



المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
Ecole Nationale Polytechnique

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la
Recherche Scientifique
Ecole Nationale polytechnique (E.N.P)



المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
Ecole Nationale Polytechnique

DÉPARTEMENT DE MÉTALLURGIE

Mémoire de fin d'étude

pour l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état en métallurgie.

***Etude des paramètres de soudage
TIG sur l'alliage de magnésium
AM60B.***

Réalisé par :

BOUAZIZ Salah

Proposé par :

Pr. A. DJAGHLAL

Codirigé par :

Mr. S. OUALLAM

Promotion 2006/2007.

ملخص:

الحام خلائط المغنيزيوم يبدي دور فعال في المجالات الصناعية، وخاصة صناعة السيارات و الطائرات و البائرات ... الخ. يهدف هذا العمل إلى تقييم تأثير عوامل اللحام على خليط المغنيزيوم AM60B. و هذا باستنباط الخصائص المميزة في مجال القابلية للحام ، ومعرفة العلاقة بين البنية المجهرية و ما يقابلها كتطورات في المميزات الميكانيكية في مختلف أنحاء الشريط الملحوم، و امكانية تحديد هذه المميزات و ربطها إلى العقب الحرارية للحام المولدة من طرف جهاز اللحام ذو التقنية TIG.

كلمات مفتاحية :

اللحام، التقنية TIG، المغنيزيوم، العقب الحرارية، المميزات.

RESUME :

Le soudage des alliages de magnésium présente un intérêt particulier dans le cadre de son application dans diverses industries automobile aéronautique et autres. Ce travail, Consistera à évaluer, dans le domaine de soudabilité opératoire, l'influence des paramètres de soudage sur l'alliage AM60B, 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, Magnésium, Cycles thermiques, Caractérisation

ABSTRACT:

The welding of magnesium alloys has a particular interest within the framework of its application in various aeronautical and automobiles and others industries. This work will consist in the evaluation, in the field of operational weldability, the influence of the welding parameters on AM60B alloy, and the weld characteristics. The evolutions of the mechanical and microstructural characteristics of joint will be finding out and will be connected to thermal cycle of welding related to TIG process.

KEY-WORDS:

Welding, TIG process, Magnesium, Thermals cycles, Characterisation

Dédicaces

Au-delà des personnes, des lieux et des temps, je dédie ce travail avec ma profonde conviction, à tous ceux qui ont toujours cru et sans doute à la Science. Cette lumière qui éclaire les esprits et leurs permet de transcender les limites installées par les sociétés et les cultures dans leurs périodes de dégénérescence.

À ceux qui savent concrétiser leurs idées et savent réussir.

À ceux qui ne portent que du bien pour les autres.

À ceux qui ne vivent que dans et par la vérité.

Je dédie ce travail à mes chers parents

À ma petite famille

À ma grande famille

À mes collègues et amis à L'ENR

Salah Bouaziz

Remerciements

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

Je tiens à remercier tout particulièrement mes deux encadreurs Monsieur. M^{ed}. A. DJAGHLAL et Monsieur S. OUALLAM pour leurs conseils qui m'ont été précieux ainsi que toutes les suggestions et remarques qu'ils ont formulées tout au long de ce travail.

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

- Les soudeurs de l'atelier de soudage du C.S.C.
- Mes amis en particulier : Othmane, Houcine, Djamal et Hichem.

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

SOMMAIRE

INTRODUCTION GENERALE.....	01
----------------------------	----

Première partie : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

Chapitre I PROPRIETE DE MAGNESIUM ET SES ALLIAGES	02
--	-----------

I.1 Origine du magnésium.....	02
I.2 Propriétés du magnésium pur et ses alliages.....	02
I.2.1 Propriétés cristallographiques.....	02
I.2.2 Propriétés physiques.....	03
I.2.3 Propriétés chimiques.....	03
I.2.4 Propriétés mécaniques.....	04
I.2.5 Propriétés électrochimiques.....	04
I.3 Corrosion des alliages de magnésium.....	05
I.3.1 Effet des éléments d'alliage.....	05
I.4 Traitements thermiques.....	06
I.5 Systèmes d'alliages de magnésium utilisés industriellement.....	07
I.5.1 Systèmes Binaires.....	07
I.5.1.1 Système Magnésium-Aluminium.....	08
I.5.2 Systèmes Ternaires et Quaternaires.....	09
I.5.2.1 Système Magnésium-Aluminium-Zinc.....	09
I.5.2.2 Système Magnésium-Argent-Terres Rares-Zirconium.....	09
I.6 Propriétés Technologiques des alliages industriels.....	10
I.6.1 Éléments d'additions usuelles.....	10
I.6.2 Éléments ajoutés exceptionnellement.....	10
I.6.3 Éléments nuisibles.....	11
I.7 Avantages et inconvénients.....	11
I.8 Applications.....	11
I.8.1 Industrie aéronautique.....	12
I.8.2 Industrie automobile.....	13
I.8.3 Electronique et informatique.....	13

Chapitre II SOUDAGE PROCEDES, PHENOMENES PHYSIQUE ET METALLURGIQUE

II.1 Introduction.....	14
II.2 Condition d'installation de la liaison métallique.....	14
II.3 Les phénomènes thermiques, métallurgiques dans la zone affectée par la chaleur en soudage.....	15
II.3.1 Cycles thermiques.....	15
II.3.2 Aspect thermique lié au soudage.....	16
II.4 Paramètre de refroidissement en ZAT.....	18
II.5 Caractéristiques de la soudure.....	19
II.6 Procédés de soudage.....	20
II.6.1 Classification des procédés de soudage.....	20
II.6.3 Principe de Soudage à l'électrode réfractaire (TIG).....	21

II.7 Effet des paramètres de soudage.....	22
II.7.1 Arc électrique.....	22
II.7.2 types de courants.....	22
II.7.2.1 caractéristiques du courant alternatif.....	22
II.7.2.2 Soudage TIG Pulsé.....	23
A) Définition du Procédé.....	23
B) Durée et fréquence des impulsions.....	24
C) vitesses de soudage.....	24
D) Avantage des pulsations de courant en soudage TIG.....	24
II.7.3 Les gaz de soudage (Procédés soudage sous flux gazeux avec électrode infusible).....	25

Chapitre III SOUDAGE TIG DU MAGNESIUM

III.1 Introduction au Soudage de Magnésium et ses Alliages.....	28
III.2 Choix du Procédé de Soudage.....	28
III.3 Aptitude au soudage du magnésium et de ses alliages.....	29
III.4 Modification microstructurales en zone affectée par la chaleur.....	30
III.4.1 Conséquences métallurgiques des cycles thermiques de soudage.....	30
III.5 Traitements de mise en solution et de trempe.....	31
III.5.1 Principes et effets du traitement.....	31
III.5.2 Alliages magnésium-aluminium-zinc.....	31
III.5.3 Mécanismes en action pendant les traitements thermiques.....	32
III.5.4 Traitements thermiques et soudage.....	32
III.6 Soudage.....	32
III.6.1 Préparation du magnésium pour le soudage.....	32
III.6.2 Types de joints.....	32
III.6.2.1 Forme des joints et préparation des bords.....	33
III.6.3 Matériels employés.....	33
III.6.4 Exécution des soudures.....	34
III.6.5 Dégraissage et décapage des bords.....	34
III.6.6 Postes de soudage.....	34
III.6.6.1 Pointage.....	34
III.6.7 Mode opératoire.....	35
III.6.7.1 Soudage bout à bout à plat.....	35
III.6.8 Soudage TIG avec protection gazeuse améliorée.....	35
III.6.9 Soudage des pièces moulées en magnésium.....	36
III.7 Méthodes et critères de validation des paramètres d'assemblages.....	36
III.7.1 Contrôles non destructifs (CND).....	36

Deuxième partie : ETUDE EXPERIMENTALE

Chapitre IV CONCEPTION ET REALISATION DU DISPOSITIF EXPERIMENTAL

IV.1 Eléments du dispositif expérimental.....	38
IV.1.1 Matériaux.....	38
IV.1.2 Equipements du poste soudage TIG.....	38
IV.1.3 Thermocouple.....	39
IV.1.4 Enrobage.....	39

IV.1.5 Polissage.....	40
IV.1.6 Polissage de finition.....	40
IV.1.7 Polisseuse.....	41
IV.1.8 Microscope optique.....	41
IV.1.8.1 Les constituants d'un microscope optique.....	42
IV.1.9 Micro-duromètre.....	42

Chapitre V RESULTATS ET DISCUSSIONS

Partie A Mode Opérateur

V.A Le soudage de l'AM60B.....	43
V.A.1 Effets des paramètres de soudage.....	43
V.A.1.1 Effet de la vitesse de soudage sur la largeur et la pénétration du cordon.....	43
V.A.1.2 effet de la répartition de la chaleur.....	44
V.A.1.3 Effet de l'intensité sur la stabilité de l'arc.....	46
V.A.2 Maîtrise des paramètres de courant Pulsé et Alternatif du poste de soudage.....	48
V.A.2.1 Effet des paramètres en mode Pulsé sur les soudures.....	53
V.A.2.2 Effet des paramètres en courant alternatif sur les soudures.....	55

Partie B Caractérisation Métallurgique

V.B.1 Etude métallographique.....	59
V.B.1.1 Préparation des échantillons.....	59
V.B.1.2 Prélèvement.....	59
V.B.1.3 Enrobage.....	59
V.B.1.4 Polissage.....	59
V.B.1.5 Observation Métallographique.....	60
V.B.2 La Microdureté.....	68
V.B.2.1. Principe de l'essai de microdureté.....	68

CONCLUSION GENERALE.....	76
--------------------------	----

Troisième partie : REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

BIBLIOGRAPHIQUE.....	78
----------------------	----

INTRODUCTION GENERALE

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

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

Le TIG comme procédé d'assemblage des alliages non ferreux fait son apparition durant la 2^{ème} guerre mondiale et ses applications sur les alliages de magnésium remonte aux années 60.

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

Notre travail consiste à une étude comparative du soudage TIG en mode pulsé et en mode alternatif. Il est à noter que les deux modes sont nouvellement appliqués sur un nouveau matériau qui est l'alliage AM60B. De ce fait, nous sommes devant des défis Opératoires dans un premier temps ,de maitrise, des effets du courant pulsé en montrant les effets des différents paramètres qui le régissent sur l'obtention d'un arc stable et Métallurgiques dans un second temps en analysant le comportement de l'alliage AM60B par une étude métallographique et mécanique par mesure de profils de microdureté en utilisant les deux modes du soudage TIG.

J'espère bien que les étudiants Ingénieurs de la métallurgie trouveront dans ce travail un apport scientifique et un intérêt professionnel.

PARTIE

1

ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

CHAPITRE

I

PROPRIETE DE MAGNESIUM
ET SES ALLIAGES

PROPRIETE DE MAGNESIUM ET SES ALLIAGES

I.1 Origine du magnésium

Le magnésium est le huitième élément de l'écorce terrestre qui en contient plus de 2%.

Il est extrait des matières de base répertoriées dans le [Tab.1].

Que l'on parte de l'une quelconque de ces sources, les principaux procédés de fabrication du magnésium passent par l'obtention de la magnésie en calcinant les minerais ou en précipitant l'eau de mer au moyen de chaux. La magnésie est ensuite traitée par deux voies différentes :

- dans le procédé électrolytique, elle est transformée en chlorure anhydre (par chloruration de la magnésie calcinée) qui est ensuite électrolysé ;
- dans les procédés thermiques (silicothermie) la magnésie est réduite à haute température, sous vide par de puissants réducteurs [1].

Tableau.1 matières premières de base pour l'extraction du magnésium [2].

Minerais	Nature	Formule	Teneur en Mg (%)
Brucite	hydroxyde	Mg(OH) ₂	42
Magnésie	carbonate	MgCO ₃	29
Serpentine	Silicate	H ₄ Mg ₃ Si ₂ O ₉	26
Olivine (chrysolite)	Silicate	(Mg, Fe) ₂ , SiO ₄	19
Kieserite	Sulfate	MgSO ₃ , H ₂ O	18
Dolomite (dolomie)	Carbonate	CaCO ₂ , MgCO ₃	13
Langbeinite	Sulfate	2MgSO ₄ , K ₂ SO ₄	12
Epsomite	Sulfate	MgSO ₄ , 7 H ₂ O	10
Kainite	Sulfate	MgSO ₄ , KCl, 3H ₂ O	10
Carnallite	Chlorure	MgCl ₂ , KCl, 6H ₂ O	9
Polyhalite	Sulfate	2CaSO ₄ , MgSO ₄ , K ₂ SO ₄ , 2H ₂ O	4
Saumures	Chlorure	MgCl ₂ , NaCl, CaCl ₂ , nH ₂ O	1 à 2,8
Eau de mer	Chlorure	MgCl ₂	0,13

I.2 Propriétés du magnésium pur et ses alliages

Le magnésium est un métal d'aspect blanc argenté, malléable quand il est pur, dont la masse volumique est égale aux deux tiers de celle de l'aluminium (1,74 g/cm³ contre 2,7 g/cm³ pour l'aluminium), le quart de celle du fer et le cinquième de celle du cuivre [3]. C'est le moins dense de tous les métaux industriels [1].

I.2.1 Propriétés cristallographiques

Il possède une structure cristalline hexagonale compacte. Les plans sont rangés suivant le type ABA [4].

Les paramètres de mailles sont indiqués dans le tableau ci-dessous [Tab.2].

I.2.2 Propriétés physiques

Il appartient au groupe II A de la classification périodique de Mendeleïev (Be, Mg, Ca, Sr, Ba, Ra). Bivalent, il cristallise dans le système hexagonal compact, phénomène qui influe notablement sur ses propriétés mécaniques et plastiques. Les coordonnées du point triple montrent que, sous un vide de 200 Pa à la température de 650°C, le magnésium se sublime. Cette particularité est exploitée dans la quasi-totalité des procédés d'élaboration du métal par voie de réduction thermique de ses minerais et dans les procédés d'obtention de métal de haute pureté par sublimation, mais elle interdit la fusion sous vide du métal et de ses alliages, [3].

Son coefficient de dilatation linéaire entre 20 et 500°C est égal à $29,9 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$, il possède donc un retrait à l'état solide de 1,8% (de 1,2 à 1,3% pour ses alliages). Il permet des échanges thermiques faciles [1].

Tableau.2 Propriété physique du Magnésium pure [5].

Chaleur Latente de Vaporisation	5150 - 5400 kJ / kg
Chaleur Latente de Sublimation	6113 - 6238 kJ / kg
Densité	1.738 g / cm ³
Point de Fusion	650 ° C
Coef de Dilatation Thermique	$25.2 \times 10^{-6} / \text{K}$
Chaleur Spécifique	1.025 kJ / kg.K à 20 ° C
Chaleur Latente de Fusion	360 - 377 KJ / kg
Chaleur de Combustion	25.020 kJ / kg
Point d'Ebullition	1090 ° C
Résistivité Electrique	$4.45 \ \Omega \cdot \text{m} \times 10^{-8}$
Structure Cristalline	Hexagonal compacte $a = 0.32092 \text{ (Å)}$ $c = 0.52105 \text{ (Å)}$ $c/a = 1.633 \text{ (Å)}$

I.2.3 Propriétés chimiques

Le magnésium est un réducteur puissant du fait de sa très grande affinité pour l'oxygène et de sa très forte chaleur de combustion (610 280 J/mol) [3].

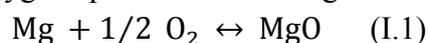
L'oxydation à température ambiante est lente. C'est à partir de 70 °C que le magnésium décompose l'eau, d'autant plus vite que la température est élevée.

Il est attaqué par tous les acides, à l'exception de l'acide chromique, qui dissout les produits de corrosion tel que $\text{Mg}(\text{OH})_2$, et l'acide fluorhydrique, qui dépose à la surface des pièces une pellicule protectrice de MgF_2 .

Il résiste bien aux produits basiques.

La plupart des composés organiques n'attaquent pas le magnésium à l'exception du méthanol et, à moindre degré, la glycérine et le glycol.

Le magnésium réagit avec l'oxygène pour former la magnésie selon la réaction suivante :



Avec $\Delta G_0 = -500000 \text{ J/mol}$ à 645 °C.

L'oxyde formé (MgO), très stable, forme un film protecteur dans une atmosphère sèche jusqu'à 450 °C. Au-delà de 475 °C, l'épaisseur d'oxyde atteint une valeur critique.

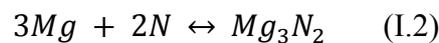
Des fissures se forment dans la couche d'oxyde par lesquelles l'oxygène peut diffuser jusqu'à la surface même du métal et y réagir.

La cinétique d'oxydation est fortement influencée par la présence d'humidité dans l'air et de certains éléments d'alliage dans le métal.

La combustion vive du magnésium au contact de l'air ne se produit que si le métal est porté à une température supérieure à celle de son point de fusion.

