	106	109
Profil 2	143	136	135	137	140	137	133	120	116	111	117	111	108	110
Profil 3	144	140	144	136	134	136	137	130	132	128	126	123	118	116

distance	10,2	10,5	11,7	12,0	13,2	13,5	13,8	15,0	16,2	17,4	19,0	20,6	22,6	24,6
Profil 1	109	112	106	107	110	108	117	119	121	126	131	133	133	138
Profil 2	109	109	111	110	112	113	113	114	121	119	122	126	129	136
Profil 3	114	111	115	113	114	112	113	116	118	116	121	122	125	132

Tableau VI.1 valeurs de microdureté pour les trois profils

Ces valeurs sont présentées sur les courbes *figure VI.17* qui montrent l'évolution de la dureté en fonction de la distance.

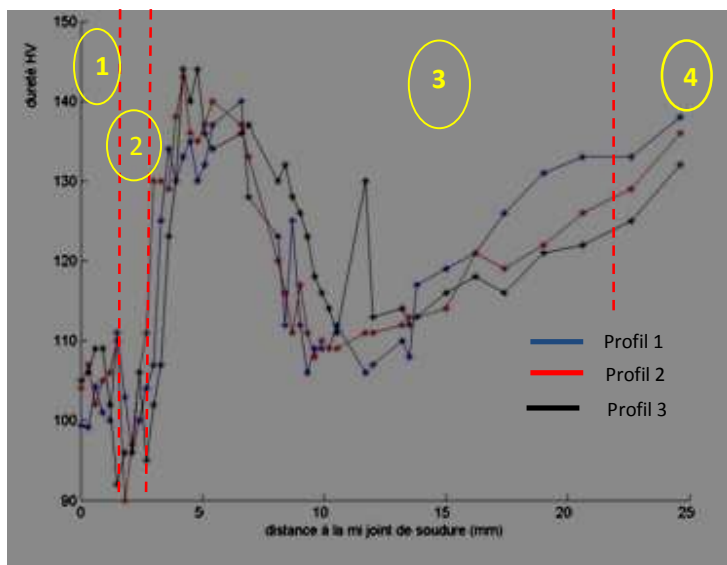


Figure VI.17 Evolution de la dureté à travers le mi-joint de soudure.

L'analyse des courbes montre que l'allure des duretés sont pratiquement les mêmes : une basse dureté dans la ZF suivie d'une montée dans les zones adjacentes à la ZF pour être aux maximum de dureté et rechuter de nouveau pour en augmenter.

En effet, les parties 1 et 2 correspondent à la ZF et ZL respectivement où les températures et transformation sont assimilées des refroidissements rapide. Elles sont caractérisées par des duretés faibles. Les valeurs prélevées varient entre 95Hv et 110Hv.

La partie 3 correspond à la ZAT qui est le siège de transformation à l'état solide dont une partie est à grains fins de dureté entre 125 et 143 Hv correspondant à la mise en solution. Par contre l'autre partie correspond à la mise en solution partielle voire des transformations de durcissement structural par précipitation de phases type GP, θ' , θ ce qui explique cette diminution des valeurs de dureté pour reprendre vers des valeurs de dureté du métal de base (partie 4).

VI.5. Conclusion

Dans ce chapitre, le joint soudé a été caractérisé par étude microscopique et par un contrôle CND. L'attaque chimique a permis de mettre en évidence la structure du cordon. Nous avons constaté que le joint soudé est constitué de cinq zones principales (MB, ZAT1, ZAT2, ZPF, MF). La structure de zone affectée thermiquement du côté de la ZPF caractérisée par un affinage du grain, cependant la structure de la zone affectée thermiquement du côté du métal de base caractérisée par grossissement du grain. Nous avons remarqué aussi que le métal fondu à une structure dendritique.

Les résultats de micro-dureté montrent que dans la ZF la dureté est faible par contre nous constatons une perte des propriétés mécaniques aux niveaux de la zone de liaisons, la zone affectée thermiquement.

Il faut souligner aussi que l'existence de défauts que se soit durant l'opération de soudage, ou l'existence de porosités qui reste encore un des problèmes du soudage des alliages 2024 à cause de la forte affinité de l'aluminium à l'hydrogène à l'état liquide.

Conclusion générale

L'objectif de cette étude est de réussir un bon cordon de soudure sur l'alliage 2024 T3, dont il y aura une bonne pénétration et une minimisation des défauts. Vu que le soudage d'aluminium est une technologie récente, il est difficile d'avoir des connaissances sur ce domaine, généralement il rentre dans le cadre du savoir faire.

Après plusieurs testes sur les éprouvettes d'alliages 2024 T3, on est arrivé à avoir les bons paramètres pour réussir la soudure. Un intervalle d'intensité de 50 à 60A pour un diamètre d'électrode de 2,5 mm, la vitesse de soudage est estimée entre 1,1 mm/s et 1,4 mm/s, sans oublier le rôle de la préparation de surfaces qui est le plus important de la réussite de ce cordon. La préparation de la surface se fait par l'élimination de la couche d'oxyde. Cela se fait par un décapage mécanique avec une brosse en inox, afin d'éviter toutes contaminations.

Les impuretés dans le gaz de protection influent sur l'intensité de soudage, telle que pour un gaz industriel l'intensité utilisée est de 65 et pour un gaz d'argon pur l'intensité est de 50A.

Le joint soudé a été caractérisé par étude microscopique. Nous avons constaté que le joint soudé est constitué de cinq zones principales (MB, ZAT1, ZAT2, ZPF, MF). La structure de zone affectée thermiquement du côté de la ZPF caractérisée par un affinage du grain, cependant la structure de la zone affectée thermiquement du côté du métal de base caractérisée par grossissement du grain. Nous avons remarqué aussi que le métal fondu a une structure dendritique.