Si le métal se présente sous une forme divisée, le point d'inflammation peut descendre jusqu'à 310 °C et dans ce cas, l'inflammation se propage à l'ensemble du fragment concerné.

Le magnésium se combine avec l'azote pour donner un nitrure, Mg_3N_2 , à des températures proches de la température de fusion :



Ce nitrure se forme assez rapidement vers 700 °C, altérant à la fois les propriétés mécaniques et la tenue à la corrosion de l'alliage. C'est pourquoi ce gaz n'est pas utilisé en fonderie pour les alliages de magnésium [1].

I.2.4 Propriétés mécaniques

Les propriétés mécaniques du magnésium pur sont médiocres (à l'état filé, la contrainte à rupture est 200 MPa, la limite d'élasticité est 50 MPa, l'allongement à rupture de 10 % et le module d'élasticité de 47000 MPa). L'addition d'autres éléments permet une amélioration de ces caractéristiques, Généralement les alliages de magnésium ont des caractéristiques mécaniques inférieures (ou équivalentes, notamment en fatigue) à celle des alliages d'aluminium ou titane [Tab.3] [6].

Tableau.3 : Caractéristiques Mécaniques de Quelques Alliages de Moulage à Température Ambiante (norme ASTM) [7].

Alliage	Traction			Compression		Cisailli ^t	Fatigue ¹	Dureté Brinell HB	Module d'élast. (GPa)
	R_m (MPa)	$R_{0.2}$ (MPa)	A (%)	RC (MPa)	$R_{0.2}$ (MPa)	R_{cis} (MPa)	Sans entaille (MPa)		
AZ91D	230	150	3	400	165	140	70	75	45
AM50A	220	120	6-10	-	-	-	70	57	45
AM60B	220	130	6-8	-	130	-	70	62	45

I.2.5 Propriétés électrochimiques

Le magnésium est le plus électronégatif des métaux actuellement utilisés en construction mécanique, cette position oblige à employer certaines précautions lorsqu'il est en contact avec d'autres métaux.

En contrepartie, certains alliages de magnésium sont utilisés couramment pour la protection cathodique d'un certain nombre de structures métalliques telles que : chauffe-eau à accumulation, oléoducs ou gazoducs enterrés, etc. [3].

I.3 Corrosion des alliages de magnésium

La corrosion présente des aspects différents selon que les alliages de magnésium sont utilisés isolément, dans ce cas, il s'agit d'une attaque chimique, ou en contact avec d'autres métaux, il s'agit d'une corrosion galvanique.

Le magnésium possède trois caractéristiques prépondérantes vis-à-vis des phénomènes de corrosion :

- Un pouvoir réducteur important ;
- Une grande réactivité vis-à-vis des acides et de leurs sels ;
- Un potentiel fortement électrochimique par rapport aux autres métaux. En effet, du fait de la valeur élevée de son potentiel électrochimique, le magnésium se comporte comme anode quand il est couplé à un autre métal en présence d'un électrolyte.

Les deux premières propriétés jouent un rôle sur les phénomènes d'attaque chimique tandis que la troisième se manifeste surtout dans l'attaque électrochimique [8].

I.3.1 Effet des éléments d'alliage

La **figure.1** montre l'effet de différents éléments d'addition dans les alliages de magnésium, dans une solution à 3 % NaCl.

Le fer, le nickel, le cobalt et le cuivre ont un effet dramatique sur la résistance à la corrosion des alliages de magnésium. Ils sont considérés comme des impuretés, leur teneur doit être maîtrisée.

Dans les alliages binaires magnésium-aluminium, la présence de fer provoque la formation d'une phase Fe-Al très réactive.

Le manganèse joue, quand à lui, un rôle anti-corrosion. Il élimine l'effet nocif des impuretés qui se combinent avec le magnésium pour former des composés intermétalliques constituant des microcathodes en présence d'un milieu corrosif.

La présence de manganèse permet une tolérance plus large des impuretés dans la limite du respect d'une certaine proportionnalité.

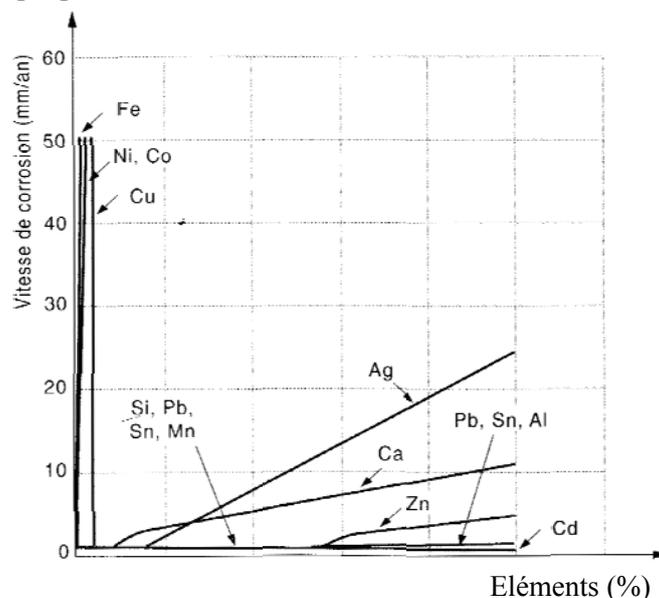


Figure.1 Effets des éléments d'addition sur la vitesse de corrosion [1].

Par exemple, dans l'alliage GA9Z1, le ratio Fe/Mn doit être inférieur à 0,032 pour une amélioration du comportement à la corrosion, avec la formation d'une phase (Fe, Mn) Al₃ moins réactive.

L'yttrium joue aussi ce rôle anti-corrosion.

Le zinc améliore aussi le comportement de la corrosion des alliages contenant du fer.

Les derniers alliages développés, tels que GA9Z1D ou E (avec un faible taux d'impuretés) et les WE43-WE54 ont une bien meilleure résistance à la corrosion que les alliages antérieurs GZ4TR et Gag2.5TR.

Avec un traitement de surface adéquat, ils présentent un comportement voisin de celui des alliages d'aluminium [1].

I.4 Traitements thermiques

La plupart des alliages de fonderie sont traités thermiquement. On emploie des traitements classiques :

- de mise en solution,
- de précipitation,
- de maturation,
- de stabilisation.

Les traitements thermiques à haute température doivent se faire sous une atmosphère contrôlée de CO₂ ou de gaz neutre.

Le [Tab.4] donne les traitements à suivre dans le cas de quelques alliages de fonderie et de corroyage.

Le [Tab.5] donne les conditions de traitement thermique généralement appliquées sur quelques alliages de magnésium.

Les traitements de détente et de stabilisation sont employés pour réduire ou supprimer les contraintes internes résiduelles dans les pièces qui pourraient se déformer.

Il est souvent utile, dans le cas de soudures nombreuses ou volumineuses par rapport aux éléments assemblés, de faire subir aux ensembles soudés un traitement de détente après l'opération de soudure [9].

Tableau.4 Traitement thermique de détente de quelques alliages de magnésium [9].

Alliage	Stabilisation, détente	Observation
GA8Z1	2 h à 300 °C	Pour une température supérieure à 330 °C, mise en solution des constituants Mg ₁₇ Al ₁₂ .
GZ4TrZr GZ5Tr2Zr	2 h à 330 °C	
GAg3Tr2Zr	2 h à 330 °C	Lors d'un traitement complet T6 (T4 + T5), le traitement de détente devient inutile.
GTr3Z2Zr	10 h à 250 °C	Une température plus élevée affecterait la tenue au fluage.
GTr3Z2Zr	16 h à 310 °C	
GA6Z1	1/4 h à 250 °C	Après matriçage, 4 à 5 h à 150 °C

Tableau.5 Traitement thermique de quelques alliages de magnésium [9].

Alliages		Mise en solution T4	Précipitation maturation T5	Remarques
Alliages Mg-Al-Zn	GA8Z1 GA9Z1	24 h à 400 °C Trempe à l'air soufflé 24 h à 400 °C Trempe à l'air soufflé	16 h à 200 °C 16 h à 200 °C	T4 → Dissolution des constituants $Mg_{17}Al_{12}$ et $Mg_3Al_2Zn_3$ formé à l'état brut de coulée à l'intérieur des grains de solution solide. homogénéisation des propriétés mécaniques. T5 → Décomposition de la solution solide. apparition de zones à faciès perlitique. Amélioration de la limite d'élasticité.
Alliages Mg-Zr	GZ4TrZ GTr3Z2Zr GTr3Z2Zr GAg3Tr2Zr	Néant Néant Néant 4 à 8 h à 530°C Trempe à l'eau	2 h à 330 °C 16 h à 200 °C 16 h à 200 °C 16 h à 310 °C 8 h à 20 h à 200 °C	T4 → Dissolution du constituant riche en Mg-TR formé autour de la solution solide complexe Mg-Ag- TR-Zr. T5 → Précipitation aux joints des grains de la quantité de solution solide hors d'équilibre à la température de traitement. Augmentation des caractéristiques de traction.
Alliages Mg-Tr-Y	W E43 W E54	8 h à 525 °C Trempe à l'eau chaude ou glycol 8 h à 525 °C Trempe à l'eau chaude ou glycol	16 h à 250 °C 16 h à 250 °C	T4 → Remise en solution De l'eutectique (type $Mg_{14}Nd_2Y$). T5 → Différentes étapes de précipitation analogues à celles des alliages Al-Cu. Phase $\beta'' \rightarrow \beta'$ ($Mg_{12}NdY$) → β ($Mg_{14}Nd_{12}$). augmentation de la dureté et maintient des caractéristiques mécaniques.

I.5 Systèmes d'alliages de magnésium utilisés industriellement

De nombreuses recherches systématiques ont été poursuivies dans le but de mettre au point des alliages possédant des caractéristiques supérieures à celles du métal de base dans les domaines de la résistance mécanique à chaud ou à l'ambiante, de la résistance à la corrosion, des propriétés de fonderie, etc. [3].

I.5.1 Systèmes Binaires

Dans ces alliages, le magnésium est allié à des éléments susceptibles de former des solutions solides plus ou moins concentrées en élément d'addition. On distingue principalement deux types de systèmes :

- ceux qui présentent des points eutectiques et dans lesquels la solubilité de l'élément ajouté excède généralement 1 % ; parmi ceux-ci figurent les alliages de magnésium avec des éléments tels que l'aluminium, l'argent, le zinc, le lithium, etc. ;

➤ ceux qui présentent un point péritectique ; les plus connus sont les alliages de magnésium avec le manganèse ou le zirconium.

Les plus anciennement utilisés ont été les systèmes du premier type ; en particulier les systèmes Mg-Al et Mg-Zn auxquels sont venus s'adjoindre par la suite les systèmes Mg-Ag, Mg-Tr, Mg-Ce et enfin Mg-Li.

Le second type a été longtemps représenté par le seul alliage Mg-Mn auquel est venu s'ajouter le système Mg-Zr. Il est à noter que ces deux seuls alliages sont actuellement employés encore sous la forme binaire. L'alliage Mg-Zr est en outre à l'origine d'une nombreuse famille d'alliages ternaires et quaternaires par addition d'autres éléments [4].

I.5.1.1 Système Magnésium-Aluminium

Ces alliages comportent un palier eutectique à la température de 437 °C. Le point eutectique correspond à une teneur en aluminium de 32,3 %. La solubilité maximale de l'aluminium dans le magnésium est obtenue à la température de 437 °C et correspond à une teneur en masse de 12,7 % d'aluminium.

La solution solide obtenue présente la même structure cristalline que le métal de base : hexagonale compacte. À la température ambiante, la solubilité est inférieure à 1 %. À cette température, et pour des teneurs massiques en aluminium comprises entre 1 et 43 %, l'alliage présente deux phases α et γ à l'état d'équilibre ; cette dernière phase γ se formant autour du composé défini $Mg_{17}Al_{12}$ cristallisant suivant le système cubique centré.

La structure de ces alliages à l'état brut de coulée est constituée de dendrites de solution solide α riche en magnésium ; ces dendrites étant accompagnées de cristaux γ (solution solide formée à partir de $Mg_{17}Al_{12}$) (figure.2) [4].

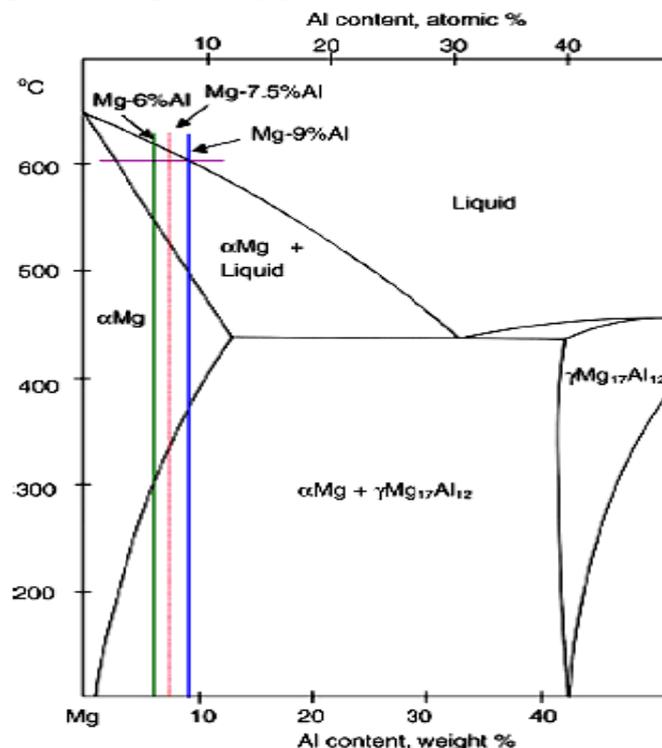


Figure.2 Diagramme binaire Mg-Al [10].

I.5.2 Systèmes Ternaires et Quaternaires

Les plus couramment utilisés appartiennent aux familles des alliages magnésium-aluminium et magnésium-zirconium [3].

I.5.2.1 Système Magnésium-Aluminium-Zinc

L'addition de zinc à des teneurs de 4% au système Mg-Al permet le passage aux conditions d'équilibre de phases dans le système d'alliage ternaire, et d'obtenir des alliages possédant de meilleures caractéristiques mécaniques. Des teneurs élevées sont fournies par des alliages pouvant subir des traitements thermiques, alliages qui possèdent une teneur en zinc plus faible que les alliages pouvant être employés sans traitement thermique.

Ces alliages à traitement thermique subissent un traitement de mise en solution suivi d'une trempe, généralement à l'air, suivie d'un traitement de revenu qui permet d'améliorer nettement la résistance à la rupture ainsi que la limite d'élasticité (**figure.3**).

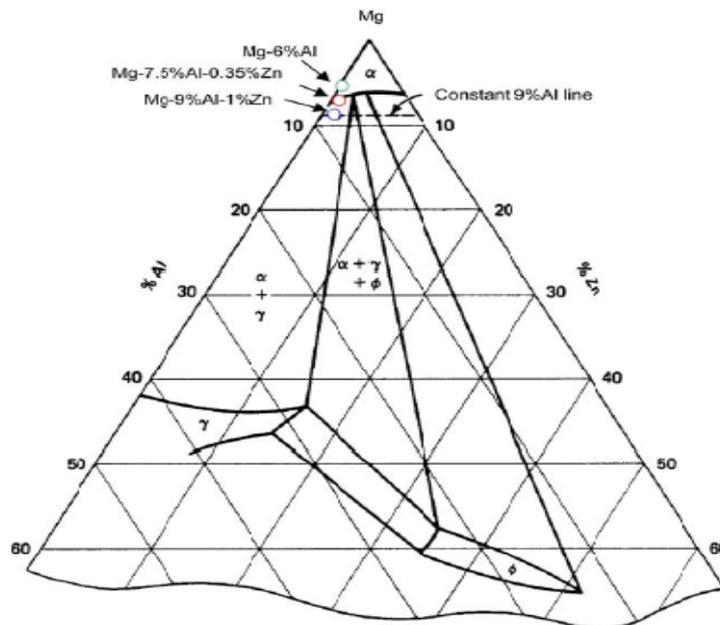


Figure.3 Diagramme ternaire Mg-Al-Zn [10].

L'addition de zinc augmente la tendance à la microporosité de l'alliage et à la fissuration à chaud, ce qui limite sa teneur maximale à 3 %, par contre, elle améliore légèrement la résistance à la corrosion lors de l'essai au brouillard salin.

La microstructure n'est que peu modifiée. Une phase ternaire apparaît quand le rapport Zn/Al est supérieur à 1/3 ; cette phase possède un large domaine de solubilités et semble correspondre au composé Mg₃₂(AlZn)₄₉ [3].

I.6 Propriétés des alliages industriels

I.6.1 Éléments d'addition usuels

- **Aluminium** : Il améliore beaucoup la résistance mécanique et permet un affinage notable du grain dans les pièces moulées à la suite d'un traitement de l'alliage au moyen d'une inoculation de particules de carbone ou en surchauffant l'alliage.
Les alliages de la famille magnésium-aluminium présentent toujours une certaine tendance à la microporosité.
- **Zinc** : Il améliore la résistance mécanique et les propriétés d'affinage de l'alliage. Les alliages Mg-Al-Zn destinés à subir un traitement thermique présentent en général un rapport Zn/Al inférieur à 1/5 ou mieux encore 1/7.
La présence de zinc ne diminue pas la tendance à la microporosité mais améliore les propriétés de fonderie et en particulier la coulabilité.
- **Manganèse** : Cet élément est, en pratique, toujours utilisé dans ces alliages à une teneur située aux environs de 0,30 % pour améliorer leur résistance à la corrosion.
En fonderie sous pression et ajouté à l'alliage Mg-Al en l'absence de zinc, il améliore les propriétés d'allongement et de déformation au choc de l'alliage [4].

I.6.2 Éléments ajoutés exceptionnellement

- **Silicium** : Considéré en général comme un élément nuisible, il peut être toléré dans ces alliages jusqu'à un maximum de 0,3 % en masse, sauf s'ils sont destinés à la fabrication d'anodes sacrificielles pour la protection cathodique pour lesquelles la teneur maximale tolérée est 0,10 %. Toutefois, dans certains alliages utilisés en fonderie sous pression, il est additionné en l'absence de zinc jusqu'à une teneur d'environ 1 % ; il améliore alors la conductivité thermique et la résistance au fluage. Les caractéristiques de fonderie, coulabilité, etc., sont assez notablement diminuées.
- **Béryllium** : Ajouté de façon systématique dans les alliages de fonderie sous pression, cet élément diminue très fortement la tendance à l'oxydation à l'état liquide. Il est employé à des teneurs très faibles (0,001 5 % au maximum). À plus forte teneur, et en particulier au-delà de 0,003 %, on observe une tendance très nette au grossissement du grain accompagné d'une forte diminution des caractéristiques mécaniques [4].

I.6.3 Éléments nuisibles

- **Cuivre** : Il diminue la résistance à la corrosion et doit être maintenu à un taux inférieur à 0,20 % dans les pièces de fonderie.
- **Fer** : Cet élément, peu soluble dans le magnésium, diminue assez fortement la résistance à la corrosion. Le taux maximal acceptable dans les pièces coulées est de 0,05 %. Pour les anodes de protection cathodique il est nécessaire de limiter la teneur à une valeur maximale de 0,005 %, voire même dans certains cas particuliers de 0,003 %, sous peine d'obtenir une destruction rapide de l'anode par auto-corrosion galvanique.

- **Nickel et cobalt** : Ces deux éléments diminuent très fortement la résistance à la corrosion des alliages. Leur solubilité étant grande dans le magnésium, il est important de les proscrire de tout matériau ou matériel en contact avec le magnésium liquide. La teneur limite en nickel dans les pièces en magnésium est fixée à 0,01 % [3].

I.7 Avantages et inconvénients

Le magnésium et ses alliages présentant de nombreux intérêts :

- Faible masse volumique,
- Résistance à la déformation par choc supérieur à celle des autres métaux à poids égal,
- Capacité d'amortissement des vibrations élevées pour la plupart des alliages,
- Facilité d'usinage,
- Conductivité thermique élevée,
- Pas de fragilisation aux basses températures,
- Température d'utilisation maximale : 150 à 300°C selon les alliages,
- Mise en œuvre aisée par fonderie,
- Bonne soudabilité,
- Absence de corrosion intergranulaire,

Toutefois il faut aussi tenir compte de :

- Sa difficulté de mise en œuvre par déformation à froid,
- La faible valeur de son module d'élasticité,
- La nécessité d'un traitement de surface,
- sa tendance à l'oxydation aux températures élevées lors de sa mise en œuvre nécessitant des précautions durant les opérations de fonderie, de traitement thermique et d'usinage.

Le magnésium est réputé pour les dangers qu'il présente lors de ces opérations (inflammabilité). Toutefois des précautions simples assurent la sécurité des biens et des personnes. [11].

I.8 Applications

Les alliages de magnésium sont de plus en plus utilisés pour les pièces structurales depuis une dizaine d'années. Ce choix est suscité par :

- leur faible densité ;
- leurs excellentes propriétés de moulage qui entraînent une économie lors de la production des pièces, comparativement à l'aluminium par exemple ;
- leur excellente stabilité dimensionnelle ;
- à moindre titre, leur bonne capacité d'amortissement et leur soudabilité, [12].

I.8.1 Industrie aéronautique

Jusqu'à ces dernières années, seule la fonderie par gravité en moule sable était pratiquée pour les pièces aéronautiques. Ce mode de moulage permet d'obtenir des pièces de grandes dimensions, jusqu'à 2 m avec des parois de 4 à 6 mm.

Depuis peu, les fondeurs s'intéressent aux technologies de coulée sous pression ou par différence de pression afin de répondre à deux besoins principaux :

- la réalisation de pièces plus complexes, à parois plus minces, avec une maîtrise de la santé interne de la pièce ;
- la coulée des derniers alliages développés de haute pureté (GA9Z1 et E4W3) pour lesquels la coulée sous gaz protecteur limite la pollution et facilite la maîtrise de la composition chimique.

Les problèmes de tenue en corrosion des alliages de magnésium avant l'apparition des alliages de haute pureté et la réglementation sévère, particulièrement aux Etats-Unis. De l'usage de ces alliages qui en a suivi, ont contraint les constructeurs à réduire leur utilisation, voire à remplacer ces pièces par des alliages d'aluminium.

L'industrialisation des alliages de haute pureté va sans doute bientôt permettre de les réintroduire. Actuellement, les principales utilisations du magnésium moulé résident dans les carters et les boîtiers d'hélicoptères. Cette famille d'alliage peut aujourd'hui concurrencer les alliages d'aluminium et de titane utilisés dans ce domaine (**figure.4**).

Toutefois, les applications du magnésium dans les turbines d'hélicoptères se révèlent encore faibles, environ 2 % en masse du moteur contre 6 % pour l'aluminium.

Pour les cellules d'avions civils, les alliages de magnésium sont encore peu utilisés. On les retrouve dans certaines soutes d'avions cargos ou au niveau de sièges passe

Aujourd'hui il y a une seule pièce en alliage de magnésium dans le moteur Trent destiné à l'Airbus A330, au Boeing B777 et au Mc Donnell MD11.

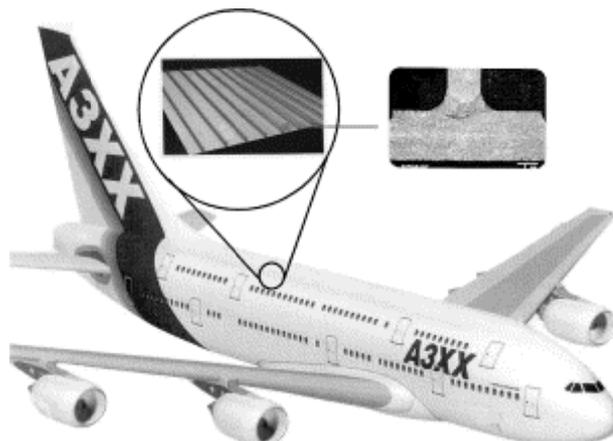


Figure.4 Application dans le domaine aéronautique [13].

Dans les avions militaires, seules quelques pièces telles que les roues des Mirages2000 ou des encadrements de verrière de Jaguar et Alpha Jet, de Dassault, ont été réalisées en alliages de magnésium, [14].

I.8.2 Industrie automobile

La recherche de gain d'énergie a entraîné une utilisation croissante des alliages de magnésium dans le secteur automobile, surtout aux Etats-Unis, en vue de l'allègement des véhicules. L'IMA (*International Magnesium Association*) estime que 70 % des pièces moulées en magnésium sont destinées à l'industrie automobile.

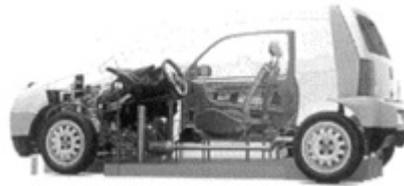


Figure.5 Application dans le domaine automobile [15].

Le magnésium est utilisé dans les pièces de boîtes de vitesses et d'embrayage, dans les supports de colonne de direction, les carters, les couvre-culasses (**figure.5**). Il est employé dans les pièces mécano-soudées comme les armatures de volant, des éléments de planche de bord ou des pièces de structure de siège, [16].

I.8.3 Electronique et informatique

Dans l'électronique et les télécommunications, le marché est en expansion. Ces domaines font appel aux propriétés de légèreté et de blindage électromagnétique afin d'obtenir une compatibilité entre les différents boîtiers qui pourraient interférer au cours du fonctionnement. Pour le matériel informatique et de téléphonie, on a recours de plus en plus aux alliages GA9Z1 haute pureté, GZ4Tr, GA9 et GA3Z1.

IBM a introduit des leviers de bras de lecture des disques durs en magnésium s'intéresse aux propriétés de blindage que pourraient avoir certaines pièces pour téléphones cellulaires [11].

SOUDAGE PROCÉDES,
PHÉNOMÈNES PHYSIQUES
ET MÉTALLURGIQUE

SOUWAGE PROCEDES, PHENOMENES PHYSIQUE ET METALLURGIQUE

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.

Dans le cadre de ce travail nous nous intéresserons :

- ❖ Aux conditions d'installation de la liaison métallique ;
- ❖ Aux procédés qui permettent de réaliser cette liaison ;
- ❖ Aux phénomènes métallurgiques mis en jeu et à leurs conséquences ;
- ❖ Aux définitions de la soudabilité ;
- ❖ Aux essais permettant d'apprécier la soudabilité métallurgique ;
- ❖ Aux possibilités d'actions postérieures au soudage permettant d'améliorer les performances de l'assemblage, pour finir par des considérations sur la soudabilité métallurgique des différents métaux [17].

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.

Le procédé d'activation des surfaces : 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 :

➤ 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 extérieure :

- Si les pièces à assembler et le métal fondu sont constitués d'un même métal, on parle de soudure homogène,
- Si les pièces à assembler et/ou le métal fondu sont constitués de métaux différents, la

soudure est dite hétérogène ;

- 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 solidus ;

L'activation des surfaces : peut être obtenue par échauffement sans fusion.

La liaison est assurée par la solidification d'un métal ayant une température de fusion inférieure à celle du ou des métaux à assembler et qui, après fusion, mouille les surfaces de ces derniers (il se met généralement en place par capillarité), le nettoyage étant généralement assuré par un flux fusible :

- Il peut y avoir diffusion du métal d'apport à travers les surfaces à assembler ; on parle alors de soudo-brasage et de brasage dur ;
- S'il n'y a pas diffusion, la liaison est due à l'adhésion (avec adsorption du métal fondu à la surface des pièces à assembler puis rigidification par solidification) ; on est alors dans le domaine du brasage tendre.

Enfin l'activation peut résulter d'une action mécanique sans échauffement global notable des pièces à assembler. Cette action mécanique doit provoquer une plastification de l'extrême couche de chaque surface et engendrer un échauffement très localisé qui, in fine, permet l'établissement de la liaison métallique. Ce processus exige simultanément un déplacement relatif des surfaces à assembler parallèlement au plan de joint couplé avec un effort de Compression perpendiculaire à ce même plan. Il est nécessaire de réaliser une préparation soignée des surfaces et/ ou de faire en sorte que les déplacements relatifs de ces dernières provoquent le rejet des produits qui les polluent [18].

II.3 Les phénomènes thermiques, métallurgiques dans la zone affectée par la chaleur en soudage

En règle générale, les opérations de soudage modifient profondément les structures métallurgiques et les propriétés locales des pièces assemblées. Dans certains cas extrêmes, elles peuvent être à l'origine de défauts tels que fissures, porosités ou d'une fragilisation locale. Il importe donc de bien connaître l'influence de différents facteurs tels que les cycles thermiques de soudage et la composition chimiques des pièces à assembler [19].

II.3.1 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, 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.

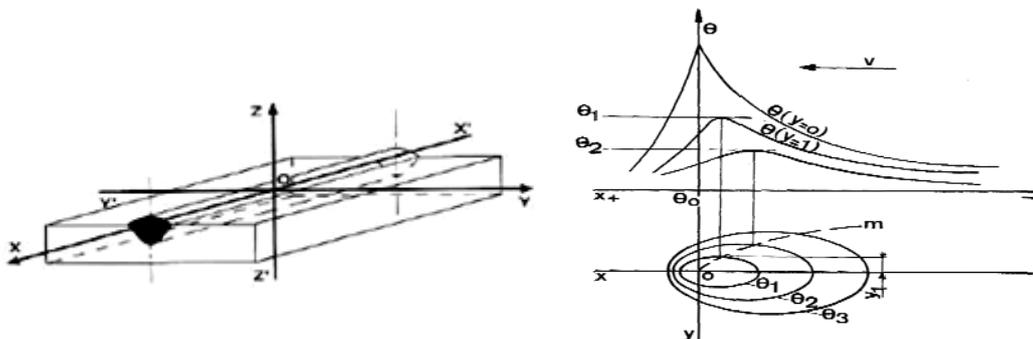


Figure.6 Schéma des différentes coupes du solide thermique [20]

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 ; **(figure.6)** en donne des coupes simplifiées. Au cours du soudage en régime établi, ce solide thermique reste identique à lui-même et l'évolution thermique de l'ensemble des métaux de base et du métal fondu est décrite par sa translation, à la vitesse de soudage, selon la direction de soudage [21].

II.3.2 Aspect thermique lié au soudage

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

Une résolution de l'équation de la chaleur simplifiée a été proposée par Rosenthal dès 1935 [22], prolongée par Rykhaline [23], Clyde et Adams [24]. Les principaux points en sont les suivants :

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

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

Avec :

θ : Température

t : temps

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

λ : conductivité thermique

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

On peut définir un système de coordonnées mobiles lié à la source en posant : $\xi = x - vt$.

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

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

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

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

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

Avec :

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

q : apport calorifique (J)

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

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

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

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

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

Où d désigne l'épaisseur des pièces soudées.

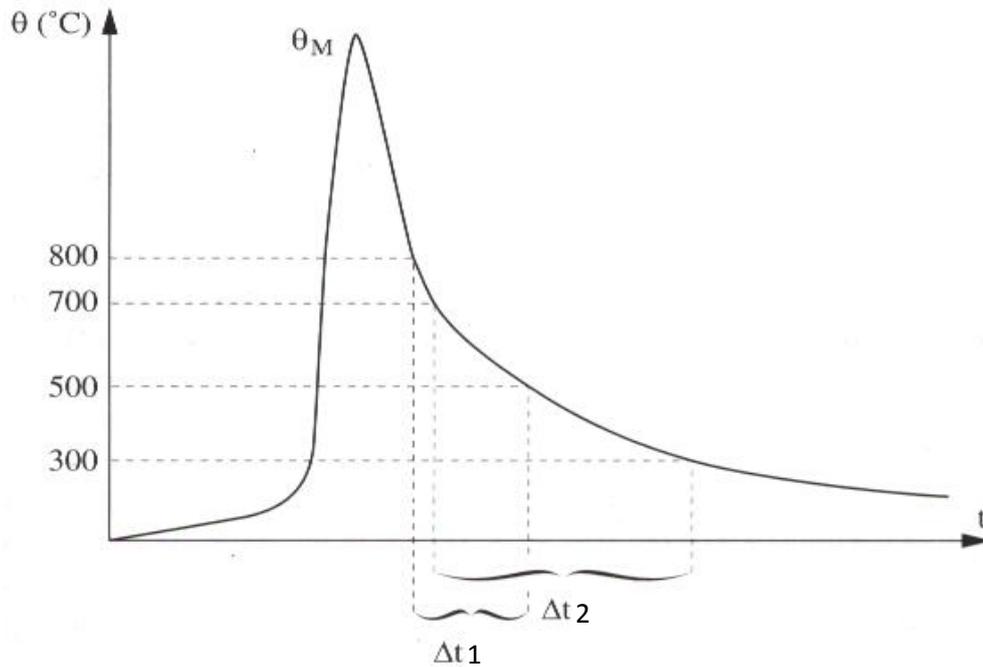


Figure.7 Aspect de cycle thermique dans la zone affectée par la chaleur (schématique) [18].