Les résultats de micro-dureté montrent que dans la ZF la dureté est faible par contre nous constatons une perte des propriétés mécaniques aux niveaux de la zone de liaisons, la zone affectée thermiquement.

Il faut souligner aussi que l'existence de défauts que se soit durant l'opération de soudage, où l'existence de porosités qui reste encore un des problèmes du soudage des alliages 2024 à cause de la forte affinité de l'aluminium à l'hydrogène, et les fissurations à froid causées par le phénomène de dilatation thermique.

Il est évident qu'un tel travail sur ces alliages ne fait que commencer. Les résultats obtenus sont très appréciables. Evaluer ces résultats de bons ou de mauvais ne peut se faire dans l'immédiat pour les différentes questions qui nous restent encore posées.

Bibliographie :

[1] : Matériaux industriels : Matériaux métalliques. Auteur : Michel COLOMBIE et COLL (collection DUNOD-Paris septembre 2000, №1058). ISBN 210004575X.

[2] : Propriétés générales de l'aluminium et de ses alliages. Auteur : Christian VARGEL, techniques de l'ingénieur m4661. année 2008.

[3] : Écrouissage d'alliages d'aluminium. Auteur Bruno CHENAL, techniques de l'ingénieur m 230 année.2008.

[4] : Aluminium et alliages d'aluminium corroyés : propriétés métalliques. Auteur : Roger DEVELAY, techniques de l'ingénieur m438 année 2008.

[6] : Revue Métallerie 49-Spécial soudage –avril 2003, CLASSIFICATION DES ALLIAGES D'ALUMINIUM.

[7] : 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. Auteur : SÉBASTIEN MORIN. UNIVERSITE DU QUEBEC A CHICOUTIMI. Juillet 2002.thèse d'ingénieur.

[8] : Traitements thermiques des alliages d'aluminium. Auteur : Roger DEVELAY, techniques de l'ingénieur m1290 année 2008.

[9] Durcissement par précipitation des alliages d'aluminium. Auteur : Bruno DUBOST. Techniques de l'ingénieur m240 année 2008.

[10] : Collection terme et définition utilisés en soudage et techniques connexes, publications de la soudure autogène 1996.

[11] : Métallurgie et mécanique du soudage (Mécanique et ingénierie des matériaux). Auteur : Régis BLONDEAU. Hermès Lavoisier 2001.

[13] : Les procédés de soudage : Principes généraux et critères de choix. Auteur : Roland CAZES. Techniques de l'ingénieur B7700 année 2008.

[14] : Soudage à l'arc, auteur Roland CAZES, techniques de l'ingénieur B7730.

[15] : Aide mémoire procédés de soudage. Auteur: Weman CLAS. (Dunod 2005).

[16]: Meeting challenges in welding of aluminum alloys through pulse gas metal arc welding, Journal of Materials Processing Technology (2005).

[17]: *Welding Metallurgy SECOND EDITION. Auteur: Sindo Kou (2003).*

[18]: *Welding Brazing And Soldering, HAND BOOK V6.*

[19]: *Soudage et soudabilité métallurgique des métaux. Auteur : Guy MURRY. Techniques de l'ingénieur M715 année 2008.*

[20]: *W. F. SAVAGE, E. F NIPPES, A Study of Weld Interface Phenomena in Low Alloys Steel, Welding Journal Research Supplement (1976).*

[21]: *Encyclopedia of Materials: Science and Technology, ISBN: 0-08-043152-6.*

[22]: *DEVILLERS L., KAPLAN D., JANSEN J.P., simulation thermique des zones affectées par la chaleur en soudage multipasse des aciers de construction/ soudage et techniques connexes, mars-avril 1987.*

[23]: *Avril-mai-juin 2004 Le Feuillard technique - numéro 11.*

[24]: *Procédés et applications industriels du soudage (Mécanique et Ingénierie des matériaux). Auteur : Régis BLONDEAU. Hermès Lavoisier 2001.*

[25]: *A.M. Zahra, C.Y. Zahra et M. Laffitte Centre de Recherches de Microcalorimétrie et de Thermochimie du C.N.R.S. 26, rue du 141 ° R.I.A, 13003 Marseille, France (Received April 1, 1975)*

[26]: *Précis de métallurgie : élaboration, structures-propriétés et normalisation 5ème édition AFNOR NATHAN. Auteurs : J.BARRALIS, G.MAEDER.*

[28]: *E. Sarrazin. Modélisation du soudage d'alliages d'aluminium. PhD thesis, Ecole Polytechnique, 1995*

[29]: *W. J. D. Shaw. Characterization of weld microstructures in 2024 aluminum alloy. International Metallographic Society Technical, Denver, Meeting 1992.*

[30]: *The Welding of Aluminum and its Alloys (GENE Mathers) 2002.*

[31]: *Pièces mécaniques soudées : Conception des assemblages. Auteur : Alain MICHEL. Techniques de l'ingénieur BM5189.*

[27]: *T. Anderson. Filler alloy selection for aluminum welding. In J.G. Kaufman S.K. Daz and T.J. Lienert, editors, Aluminum 2001 - Proceedings of the TMS 2001 Aluminum Automotive and joining sessions*

[32] *Évaluation non destructive de la qualité des matériaux (Partie 1), auteur : Maurice WANIN. Techniques de l'ingénieur M4130 année 2008.*

[33] :www.wikipedia.org

[34]: *International Conference on NDT and Metal Industry (IC-NDT-MI'08) Annaba 12-14 May 2008.SOUDAGE TIG SUR L'ALLIAGE D'ALUMINIUM 2024 T3. Auteur: S.OUALLAM, A.DJEGHLAL, Jean-Éric MASSE, Laurent BARRALLIER.*