Nous allons maintenant revenir sur le cycle thermique $\theta(t)$ subi par tout point de la ZAT. Quel que soit le type de procédé de soudage (source fixe ou mobile), celui-ci comporte typiquement (**figure.7**) :

- Une phase d'échauffement très rapide, dont la vitesse moyenne est typiquement de quelque 10^2 °C/s (soudage à l'arc), allant jusqu'à 10^4 °C/s pour les procédés à haute densité d'énergie tels que le soudage laser [25].
- 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 :

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

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) :

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

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

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

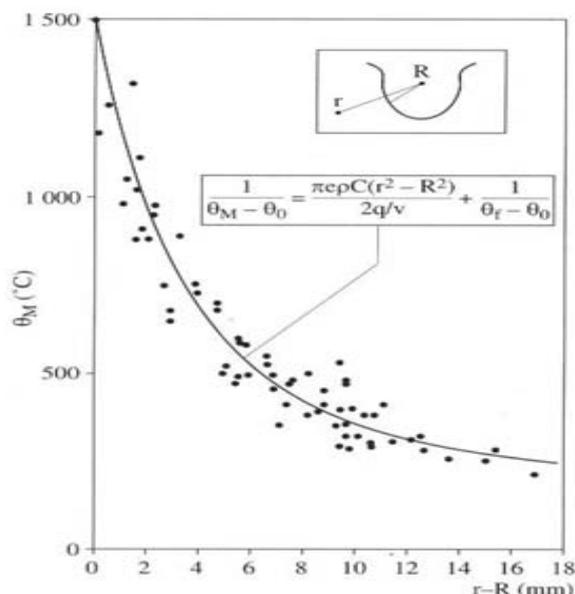


Figure.8 Evolution de la température maximale en fonction de la distance à la ligne de fusion comparaison des températures calculées analytiquement et relevées expérimentalement (soudage à l’arc submergé) [18].

Ainsi, la température maximale en ZAT varie environ de façon inversement proportionnelle à la distance r à la ligne de fusion (cas des produits minces) ou à son carré (cas des produits épais). Dans le cas des plaques, la température maximale atteinte ne dépend pas de l’épaisseur des produits.

En dépit de leur simplicité, ces expressions rendent généralement assez bien compte de l’évolution de la température maximale en ZAT, comme en témoigne la (**figure.8**) 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) [25].

II.4 Paramètre de refroidissement en ZAT

Des relevés de cycles thermiques sur joints soudés [26,27] montrent que le paramètre de refroidissement varie très peu au sein d’un même joint soudé.

L’évolution continue de la microstructure dépend donc uniquement de celle de la température maximale atteinte localement, tous les points subissant une loi de refroidissement pratiquement identique

Il reste maintenant à relier le paramètre de refroidissement aux conditions de soudage d’une manière plus précise : si l’on réalise des joints soudés à partir de produit de différentes épaisseurs en faisant varier l’énergie linéaire de soudage.

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

- de l’énergie linéaire électrique E_e , définie à partir des paramètres de soudage :

Par exemple, en soudage à l’arc, effectué avec une tension U et une intensité I ,

On écrira : $E_e = UI/v$

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 dans le soudage MIG (0,7 à 0,8).

L'énergie linéaire de soudage est également le produit d'un coefficient η_G lié à la géométrie du dépôt et de l'assemblage. Par définition, un dépôt sur plat (diffusion de la chaleur dans un angle de 180°) sera tel que : $\eta_G = 1$ pour un assemblage en T.

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

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

$$E = \eta_p \times \eta_G \times \frac{UI}{v} \quad (\text{II.7})$$

Cette valeur, ainsi que l'épaisseur des produits soudés, permet de définir le régime thermique en soudage : dans une remarquable étude basée sur une approche théorique et expérimentale, G. Bernard a pu préciser le domaine des produits (épais) et (minces) vis-à-vis de l'écoulement de la chaleur en soudage [19].

II.5 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 6 zones principales (**figure.9**).

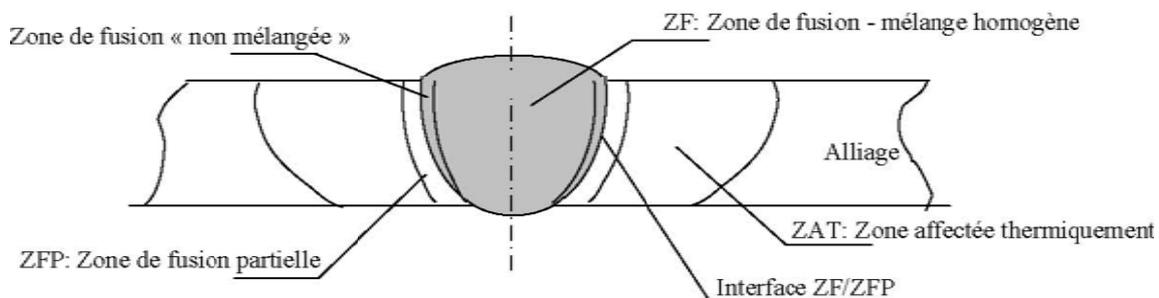


Figure.9 Variété de microstructures dans un cordon de soudure par fusion [28].

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 non mélangée « ZNM » est la zone étroite à l'extrémité du bain de fusion. Dans cette zone, les forces de convection étant inférieures aux forces de friction des fluides. La composition chimique est identique à celle du métal de base. Cette zone est présente dans toutes les soudures, elle n'est facilement visible que dans les soudures utilisant un métal

d'apport de composition chimique différente du métal de base.

Le bain de fusion est délimité par l'interface définie par la zone (ZF/ZFP) qui est la surface formant clairement la frontière entre le métal de base non fusionné et le métal de la soudure solidifiée.

La zone partiellement fondue (ZFP) 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 métallurgiquement inchangé, en revanche, (MB) est le siège de concentration des contraintes résiduelles transversales et longitudinales dépendant du degré de rétreint imposé à la soudure [28].

II.6 Procédés de soudage

II.6.1 Classification des procédés de soudage

Il existe ; à l'heure actuelle des dizaines de procédés de soudage, le plus souvent ils sont classés à partir du type d'énergie utilisées, par exemple : énergie électrique, énergie chimique etc. [29,30]. Dont Les principaux procédés de soudage sont présentés sur la (figure.10) :

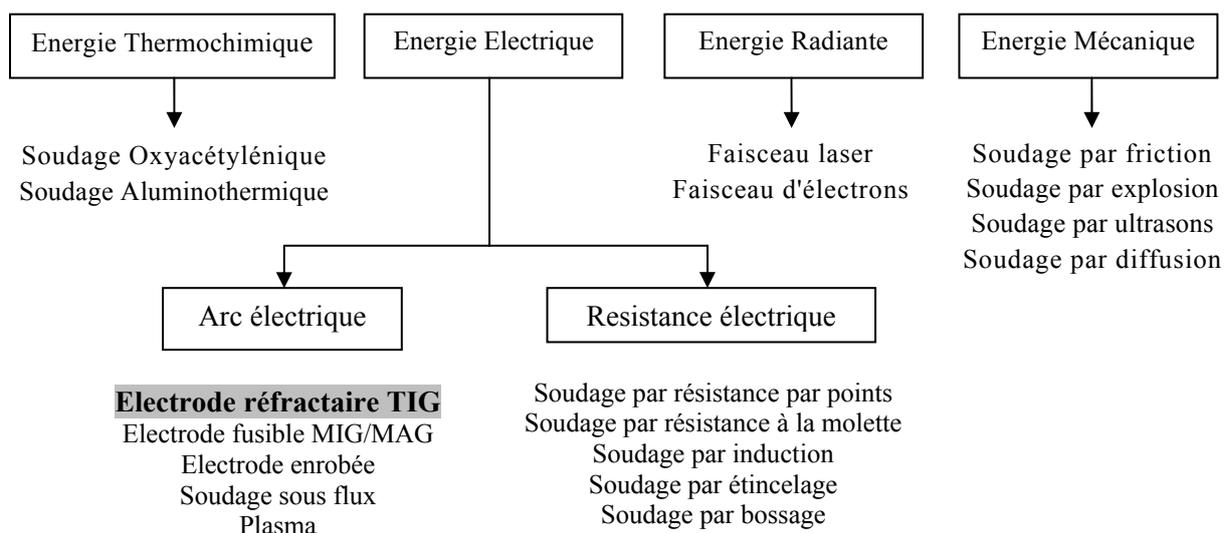


Figure.10 Les principaux procédés de soudage en fonction de la source d'énergie [30].

II.6.3 Principe de Soudage à l'électrode réfractaire (TIG)

Le soudage à l'électrode réfractaire est communément appelé soudage TIG (Tungsten Inert Gas). (Dans les pays anglo-saxons, on le désigne également par GTAW ou Gas Tungsten Arc Welding). L'appareillage comporte une source de courant alternatif ou continu, un dispositif d'amorçage, une bouteille de gaz avec détendeur et débitmètre, une torche spécifique du procédé et divers accessoires (**figure.11**). Procédé de soudage à l'arc avec l'électrode réfractaire dans lequel un gaz inerte vient protéger l'électrode, le bain de fusion et le métal chaud. Il s'utilise avec ou sans métal d'apport. Dans une veine de gaz inerte. On fait jaillir un arc électrique entre une électrode de tungstène infusible et la pièce à souder. La chaleur dégagée par l'arc fait fondre les bords de la pièce et l'éventuel métal d'apport qui contribue à la formation du cordon. La (**figure.12**) montre le principe du procédé TIG.

On réalise un apport de métal en introduisant directement dans le bain un fil de même nature que le métal de base. Le procédé TIG peut s'automatiser facilement. Et s'applique à tous les métaux soudables [31].

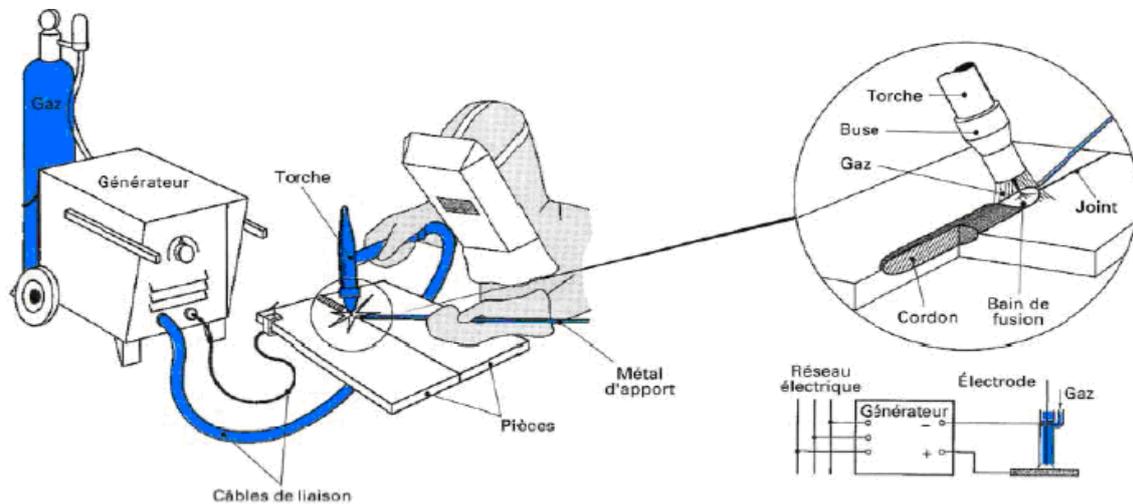


Figure.11 schéma du procédé TIG [32].

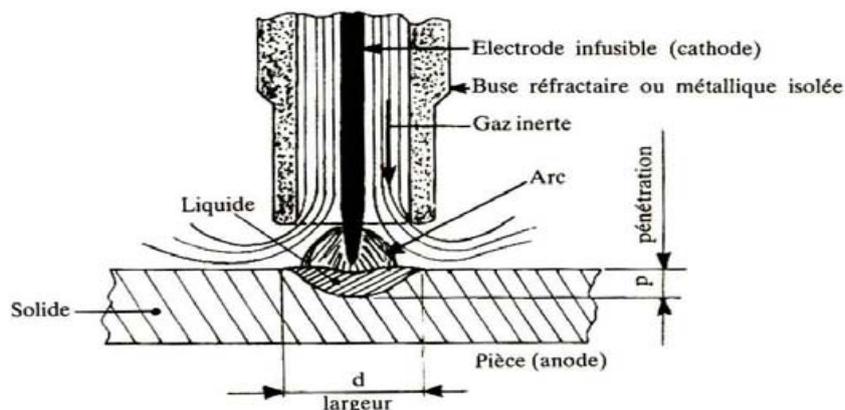


Figure.12 Principe du procédé de soudage TIG simple flux [33].

II.7 Effet des paramètres de soudage

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

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

II.7.1 Arc électrique

Dans les procédés de soudage à l'arc, les plus courants, l'une des électrodes est constituée par la pièce à souder. La quantité de chaleur dégagée par l'arc électrique permet une fusion instantanée des bords des pièces à souder et du métal d'apport [35].

II.7.2 Types de courants

II.7.2.1 caractéristiques du courant alternatif

Le courant alternatif est pratiquement seul utilisé dans le procédé TIG; pour le soudage de Magnésium, l'aluminium et des alliages légers.

Compte-tenu des informations générales apportées sur les propriétés de l'arc électrique, les dispositions adoptées dans les équipements spéciaux correspondant à ce mode de soudage peuvent être justifiées comme suit :

- a) **En polarité normale** l'électrode de tungstène est cathode et fortement émissive ; le courant passe facilement et la tension à l'arc est faible (15 V environ dans le cas de l'argon) mais le bain de fusion demeure couvert d'une pellicule d'alumine quelles que soient les précautions de décapage que l'on puisse prendre. Son élimination impliquerait l'emploi d'un flux, ce qui serait contraire au but à atteindre.
- b) **En polarité inverse** le bain de fusion est cathode mais il est peu émissif en raison de sa nature et de sa température qui est en relation avec la température de fusion de l'alliage léger considéré. Le courant passe difficilement et la tension à l'arc est plus élevée (21 volts environ dans le cas de l'argon). Mais avec cette polarité le bain de fusion est clair, les oxydes étant éliminés tant par l'émission électronique que par le phénomène de bombardement ionique.

En revanche, elle a le grave inconvénient de soumettre l'électrode de tungstène à un fort bombardement électronique qui élève sa température, porte son extrémité à la température de fusion même si elle est énergiquement refroidie et finalement la désagrège. L'alimentation en courant continu, se heurte à la difficulté de conserver l'électrode en bon état, pendant un temps suffisant si on utilise la densité de courant nécessaire aux travaux de soudage usuels. Avec celle-ci, seul le soudage de tubes minces en alliages légers pourrait être envisagé.

- c) En courant alternatif, les phénomènes décrits en a et b se produisent successivement selon le rythme des alternances mais l'expérience montre que l'électrode prend une température

moyenne d'équilibre compatible avec sa bonne conservation et que le décapage du bain de fusion pendant une alternance sur deux est pratiquement satisfaisant si l'amplitude du courant est suffisante lors de l'alternance pour laquelle le bain de fusion est cathode. Sans autres artifices, pour que cette condition soit réalisable il faut que la force électromotrice (ou tension à vide du circuit de soudage) permettant l'accélération des électrons à l'instant où l'arc se réamorçait, atteigne 140 à 180 V en atmosphère d'argon et 280 à 380 V en atmosphère d'hélium.

Comparativement à l'hélium, le comportement de l'argon est plus favorable et justifie l'emploi de ce gaz dans le soudage des alliages légers [36] (figure.13).

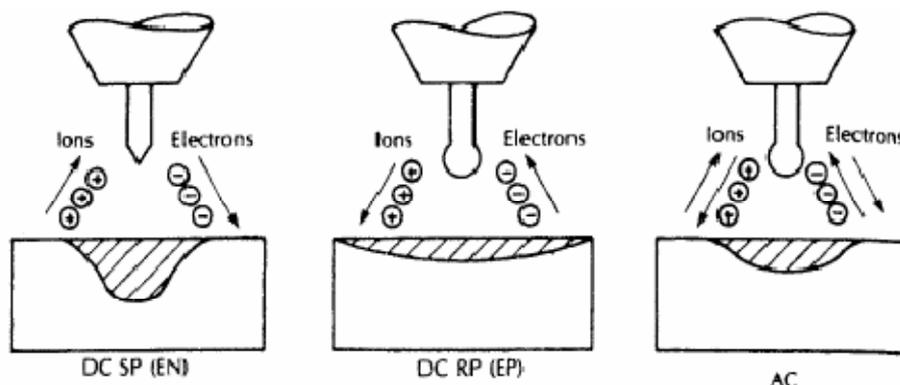


Figure.13 Caractéristiques des modes de fonctionnement possibles Pour le soudage TIG [36].

II.7.2.2 Soudage TIG Pulsé

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

A) Définition du Procédé

Le soudage TIG par impulsion consiste à faire varier périodiquement l'intensité du courant de soudage d'une valeur de base I_b à une valeur de pointe I_p (figure.14).

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

On peut ainsi réduire les risques de fissuration à chaud du fait que la chaleur se répartit moins, puisque la zone fondue se refroidit entre les impulsions et que, par suite, la surchauffe est évitée.

Il apparaît que, par suite de réduction de la porosité, l'absorption de gaz est moindre, cet avantage peut être compensé par l'inconvénient d'un dégazage plus difficile puisque le refroidissement est plus rapide ; il peut être avantageux d'augmenter le courant de base pour

éviter la porosité [37].

$$I_m = \frac{I_p \cdot t_p + I_b \cdot t_b}{T}$$

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

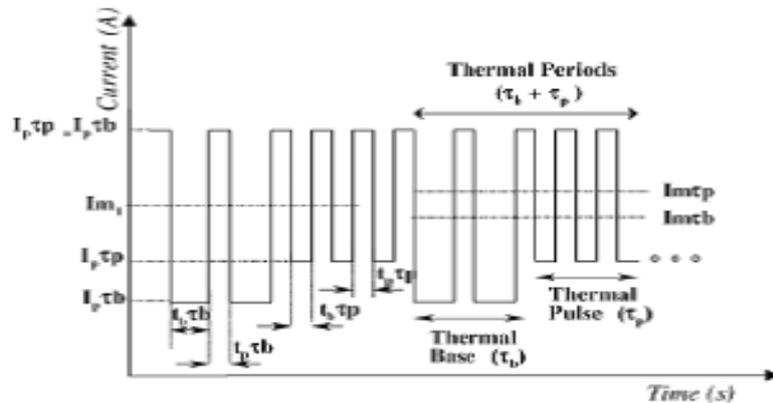


Figure.14 Exemple de courant pulsé [37].

B) Durée et fréquence des impulsions

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

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

C) Vitesses de soudage

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

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

D) Avantage des pulsations de courant en soudage TIG

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

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

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

Ces avantages des pulsations de courant conduisent aux conditions suivantes :

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

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

II.7.3 Les gaz de protection en TIG

Lors des travaux de soudage, les métaux ont tendance à réagir avec l'oxygène et l'azote contenus dans l'air pour former des oxydes et des nitrures. L'oxygène très réactif avec le carbone, tend également à former du monoxyde de carbone. Ces différentes réactions contribuant à faire apparaître de nombreux défauts de soudage, l'opération est effectuée sous protection gaz inertes [38].

L'argon et l'hélium sont des gaz neutres et peuvent donc être utilisés quels que soient les matériaux à souder, mais leurs caractéristiques physiques respectives leur confèrent des effets spécifiques en soudage :

L'argon a un potentiel d'ionisation très inférieur à celui de l'hélium (respectivement 15,7 et 24,5 eV) et une conductivité électrique très supérieure, il en résulte qu'il est beaucoup plus facile d'amorcer un arc et de le stabiliser sous argon que sous hélium mais aussi qu'un arc d'une longueur donnée est, pour une même intensité, plus énergétique sous hélium que sous argon (tension plus élevée) ;

La conductivité thermique de l'hélium est bien plus grande que celle de l'argon. Ainsi, avec un même courant, un arc sous hélium est plus épanoui que sous argon, et conduit au niveau des pièces à assembler à un gradient thermique plus faible favorable au mouillage du cordon

L'hydrogène est un gaz diatomique à la température ambiante. Lorsque la température s'élève, il passe d'abord à l'état atomique puis à l'état ionisé. Cette particularité a des conséquences très importantes pour l'arc de soudage.

La constriction de l'arc augmente la densité de puissance et par voie de conséquence la pénétration, comme la recombinaison des atomes d'hydrogène au niveau du bain liquide qui améliore le transfert d'énergie donc le rendement du procédé de soudage (**figure.15**). En corollaire, pour une puissance électrique et une épaisseur données, la combinaison de ces deux effets permet d'augmenter notablement les vitesses de soudage TIG en utilisant un mélange argon hydrogène plutôt que de l'argon pur ou un mélange argon-hélium.

Ainsi, le gaz de base en soudage TIG est l'argon, mais chaque fois que cela est possible, c'est-à-dire en l'absence de contre-indications métallurgiques, on aura intérêt à privilégier l'utilisation des mélanges argon-hydrogène car ils permettent d'augmenter la vitesse de soudage ou l'épaisseur soudée en une passe, ce qui, dans les deux cas, conduit à une amélioration significative de la productivité. L'utilisation de mélange ternaire Ar-He-H₂ peut encore apporter un grain complémentaire sur la vitesse de soudage, l'hélium favorisant le mouillage du cordon.

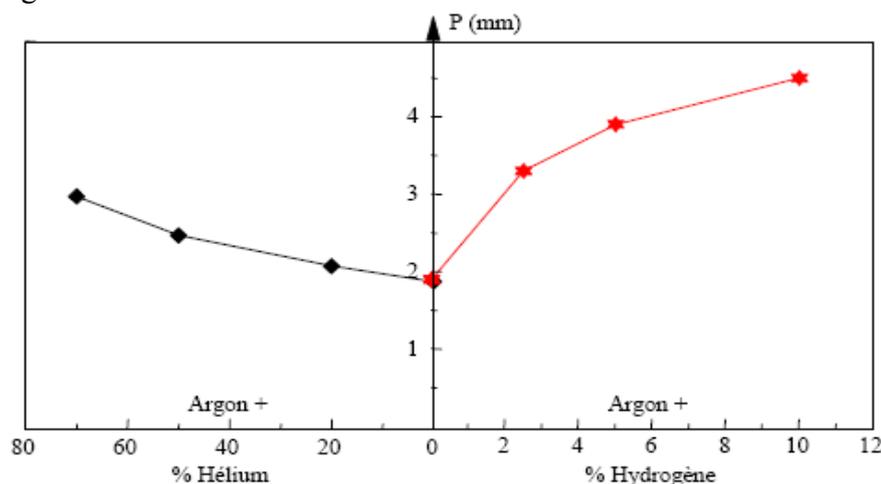


Figure.15 Influence du gaz de protection sur la pénétration en soudage TIG (Acier 316L ; I = 200A ; Distance électrode - pièce = 2 mm ; Vitesse de soudage 20 cm/min [18]).

L'incompatibilité métallurgique peut résulter de la formation de porosités dans le cordon de soudure avec les alliages présentant une variation importante de la solubilité de l'hydrogène à la solidification comme les alliages de l'aluminium par exemple. Elle peut aussi prévenir du risque de fissuration à froid avec les aciers ferritiques lorsque ceux-ci sont suffisamment « trempant » pour développer une structure peu ductile dans la zone affectée thermiquement ou le métal fondu [18].

Le choix du mélange est très important pour le soudeur car il détermine la stabilité de l'arc, le profil de pénétration, l'angle de mouillage, la compacité et la composition chimique du cordon.

Il faut donc prendre en compte les quatre paramètres suivants :

- La masse spécifique : Plus un gaz sera lourd, plus il recouvrera correctement le cordon dans le cas de soudure à plat et mal dans celui de soudure au plafond.
- La stabilité moléculaire : Dans le cas des gaz composés de plusieurs molécules, une décomposition peut se produire au cours du soudage et provoquer une instabilité de l'arc et des éclaboussures par expansion du volume.

- Le potentiel d'ionisation : Exprimé en électronvolts (eV), il indique la quantité minimale d'énergie requise pour ioniser le gaz et donc la facilité d'amorçage et de stabilité du gaz. Plus ce potentiel sera faible, plus l'arc s'amorcera facilement.
- La conductibilité thermique : Elle détermine la capacité du gaz à conduire la chaleur ainsi que la largeur de l'arc. En effet, un gaz avec une forte conductivité thermique évacue la chaleur produite au centre de l'arc plus facilement et conduit à une largeur d'arc plus importante mais moins dense qu'un gaz avec une faible conductivité **[38]**.

CHAPITRE



SOUDAGE TIG
DU MAGNESIUM

SOUDAGE TIG DU MAGNESIUM

III.1 Introduction au Soudage de Magnésium et ses Alliages

Le magnésium pur a un poids spécifique de $1,74 \text{ g/cm}^3$. C'est donc un métal très léger, ayant, eu égard à son poids, une résistance mécanique assez élevée il est facile à usiner et à souder. Ce métal fond à 650°C et bout à 1109°C . En passant de l'état liquide à 650°C à l'état solide à la température ambiante, sa contraction totale est de l'ordre de 9% en volume.

S'il est chauffé dans l'air, le magnésium s'oxyde aussitôt en son oxyde est très réfractaire de sorte que son soudage nécessite une très bonne protection contre l'oxygène de l'air. Les gaz inertes sont tout indiqués pour remplir ce rôle. Historiquement d'ailleurs, c'est pour permettre le soudage industriel du magnésium que le procédé TIG a été inventé en 1942. A l'état de limaille le magnésium s'enflamme facilement et sa combustion se poursuit, mais le danger de mise en ignition des pièces présentées à la chaleur de l'arc de soudage est pratiquement inexistant [31].

III.2 Choix du Procédé de Soudage

Pour souder les alliages de magnésium, il faut mettre en œuvre des procédés à grande densité d'énergie qui permettent de protéger efficacement le métal de l'action de l'oxygène. Les méthodes les plus employées sont les procédés TIG et MIG.

L'affinité du magnésium avec l'oxygène pose le problème de l'existence, avant soudage, d'une couche de magnésie. Il est donc nécessaire de pratiquer un décapage préalable des pièces à assembler.

L'utilisation du courant alternatif facilite ce décapage. Ce procédé permet une plus grande pénétration en dégageant moins de chaleur.

Il est recommandé de protéger l'envers de la soudure avec une atmosphère inerte pour éviter l'oxydation.

Il est possible de souder à l'arc des épaisseurs allant jusqu'à 12 mm en une ou plusieurs passes. Le procédé TIG est le seul à être utilisé pour la réparation des pièces de fonderie.

Le soudage à l'arc sous argon avec électrode consommable (MIG) permet des vitesses de soudage nettement supérieures à celles du TIG ; il est donc plus adapté que ce dernier aux travaux de série.

Le soudage par point n'est applicable que pour des assemblages soumis à de faibles contraintes en l'absence de vibrations. Il est possible de souder des épaisseurs inférieures ou égales à 5 mm.

Le soudage par faisceau d'électrons est surtout utilisé dans l'industrie nucléaire. Les soudures obtenues présentent une plus grande résistance mécanique que celles obtenues avec les méthodes de soudure à l'arc.

Du point de vue métallurgique, il faut considérer les effets induits par les éléments d'alliage lors des opérations de soudage :

- le zinc est un élément volatil qui engendre des risques de perte de matière et d'apparition de soufflures dans le métal fondu ;
- la présence d'aluminium impose de procéder à un traitement thermique de relaxation des contraintes résiduelles subsistant après soudage ;
- la toxicité du thorium rend dangereux le soudage des alliages en contenant ;
- le zirconium est susceptible de former des composés insolubles dans le métal liquide.

Tous les alliages de fonderie sont soudables à l'exception des alliages type Mg-Zn-Zr. qui ont tendance à se fissurer lors de la soudure [1].

III.3 Aptitude au soudage du magnésium et de ses alliages

Le magnésium et ses alliages posent les mêmes problèmes que l'aluminium. Le magnésium forme un oxyde réfractaire qui gêne le soudage. Toutefois, cet oxyde recristallise à haute température et devient floconneux, ce qui facilite la rupture, de la couche au cours du soudage. La couche de magnésie qui recouvre le bain de fusion doit être "craquée" (sa température de fusion est de 2 800 °C) (**Tab.6**). On utilise le procédé T.I.G. (alternatif).

Les caractéristiques mécaniques du magnésium pur ne sont pas bonnes; aussi, pour les améliorer, ajoute-t-on des éléments : aluminium et zinc. Au-delà de 6 % d'aluminium et de 1% de zinc, l'alliage est sensible à la crique. Au-delà de 3 % de zinc et sans aluminium, l'alliage est insoudable. Les alliages de magnésium de fonderie ont une bonne soudabilité. Les alliages contenant du thorium dégagent lors du soudage des fumées dangereuses en raison de la radioactivité du thorium à haute température; il est donc nécessaire de ventiler efficacement [35]. Les alliages les plus utilisés sont :

1° — les alliages Mg-Al-Zn du type 3 % Al, 1 % Zn et 0.2 % Mn pour les tôles et les profilés ou 8,7 % Al, 0,7 % Zn et 0,2 % Mn pour la fonderie.

L'aluminium augmente la résistance mécanique mais rend l'alliage susceptible à la corrosion sous tension ce qui oblige souvent à un traitement de détente vers 250° C après soudage.

Le zinc augmente également la résistance mécanique mais aussi la susceptibilité, à la fissuration à chaud si la teneur dépasse 1%.

2° — Les alliages magnésium-zirconium dont certains, contiennent également du zinc, des terres rares, du thorium ou de l'argent. Le zirconium diminue la tendance à la fissuration et améliore les caractéristiques mécaniques. C'est aussi un affinant du grain. L'addition du thorium donne un alliage peu sensible à la fissuration, exempt de porosités et doté de bonnes caractéristiques à haute température.

En règle générale, l'addition d'éléments d'alliage augmente l'intervalle de solidification et diminue la température de fusion ainsi que le retrait.

Enfin, le magnésium étant très oxydable, la protection gazeuse (argon) doit agir à la fois à l'envers et à l'endroit du joint (le magnésium à haute température s'enflamme spontanément au contact de l'oxygène de l'air) [31].

Tableau.6 Propriétés de la couche de la magnésie [39].

Propriétés physiques	
Masse volumique (g/cm ³)	3,58
Poids moléculaire (g/mole)	40,4
Température maximale d'utilisation sous air (°C)	2200
Propriétés mécaniques	
Dureté (Mohs)	5,5-6
Module d'Young (GPa)	250-300
Coefficient de Poisson	0,18
Résistance à la flexion (MPa)	450
Ténacité (MPa.m ^{1/2})	-
Propriétés électriques	
Constante diélectrique	9-10
Résistivité électrique à 20 °C (Ohm.cm)	-
Résistance diélectrique (kV/mm)	-
Propriétés thermiques	
Chaleur spécifique (J/K/kg)	870-880
Conductivité thermique (W/m/K) à 20°C à 500°C	40-50
Dilatation linéaire (×10 ⁻⁶) de 20 à 1000 °C	10-13
Point de fusion (°C)	2800

III.4 Modification microstructurales en zone affectée par la chaleur.

III.4.1 Conséquences métallurgiques des cycles thermiques de soudage :

Au sein strict, le caractère rapide des cycles thermiques de soudage ne permet pas d'utiliser les diagrammes d'équilibre pour prévoir la nature exacte des différentes phases au voisinage de la ligne de fusion. Cependant, à l'exemple d'Esterling [40], il est commode de raisonner à partir de ce type de diagrammes pour interpréter qualitativement les modifications microstructurales. A titre d'exemple, on se placera dans le cadre des alliages binaires Mg-Al, Qui constituent la plus large gamme d'application du soudage, en examinant le diagramme (Mg - Al) en parallèle avec les températures maximales atteintes dans un joint soudé (figure.16).

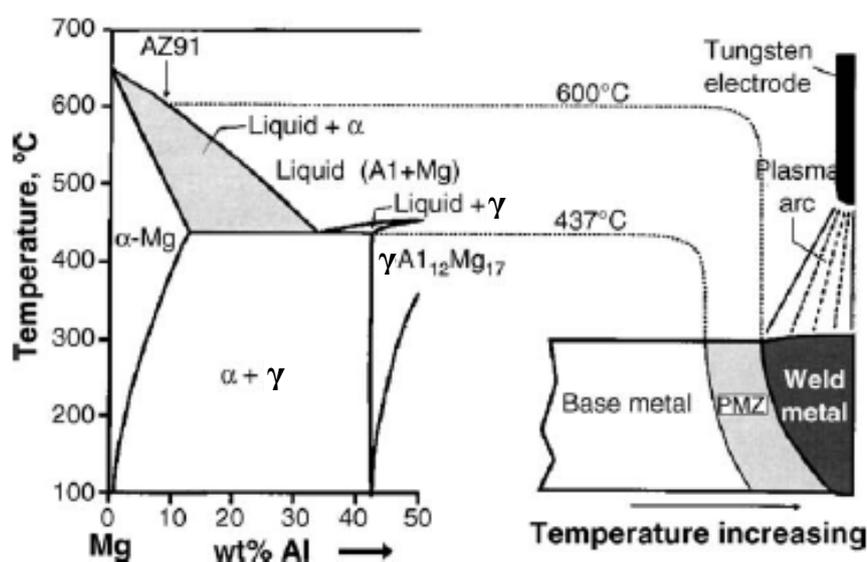


Figure.16 Présentation schématique des différentes parties constitutives d'un joint soudé d'alliage binaire Mg-Al [41].

Considérons par exemple le cas du soudage d'un alliage binaire Mg-Al. En se rapprochant de la zone fondue, on trouvera successivement les zones suivantes.

- Le métal de base n'ayant pas subi de transformation de phase au chauffage, c'est-à-dire ayant été chauffé à une température inférieure au point de transformation liquidus-solidus eutectique ($437^{\circ}\text{C} \sim T_{\text{eutectique}}$).
A l'équilibre, il s'agit donc d'une structure composée de la phase α (Mg de structure hexagonal compacte) et la phase γ (solution solide de substitution de magnésium et d'aluminium de composition $\text{Mg}_{17}\text{Al}_{12}$, de structure cubique centrée).
- Une zone subcritique, ou l'on ne constate pas encore de changement de phase. Cependant, lorsque la température atteinte est suffisamment importante ($T_{\text{eutectique}} > \theta > 300^{\circ}\text{C}$ cas d'alliage binaire Mg-Al contenant 6 % d'aluminium en particulier AM60B), certains phénomènes tels que le revenu, la recristallisation dans le cas de soudage sur produit écroui, le vieillissement, précipitation, etc., peuvent éventuellement intervenir.
- Une zone portée partiellement à l'état liquide, portée entre 437°C et 600°C (pour la composition considérée). Dans ce domaine coexistent de la phase solide α et une phase liquide (Mg+Al). Cette zone constitue la zone de liaison entre le métal de base et le métal fondu. Sur le diagramme d'équilibre, celle-ci correspond à l'intervalle de température entre le début et la fin de la fusion (intervalle solidus-liquidus). C'est à partir de cette zone ($\theta > T_{\text{eutectique}}$) que débute la zone affectée par la chaleur. Au sein de cette zone

qu'intervient un grossissement du grain, il s'agit de la zone en général la plus susceptible de causer certains problèmes métallurgiques, comme on le verra plus loin.

- Enfin le métal fondu, qui a souvent une composition différente de celle du métal de base, en raison de la volatilisation de certains éléments, de réactions (produits d'apport). Les premiers germes du métal fondu se solidifient par épitaxie (relation de cohérence cristallographique) sur les grains de la ZAT [41].

III.5 Traitements de mise en solution et de trempé

III.5.1 Principes et effets du traitement

Les grains hétérogènes qui se sont développés au cours de la solidification s'homogénéisent pendant la durée du traitement ; de plus, le constituant eutectique solidifié aux joints des grains, en fin de solidification, mélangé parfois de $Mg_{17}Al_{12}$, est remis en solution à l'intérieur de ceux-ci ; avec une durée de traitement suffisamment longue, pouvant atteindre plusieurs dizaines d'heures, il est possible d'obtenir une mise en solution complète de toutes les traces de composés solubles déposés. Comme dans nombre d'autres alliages légers, les traitements thermiques de mise en solution doivent tenir compte des facteurs suivants : nature de l'alliage, grosseur du grain, épaisseur des pièces à traiter, disposition de la charge dans le four. Tous ces facteurs affectent principalement la durée du palier de traitement.

La période de maintien à haute température doit être immédiatement suivie d'une trempé ou d'un refroidissement très rapide pour conserver à la température ambiante l'état homogénéisé obtenu grâce au traitement. Il est à noter que les alliages de magnésium ne demandent pas en général une vitesse de trempé aussi grande que les alliages d'aluminium, dans la quasi-totalité des cas un refroidissement à l'air soufflé est suffisant, sauf avec certains alliages au zirconium, en particulier ceux contenant de l'argent et des métaux du groupe des terres rares [42].

III.5.2 Alliages magnésium-aluminium-zinc

Le diagramme d'équilibre magnésium-aluminium indique un domaine de solution solide α limité à moins de 2% en masse d'Al à la température ambiante et à 12,6 % en masse à 437°C, température du palier de l'eutectique. On ne peut donc traiter que les alliages ayant une teneur en aluminium inférieure à 12 %, et dans la pratique on se limite à des teneurs inférieures ou au plus égales à 10 %.

Le diagramme d'équilibre magnésium-zinc montre un domaine de solution solide allant de 1,5% à la température ambiante jusqu'à 8,4 % à la température du point eutectique (344 °C).

L'examen du diagramme d'équilibre ternaire magnésium-aluminium-zinc montre que, bien que le traitement des alliages magnésium-aluminium-zinc de production courante soit possible, on ne traite en pratique que ceux ayant une forte teneur en aluminium.

La raison principale de cet usage réside dans la simplification des cycles de traitement thermique qui impose en particulier, avec les plus fortes teneurs en zinc, des montées en température très lentes pour éviter la fusion des dépôts locaux d'eutectique magnésium-zinc, dépôts qui peuvent se former dans les parties épaisses des pièces et surtout dans les zones de coupe des masselottes de forte section.

La grande majorité des pièces en alliage magnésium-aluminium-zinc subissant un traitement d'homogénéisation se situe actuellement dans la marge d'analyse comprise entre 8,5 et 9,5 % en masse d'aluminium et entre 0,5 et 1,0 % en masse de zinc [43].

III.5.3 Mécanismes en action pendant les traitements thermiques

a) Structures de solidification : lors du refroidissement lent des pièces de fonderie dans le moule, il se forme d'abord des cristaux de solution solide α qui grossissent progressivement jusqu'à constituer la totalité de la masse. Au passage de la courbe de transformation, une partie de cette solution solide se décompose en eutectique mélangé parfois de $Mg_{17}Al_{12}$ et se dépose sous cette forme aux joints des grains. Les dépôts sont d'autant plus massifs et localisés que la vitesse de solidification est plus lente.

b) Cycles des traitements thermiques : dans les fourchettes d'analyses usuelles (8,5 à 9,5 % en masse d'Al et 0,5 à 1 % de Zn), le solidus est placé à une température d'environ 450 à 500 °C. Pour se situer dans une zone de températures efficaces pour la mise en solution, on adopte un palier situé aux environs de 400 °C [43].

III.5.4 Traitements thermiques et soudage

Le soudage des alliages de magnésium est une opération qui se pratique sans complications majeures sur la quasi-totalité des alliages à l'exception de ceux du type magnésium-zinc-zirconium pour lesquels elle est fortement déconseillée, ces alliages ayant une forte tendance à se fissurer lors de la soudure. Pour que l'efficacité du soudage soit maximale et pour éviter de provoquer des contraintes internes résiduelles dans les éléments à souder, il est préconisé de préchauffer ceux-ci avant le soudage pour limiter les chocs thermiques, et, après la soudure, de remettre les pièces ou ensembles soudés dans le four jusqu'à ce que la zone soudée soit à la même température que le reste de l'ensemble. Les températures de préchauffage pourront atteindre une valeur de 330 °C. Il est souvent utile, dans le cas de soudures nombreuses ou volumineuses par rapport aux éléments assemblés, de faire subir aux ensembles soudés un traitement de stabilisation ou de détente après l'opération de soudure. Dans le cas de pièces de fonderies réparées par soudure, si la réparation est intervenue après achèvement complet du cycle de traitement thermique de l'alliage, il est bon de recommencer celui-ci. Cette précaution est particulièrement nécessaire si le cycle normal comporte un traitement de mise en solution-homogénéisation suivi d'une trempe [43].

III.6 Soudage

III.6.1 Préparation du magnésium pour le soudage

Les pièces ou les demi-produits (tôles, profilés) en magnésium sont presque toujours mordancés au bichromate de potassium avant livraison. Cette protection doit être éliminée à la brosse métallique dans la zone avoisinant le joint soudé et sur toute la surface si l'ensemble soudé doit subir un traitement après soudure.

Les pièces à souder subissent un dégraissage et un décapage chimique analogues à ceux pratiqués pour l'aluminium. Il est bon de terminer par le décapage mécanique.

III.6.2 Types de joints

Les types de joints recommandés sont indiqués sur la **(figure.17)**. L'emploi de montages assurant le bon alignement des pièces et la Constance des écartements permet d'obtenir des soudures de qualité. Les supports que comportent ces montages ont en outre l'avantage d'assurer un refroidissement plus rapide et plus régulier des soudures.

Il n'est guère facile de souder par le procédé TIG des épaisseurs de magnésium inférieures à 0,8 mm, par contre il ne semble pas y avoir de limites supérieures. A partir de 10 mm,

cependant, le procédé MIG, est préféré comme étant plus économique.

III.6.2.1 Forme des joints et préparation des bords

La forme des joints dépend de la conception générale de la structure soudée et des épaisseurs de métal à assembler. Selon celles-ci, on utilise ou l'on n'utilise pas le métal d'apport.

Jusqu'à 3 mm d'épaisseur on ne pratique aucun chanfrein et l'on soude sur bords droits sans écartement et souvent sans apport de métal. Dans ce type de joint on pratique habituellement un léger chanfrein à la racine pour éviter que les oxydes ne restent emprisonnés. Ce chanfrein est obtenu en abattant au grattoir la « carre » de chacune des tôles. De 3 à 6 mm, on peut souder sur bord droit (ou avec un léger chanfrein en Y) mais avec un écartement et avec apport de métal. Les joints sont avantageusement munis de supports à l'envers saut naturellement, si l'on soude en montant à 2 opérateurs. Ces supports non-permanents sur lesquels les bords sont serrés énergiquement, sont en cuivre ou mieux en acier inoxydable.

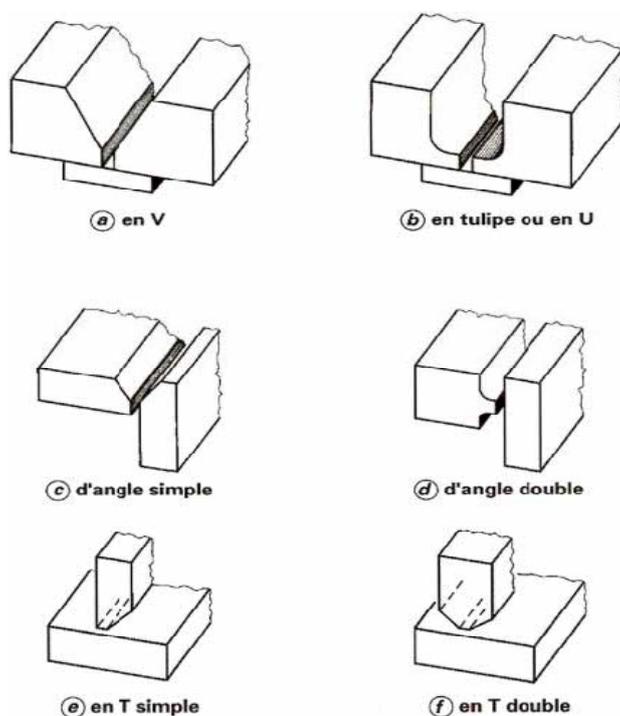


Figure.17 Principe de la technique du chanfrein [32].

III.6.3 Matériels employés

Les sources de courant sont identiques à celles que l'on utilise pour souder l'aluminium et ses alliages. Les plus fréquemment adoptées sont les sources de courant alternatif avec courant HF superpose. L'élimination de la composante continue est indispensable et réalisée très souvent par des batteries d'accumulateurs à raison d'une batterie de 6 V par 125 ou 150 ampères du courant de soudage.

En raison du manque d'effet de nettoyage cathodique de la couche d'oxyde par l'arc on polarité directe, courant continu est peu employé. Le courant continu en polarité inverse (et sous hélium) est quelquefois préféré au courant alternatif en soudage automatique mais seulement pour les faibles épaisseurs.

III.6.4 Exécution des soudures

Le constructeur responsable d'une construction doit être certain (et pouvoir au besoin, en fournir la preuve) que cette construction sera conforme aux dimensions fixées par les dessins et qu'elle assurera le service demandé dans les conditions de résistance statique ou dynamique, d'étanchéité, de température, de corrosion, etc.... prévues. Dans ce but il établit un dossier de soudage où il indique le choix qu'il a décidé de faire des assemblages, des préparations, des métaux de base, des produits d'apport, des appareils et de leur réglage, du mode opératoire, de la qualification des soudeurs, ainsi que des traitements mécaniques et thermiques en cours de soudage ou après celui-ci.

Dans ce dossier figurent également la nature et les résultats des essais préalables entrepris pour vérifier le bien-fondé des décisions prises.

Le dossier peut, naturellement, être très simplifié ou remplacé par un dossier ancien lorsqu'il s'agit des travaux de routine.

La conception des constructions soudées peut se trouver, facilitée par le très grand nombre d'assemblages élémentaires décrits dans la NF A-89 310.

III.6.5 Dégraissage et décapage des bords

Le dégraissage se fait en utilisant les solvants industriels habituels et en respectant les règles de sécurité pour éviter la formation de vapeurs toxiques.

Le décapage met en œuvre des moyens mécaniques (brosses rotative en fil d'acier inoxydable) ou chimiques. Une formule courante de décapage chimique consiste à immerger les pièces dans un bain de soude caustique à 10% en poids à la température d'environ 60°C pendant une à trois minutes. On ajoute souvent 0,05% d'un produit mouillant pour éviter la formation d'un brouillard irritant à la surface. Les pièces sont rincées à l'eau froide puis neutralisées dans un bain d'acide nitrique industriel à 20% en poids pendant quelques minutes.

Un dernier rinçage suivi de l'égouttage et du séchage termine cette opération de décapage.

Les pièces ainsi préparées ne doivent pas risquer d'être souillées à nouveau soit en magasin soit au cours des manipulations. Aussi est-il préférable de préparer les pièces peu de temps avant de les souder et ne les manipuler qu'avec des gants propres.

III.6.6 Postes de soudage

Le local où doit s'exécuter le soudage TIG des pièces en Magnésium et Aluminium sera, autant que possible séparé du reste des ateliers et, de toute manière, mis à l'abri des atmosphères poussiéreuses et des courants d'air. Si le travail se fait en plein air, une tente devra protéger le soudeur.

Les condensations de l'humidité ambiante sont aussi à éviter grâce au chauffage du local. Eventuellement on pourra pratiquer un léger préchauffage des pièces (au chalumeau).

III.6.6.1 Pointage

Lorsqu'il n'y a ni montage ni support ni support à l'envers, le pointage des pièces devient nécessaire. En soudage à plat, les bords sont amenés dans le même plan, par planage par exemple afin qu'il n'y ait pas de dénivellation. Après quoi, l'opérateur soude des points espacés d'environ 20 fois l'épaisseur et parfaitement pénétrés. Il emploie pour ce pointage le même procédé TIG que pour l'exécution du cordon. Tout autre procédé provoquerait lors du soudage proprement dit des soufflures ou des fissures.

Les points de soudure doivent avoir de 10 à 30 mm de long selon l'épaisseur des bords.

III.6.7 Mode opératoire

L'amorçage de l'arc doit toujours se faire sur une plaque en cuivre disposé à proximité du début du joint, et bien serrée afin d'éviter les arcs parasites.

Le soudage s'effectue généralement en déplaçant la torche de droite à gauche à une vitesse régulière et en maintenant la longueur d'arc courte et constante.

III.6.7.1 Soudage bout à bout à plat

Pour commencer un cordon il faut former sans métal d'apport un bain de fusion en maintenant la torche immobile. Lorsque la pénétration atteint la valeur désirée, le soudeur commence à déplacer la torche et si nécessaire, à nourrir le bain au moyen de la baguette.

Pour une soudure rectiligne ou un contour non fermé, il est préférable pour éviter le risque de fissuration, de ne pas commencer le cordon à son extrémité mais sur un talon de quelques centimètres. On peut aussi commencer à souder à quelques centimètres du bord en allant vers ce bord, puis reprendre au point initial en soudant vers le bord opposé. Aucune précaution de ce genre n'est à prendre si la soudure à la forme d'un contour fermé, circulaire par exemple.

L'arrêt brusque de l'arc en fin de cordon a pour conséquence la formation d'un cratère avec, très souvent, une fissuration en étoile. Pour éviter ce défaut on peut arrêter l'arc ou en effectuant sur place un léger rechargement.

En cas d'arrêt d'un cordon avant d'avoir atteint son extrémité, il est indispensable de gouger sur quelques 10 à 20 mm et de réamorcer en arrière du point d'arrêt.

Si la soudure, exécutée sur bords chanfreinés d'un seul côté, nécessite une reprise à l'envers, il convient de gouger la racine sur toute sa longueur avant d'effectuer la reprise afin d'éliminer les défauts fréquents à fond de chanfrein. Il en est de même pour les soudures sur chanfreins en X.

III.6.8 Soudage TIG avec protection gazeuse améliorée

Il s'agit d'une variante du procédé TIG classique, décrit ci-dessus. La protection par argon y est considérablement renforcée grâce à l'adoption d'un organe dit « trainard » lié, à la torche, qui distribue une nappe supplémentaire d'argon sur le cordon en cours de refroidissement. En outre, un écoulement de gaz de protection est créé à l'envers du cordon au moyen d'un support rainuré.

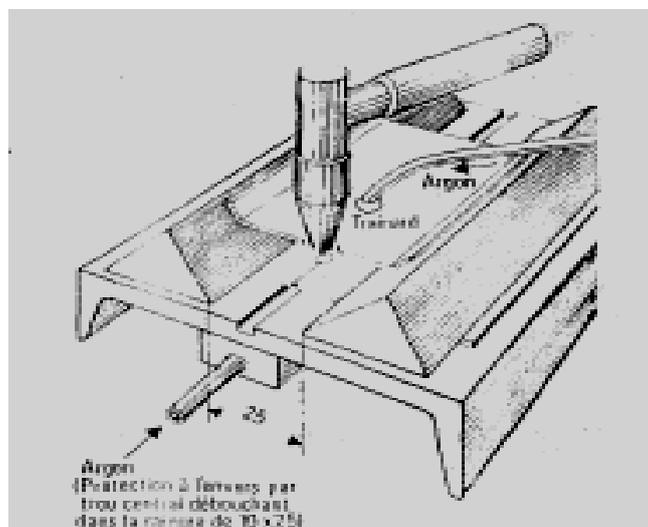


Figure.18 Présent du trainard de la protection à l'envers [31].

La forme du trainard est variable suivant la forme de la pièce et doit être étudiée en conséquence. La (**figure.18**), montre la disposition du trainard.

III.6.9 Soudage des pièces moulées en magnésium

La réparation des pièces défectueuses ou endommagées en magnésium moulé se fait très couramment par soudage TIG, toutefois il n'est pas possible d'obtenir de bons résultats si l'on doit souder des pièces présentant des porosités ou des inclusions d'oxydes importantes. On évitera également de souder des pièces ayant subi des essais d'étanchéité sous pression d'huile. Avant d'entreprendre le soudage d'une pièce moulée en alliage de magnésium, il est indispensable de bien connaître sa composition ainsi que les traitements thermiques qu'elle a subis. Le mieux est de s'en informer auprès du fondeur et, à défauts, d'en pratiquer l'analyse. La pièce doit être soigneusement décapée et dégraissée, la partie défectueuse enlevée au burin et les bords adjacents chanfreinés.

Si la pièce est en plusieurs morceaux, ceux-ci seront maintenus en position par des supports auxiliaires pouvant comporter des supports à l'envers (en Mg ou Cu) s'il y a des volumes important de métal à reconstituer.

Un préchauffage est presque toujours nécessaire surtout si les pièces à réparer sont bridées. Le meilleur moyen pour préchauffer est de se servir d'un four à circulation d'air, toutefois certains alliages de Mg nécessitent le chauffage en atmosphère (anhydride sulfureux ou gaz carbonique). L'opération est terminée dès que la température de préchauffage est atteinte mais la pièce ne doit sortir du four que si le soudage peut être entrepris aussitôt.

Dans le cas où ce soudage demanderait un temps tel que la pièce en subisse un refroidissement. Sensible, Il est indispensable d'interrompre le travail et de recommencer le préchauffage.

Après soudage, le refroidissement sera d'autant plus lent que la pièce est plus massive ou plus compliquée [31].

III.7 Méthodes et critères de validation des paramètres d'assemblages

III.7.1 Contrôles non destructifs (CND)

Après chaque opération de soudage un contrôle visuel à la loupe binoculaire a été effectué suivi par un contrôle par ressuage fluorescent et un contrôle par radiographie de rayons X suivant la norme NFL06-394.

- **Contrôles visuels** : Les cordons de soudure TIG présentent un aspect argenté brillant synonyme d'une absence de contamination et donc de la grande efficacité du système de protection gazeuse utilisé.

- **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 (craquelures, retassures,...) qui sont les plus courants et les plus dangereux. Son principe repose sur l'amplification artificielle du phénomène que constitue la présence du défaut. 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.

- **Radiographie X** : Le contrôle par radiographie de rayons X permet la détection des hétérogénéités, comme les fortes ségrégations chimiques ou les inclusions, 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). L'irradiation du joint de soudeuse s'effectue par des rayons X produits par un tube à émission et les interactions rayonnement/matière (émissions de photoélectrons) vont provoquer des différences relatives d'absorption du rayonnement selon les hétérogénéités présentes. La perte d'énergie des rayonnements est mesurée à l'aide de détecteurs. Les zones traversées sans hétérogénéités sont vues en clair alors que les éventuels défauts donnent des zones sombres. Globalement les assemblages TIG réalisés ne contenaient pas de défauts volumiques même si quelques rares éprouvettes ont présenté des porosités, néanmoins conformes pour une classification de série 2. Cependant, pour éviter de perturber les résultats des nombreux essais de caractérisation mécanique, les soudures qui présentaient des anomalies lors du contrôle n'ont pas fait l'objet d'essai et ont été remplacées par des soudures conformes [28].

ETUDE EXPERIMENTALE

CHAPITRE

IV

DISPOSITIF EXPERIMENTAL

DISPOSITIF EXPERIMENTAL

IV.1 Eléments du dispositif expérimental

IV.1.1 Matériaux

L'alliage de Magnésium utilisé pour le soudage est de nuance AM60B, pièces de fonderie de moulage mécanique sous pression, les pièces à des épaisseurs de (3- 6 mm) et de composition chimique moyenne présentée sur le [Tab.7]

Tableau.7 : Composition chimique de l'alliage de magnésium AM60B [7].

Elément	Al	Mn	Zn	Si	Cu	Ni	Fe	Bé	Autre terre
Teneurs (%)	05,6 - 6,4	0,26 - 0,50	0,20 max	0,05 max	0,008 max	0,001 max	0,004 max	0,0005 - 0,0015	0,01 max

IV.1.2 Equipements du poste soudage TIG

Les procédures expérimentales sont entièrement conçu, réalisés et mise au points à l'atelier de soudage du CSC dans le cadre des études de soudage TIG. Une vue d'ensemble de cette équipement est présentée dans la (figure.19).

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



Figure.19 poste de soudage TIG.

IV.1.3 Thermocouple

Le Thermocouple utilisé pour le prélèvement des températures est de type K, relié au système d'acquisition ELTEK1000 dont les données enregistrés sont transférés sur PC via le logiciel squerrel meter /logger.



Figure.20 système ELTEK d'acquisition des températures.

IV.1.4 Enrobage

Le matériel utilisé est présenté dans la figure ci-dessous.

<p align="center">ENROBAGE À FROID TECHNOVIT 4071</p>	
<p align="center">ACCESSOIRES POUR L'ENROBAGE Moules d'enrobage en caoutchouc silicone</p>	

Figure.21 Enrobage à froid

IV.1.5 Polissage

DRAPS DE POLISSAGE		
PAPIERS		GRAIN
Papier abrasif rigoureux		120 180 400
Papier abrasif lisse		600 1000

Figure.22 Papiers abrasifs

IV.1.6 Polissage de finition

- L'alumine
- Pâte diamantée

ABRASIFS À BASE DE DIAMANTS PÂTE DIAMANTÉE • soluble à l'eau		
MICRON	GRAMMES	
3	5	

SUSPENSION DIAMANTÉE • soluble à l'eau.		
POLYCRISTALLINE (CHROMIC OXIDE POLISHING ABRASIVE)		
MICRON	UNITÉ	
1	6 FL. oz.	

Figure.23 Polissage de finition

IV.1.7 Polisseuse

Le polissage est réalisé au niveau du département de métallurgie à l'Ecole Nationale Polytechnique (ENP). Le microduromètre utilisé est de marque : MECAPOL P200.



Figure.24 Polisseuse

IV.1.8 Microscope optique

Le microscope optique utilisé est de type : Zeiss doté d'une caméra CCD avec utilisation d'un logiciel ATLAS de traitement d'images (**Figure.25**).



Figure.25 microscope optique Zeiss

IV.1.8.1 Les constituants d'un microscope optique



Figure.26 Les constituants d'un microscope optique.

IV.1.9 Micro-duromètre

L'essai de microdureté est réalisé au niveau du département de métallurgie à l'Ecole Nationale Polytechnique (ENP). Le microduromètre utilisé est de marque :

SHIMATZU HMV-M3 (Fig.27). L'HMV-M3 utilise le principe de l'empreinte de dureté.

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

$$HV = 1,8544 \cdot 10^3 \cdot \frac{F}{d^2}$$

d (μm) : est la moyenne des diagonales

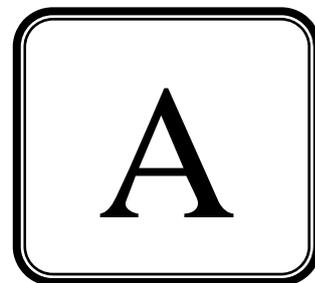
F : est la force appliquée en KiloNewton.



Figure.27 Microduromètre SHIMATZU HMV-M3

RESULTATS ET DISCUSSIONS

PARTIE



MODES OPERATOIRES

V.A Le soudage de l'AM60B

Le problème auquel nous sommes confronté au départ été de comprendre le comportement de ce matériau au soudage et le choix final des paramètres de soudage adéquats. En effet, plusieurs soudures sont réalisées dont certains paramètres relatifs au procédé TIG sont inchangés tels que :

Type de gaz : Argon industriel avec un débit entre 8 -9 (L/min).

Diamètre de l'électrode de tungstène (\varnothing) 2 (mm).

Préparation d'échantillon : Décapage mécanique de la surface de la pièce avec papier abrasif.

V.A.1 Effets des paramètres de soudage

Sont considérés comme des paramètres de soudage, l'Intensité(I), la tension et la vitesse de soudage qui déterminent l'énergie nominale définie par :

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

Avec : $v = x / tps$ (mm/s).

V.A.1.1 Effet de la vitesse de soudage sur la largeur et la pénétration du cordon

Pour apprécier l'effet de la vitesse dans un premier temps nous avons fixé l'intensité de soudage et la tension. Trois soudures sans métal d'apport (**figure.28**) sont réalisées sur une tôle de 6mm d'épaisseur et de longueur de 750mm.

Les paramètres de soudage dans cette expérience sont présentés sur le [Tab.8].

Tableau.8 paramètres de soudage.

Type de Courant : Alternatif 50%.								
Position	I (A)	U (volt)	x (mm)	tps (s)	V (mm/s)	E_n (J/mm)	Pénétration (mm)	Largeur (mm)
Cordon 1	74	14	75	40	1,875	552,5333	1	8
Cordon 2	74	14	75	37	2,027027	511,0933	0,9	7
Cordon 3	74	14	75	60	1,25	828,8	5	12

Observation

- largeur du cordon différent dans les trois passes.
- Pénétration très importante à faible vitesse de soudage avec légère déformation.
- Apparition des porosités, soufflures et des brulures.
- Légère concavité.



Figure.28 Influence de la vitesse du soudage sur la largeur et la pénétration.

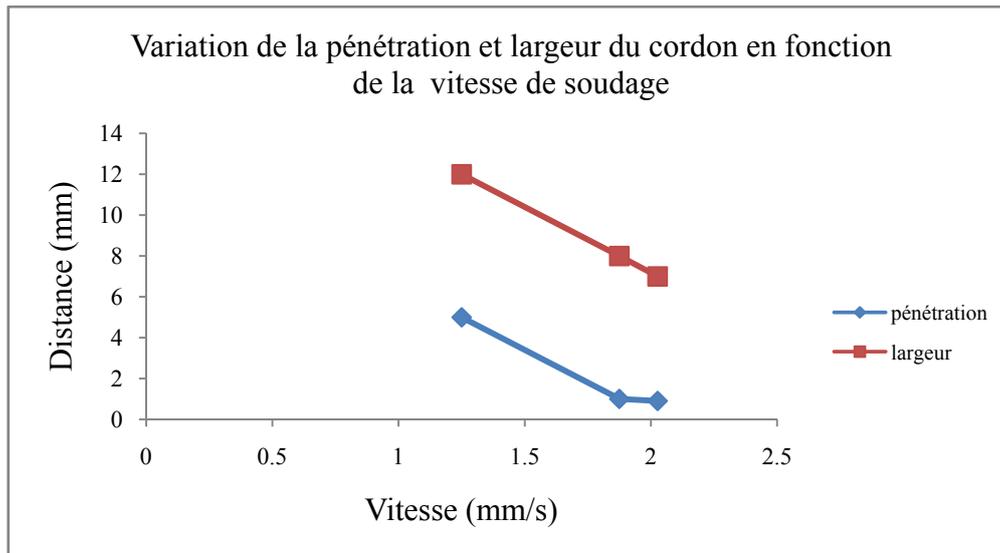


Figure.29 variation de pénétration et largeur du cordon en fonction de la vitesse de soudage.

Une vitesse de soudage trop lente peut être la cause des déformations dues à un échauffement excessif. La largeur du cordon est inversement proportionnelle à la vitesse à laquelle se déplace la torche ou la tête de soudage. Il en est de même pour la pénétration, mais dans une moindre mesure. La concavité obtenue est due à l'énergie de soudage mise en jeu. Elle augmente avec la diminution de la vitesse et fait augmenter ainsi la pénétration.

La (**figure.29**) indique, que pour une même valeur d'intensité, la variation de la profondeur de la pénétration et de la largeur du cordon est fonction de la vitesse de soudage.

V.A.1.2 effet de la répartition de la chaleur

Dans ce travail nous avons voulu comprendre les phénomènes thermiques du soudage sur l'alliage. A cet effet, des thermocouples de type K sont implantés sur une éprouvette (**figure.30**) pour le prélèvement des températures atteintes dans les 2 soudures (à l'endroit et à l'envers) (**figure.31**) et (**figure.32**). Le prélèvement est effectué grâce au système d'acquisition ELTEK1000 dont les données sont enregistrés et transférées sur PC via le logiciel squerrel meter /logger. Les paramètres de soudage appliqués sur une tôle d'épaisseur de 6mm et de longueur de 150mm sont représentés sur le [**Tab.9**].

Deux thermocouples sont implantés à des distances différentes au voisinage du cordon (la distance entre les deux thermocouples est de 10 cm) :

- Thermocouple (T_1) 10 mm.
- Thermocouple (T_2) 7 mm.

Tableau.9 Paramètres de soudage.

Type de Courant : Alternatif 50%.						
Position	I (A)	V (volt)	x (mm)	tps (s)	Vitesse (mm/s)	E_n (J/mm)
Endroit	78	15	145	66	2,1969697	532,5517241
Envers	78	15	140	126	1,11111111	1053,0

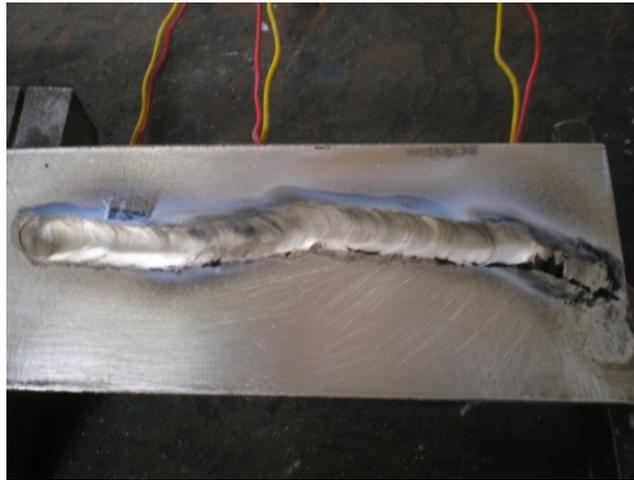


Figure.30 Implantation des Thermocouples.

Les courbes des cycles thermiques prélevés sur les deux soudures (endroit et envers) présentent une phase d'échauffement très rapide jusqu'à une température maximale puis une phase de refroidissement plus au moins rapide.

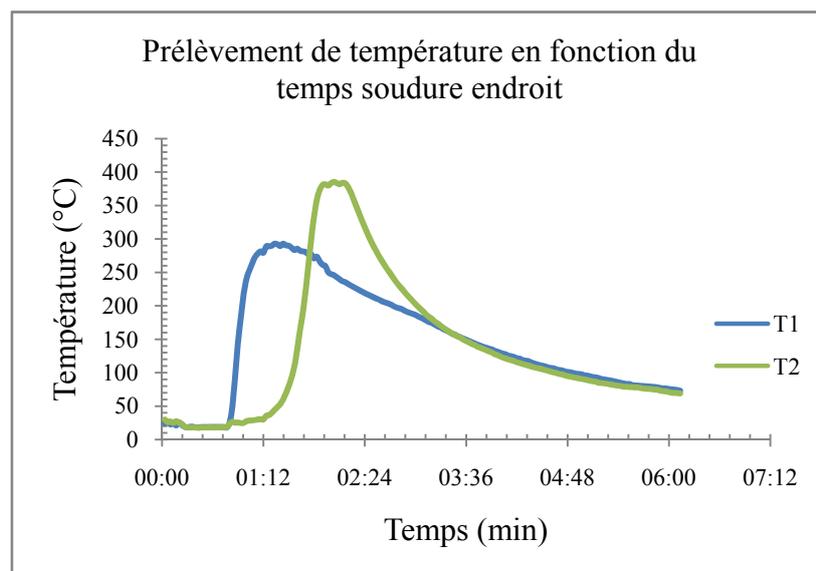


Figure.31 Prélèvement de la température soudure endroit.

La figure ci-dessus montre que la température maximale atteinte est de 290°C pour le Thermocouple T₁ et de 370°C pour le thermocouple T₂. Cet écart de température s'explique par la position de chacun par rapport à l'arc et par l'effet de la conduction de la chaleur de l'alliage due au déplacement de l'arc en produisant ainsi un effet de préchauffage de cet endroit qui diminue le gradient thermique constaté sur le thermocouple T₁.

Ce constat est observé lors de la soudure envers comme présenté sur la (**figure.32**), avec inversement du sens du soudage. Les températures prélevées sont de 548°C pour thermocouple T₂ et 455°C pour le thermocouple T₁.

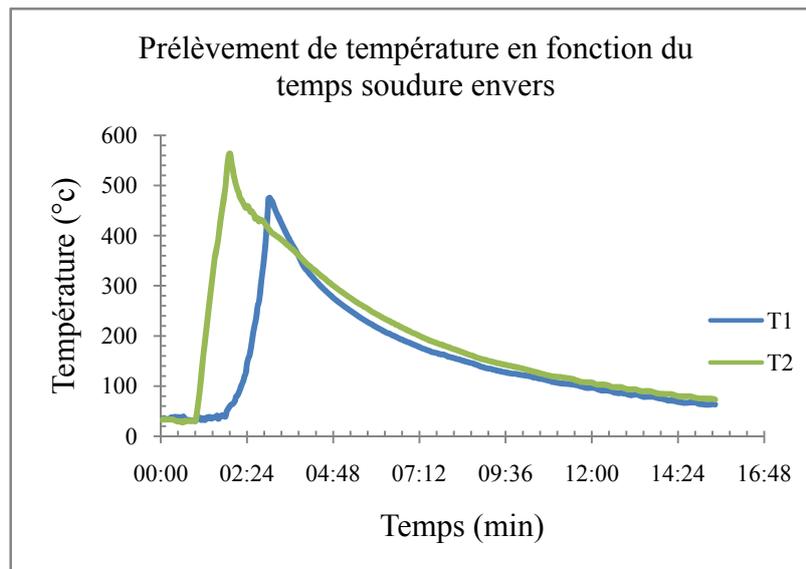


Figure.32 Prélèvement de la température soudure envers.

V.A.1.3 Effet de l'intensité sur la stabilité de l'arc

On réalise un assemblage bout à bout de deux tôles d'alliage de magnésium d'épaisseur de 3mm et de longueur de 150mm, sur lequel deux thermocouples sont implantés à une distance distancés entre eux de 90mm et à une distance de 10mm du bord de la pièce avant soudage, qui se réduit à 2mm et 6mm à la limite du cordon respectivement des deux thermocouples T_1 et T_2 après soudage. La soudure est réalisée avec un préchauffage à une température de 150°C, et avec des paramètres de soudage donnés par le [Tab.10]. La soudure envers réalisée est en fait la conséquence d'un manque de pénétration lors du soudage endroit.

Les résultats obtenus (**figure.33**) montrent une mauvaise qualité de la soudure où des perçages, des manques de pénétration et des porosités sont constatés pour les différents paramètres appliqués. En effet, plusieurs intensités sont appliquées en soudage endroit en différents endroits telles que :

Pour un déplacement de l'arc de 50mm avec une intensité de 75A avec une vitesse de 3,33 (mm/s). Nous avons constaté une fusion complète des bords soudés. C'est pourquoi, nous avons diminué la l'intensité à 68A qui a permis à l'opérateur la maîtrise de son arc mais malgré cela, nous avons obtenu un manque de pénétration. Pour rattraper le défaut une soudure envers est exécutée avec une intensité de 58A en assurant sur une partie une pénétration.

Tableau.10 paramètres de soudage.

Type de Courant : Alternatif 50%.						
Position	I (A)	V (volt)	x (mm)	tps (s)	Vitesse (mm/s)	E_n (J/mm)
Endroit	75	14	50	15	3,333333333	315,0
	68	14	50	18	2,777777778	342,72
Envers	68	14	35	10	3,5	272,0
	58	14	85	37	2,297297297	353,458824

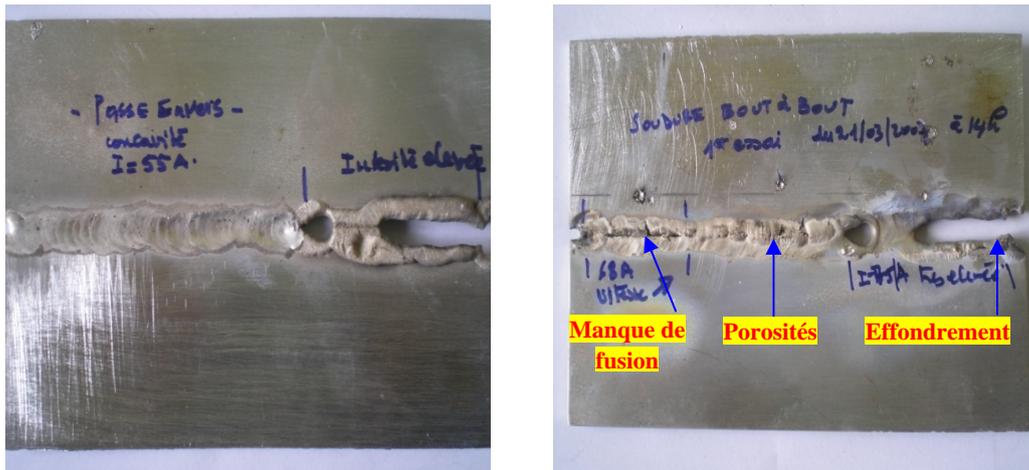


Figure.33 Présentation des soudures endroit et envers.

De là, plus l'intensité augmente, plus la vitesse de soudage doit augmenter. Néanmoins, il est difficile d'arriver à apprécier l'effet de l'intensité dans le cas du soudage TIG manuel où des variations de vitesses de déplacement de l'arc sont gérées par le facteur humain.

Les températures prélevées par les thermocouples T_1 et T_2 sont de respectivement de 545°C et de 367°C avec une température initiale qui est de l'ordre de 150°C représentant la température de préchauffage (**figure.34**). Si on se réfère au diagramme d'équilibre Mg-Al nous constatons que la température prélevée par T_1 exprime les résultats obtenus sur la soudure dus à la forte densité d'énergie appliquée sur cette partie de l'échantillon. La température de 367°C du thermocouple T_2 exprime la température de mise en solution d'une éventuelle phase γ .

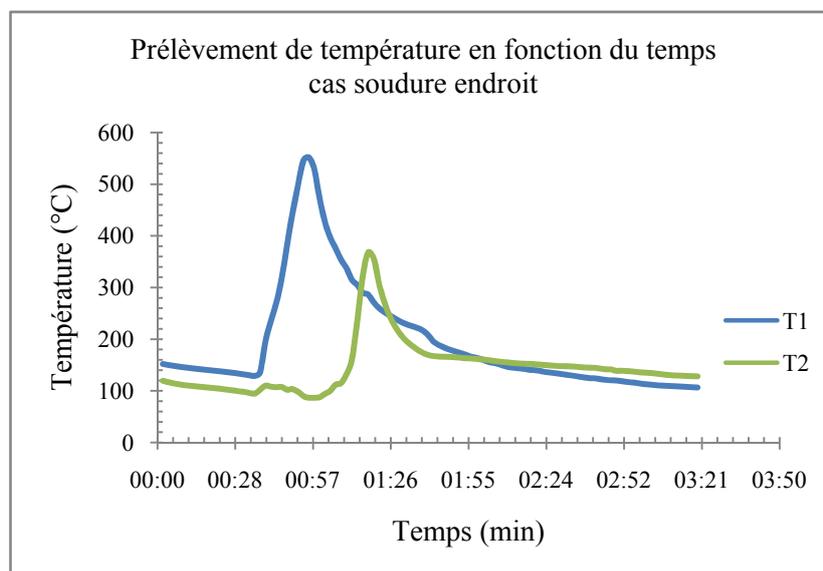


Figure.34 Prélèvement de la température soudure endroit.

En soudage envers, seule la température du thermocouple T_2 est prélevée (**figure.35**). La température maximale prélevée est de l'ordre de 399°C avec une température initiale de l'ordre de 60°C .

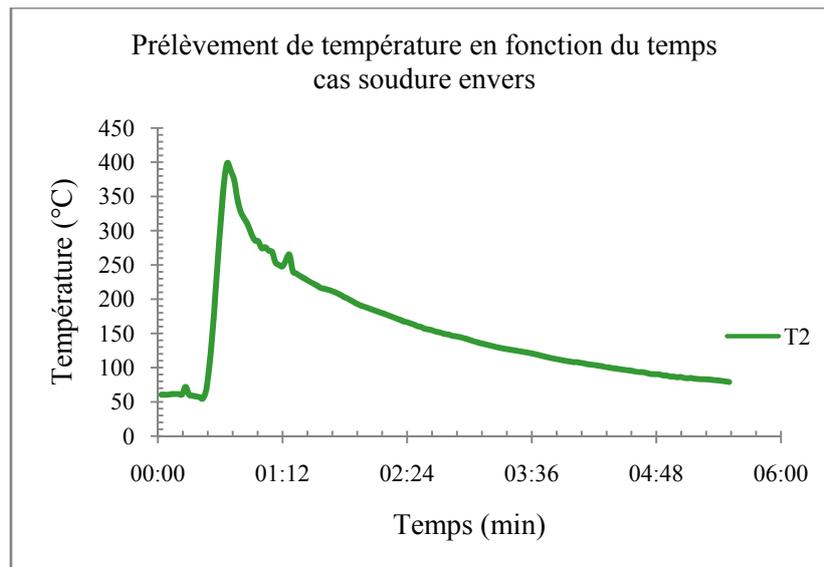


Figure.35 Prélèvement de la température soudure envers.

V.A.2 Maîtrise des paramètres de courant Pulsé et Alternatif du poste de soudage

L'objectif essentiel lors de cette expérience en utilisant le courant pulsé est de connaître l'effet de ce dernier sur la stabilité de l'arc. Il est à noter que c'est la première fois qu'un tel courant est utilisé dans le soudage des alliages non ferreux tels que les alliages d'aluminium et du magnésium.

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

Dans un premier temps nous avons voulu apprécier les différents paramètres du courant pulsé sur la stabilité de l'arc dans le but de la maîtrise des paramètres du poste et les conséquences y afférent.

Les conditions opératoires sont de fixer :

Le pic (peak) à 50% : la commande qui permet de régulariser le pic du courant bas à un écart de 50% du pic du courant haut ;

La durée de passage (t_h , t_b) (times) à 50% : la commande qui permet de régulariser le rapport du courant haut ou/ et bas pendant sa durée de passage sur la période.

Ces paramètres ci-dessus sont appliqués pour toutes les expériences que nous avons réalisés (**figure.36**).

Ces expériences consistent à faire varier la fréquence pour une intensité constante et la fréquence constante pour des intensités variables sur une tôle de l'alliage AM60B de dimensions 65mm de largeur, de 145mm de longueur et 6mm d'épaisseur.



Figure.36 Commande du courant pulsé.

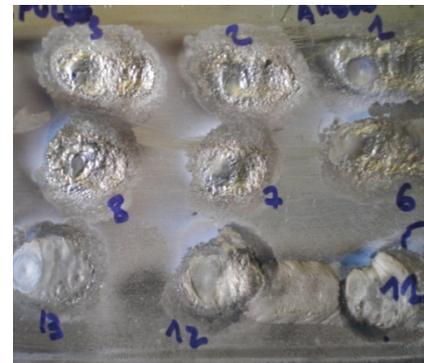
➤ **Premier essai : $I = f(F)$**

On fixe l'intensité chaque fois et on fait varier le nombre de pulsations (fréquence). La fréquence par définition c'est le nombre de pulsations par seconde. Les résultats obtenus sont présentés sur les tableaux ci-dessous.

• **Pour Intensité $I = 60 A$**

Tableau.11 Paramètres de soudage.

N°	I (A) haut	I (A) bas	V (volt)	tps (s)	Fréquence (Hz)
1	63	33	14	42	0,6
2	64	38	14	34	1
3	59	42	14	34	2
4	63	33	15	16	0,6
5	64	38	14	31	1
6	59	42	14	34	2
7	53	52	14	40	6
8	55	52	14	25	10



1, 2, 3, 4, 5,6, 7, 8 manques de fusion et instabilité de l'arc.

• **Intensité $I = 75 A$.**

Tableau.12 Paramètres de soudage.

N°	I (A) haut	I (A) bas	V (volt)	tps (s)	Fréquence (Hz)
9	79	48	14	40	0.6
10	80	51	14	28	1
11	74	57	14	18	2
12	66	63	15	19	6
13	69	66	14	10	10



9,10, 11,12 instabilités de l'arc et manque de fusion.

13 meilleurs mouillages du bain de fusion et stabilité de l'arc.

On trace les histogrammes de la variation du courant haut et bas en fonction de la fréquence.

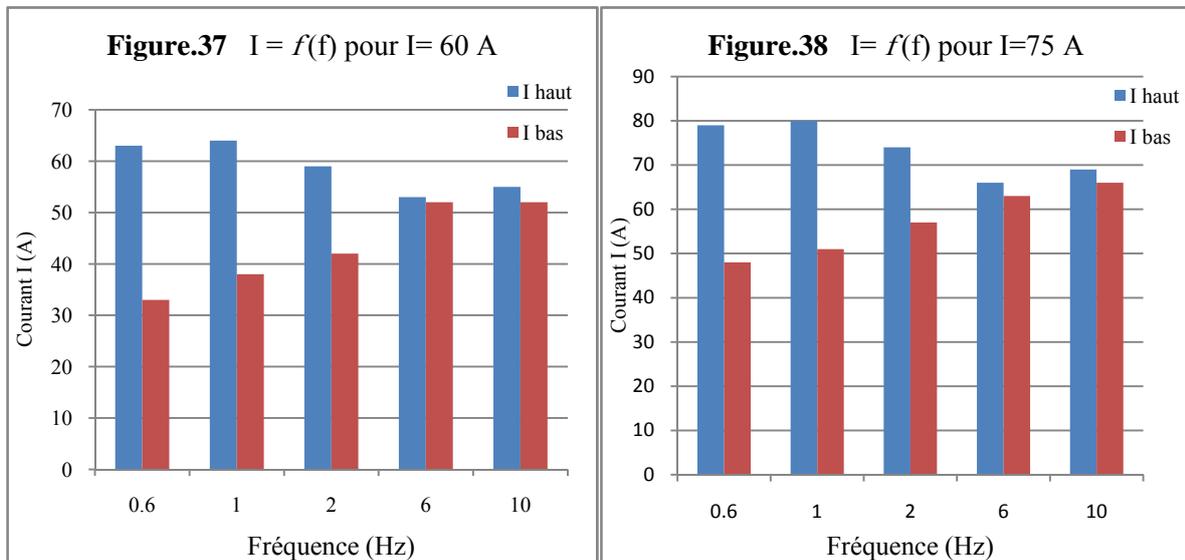


Figure.37, 38 Variations de l'intensité en fonction du nombre de pulsations.

➤ **Deuxième essai : $F = f(I)$**

On fixe le nombre de pulsations chaque fois et on fait varier la valeur de l'intensité pré réglée du poste de soudage.

- **Fréquence = 0.6 (Hz). Pour I (60, 75, 90, 100, 110).**

Tableau.13 Paramètres de soudage.

N°	I (A) haut	I (A) bas	V (volt)	tps (s)	Fréquence (Hz)
4*	63	33	15	16	0,6
9*	79	48	14	40	0.6
14	82	55	14	16	0.6
15	100	61	15	10	0.6
16	109	66	14	7	0.6



Pour une fréquence de 0.6 nous avons obtenu une meilleure stabilité de l'arc qu'avec des intensités supérieures à 90A qui ont donnés une meilleure fluidité et mouillage du bain de fusion. L'écart entre l'intensité du courant haut et bas diminue en fonction de l'augmentation de l'intensité est de l'ordre de 50% pour une intensité de 60 A et de l'ordre 40% pour une intensité de 110A.

- **Fréquence = 1 (Hz). Pour I (60, 75, 90, 100, 110).**

Tableau.14 Paramètres de soudage.

N°	I (A) haut	I (A) bas	V (volt)	tps (s)	Fréquence (Hz)
5*	64	38	14	31	1
10*	80	51	14	28	1
17	88	56	15	14	1
18	99	66	15	13	1
19	109	67	15	7	1

Pour une fréquence de 1 nous avons obtenu une meilleure stabilité de l'arc qu'avec des intensités supérieures à 90A qui ont donnés une meilleure fluidité et mouillage du bain de fusion. L'écart entre l'intensité du courant haut et bas diminue en fonction de l'augmentation de l'intensité est de l'ordre de 40% pour une intensité de 60 A et de l'ordre 40% pour une intensité de 110A.

- **Fréquence = 2 (Hz). Pour I (60, 75, 90, 100, 110).**

Tableau.15 Paramètres de soudage.

N°	I (A) haut	I (A) bas	V (volt)	tps (s)	Fréquence (Hz)
6*	59	42	14	34	2
11*	74	57	14	18	2
20	89	62	15	9	2
21	96	73	15	9	2
22	103	82	15	10	2

Pour une fréquence de 2 nous avons obtenu une meilleure stabilité de l'arc qu'avec des intensités supérieures à 90A qui ont donnés une meilleure fluidité et mouillage du bain de fusion. L'écart entre l'intensité du courant haut et bas diminue en fonction de l'augmentation de l'intensité est de l'ordre de 30% pour une intensité de 60 A et de l'ordre 40% pour une intensité de 110A.

- **Fréquence = 6 (Hz). Pour I (60, 75, 90, 100, 110).**

Tableau.16 Paramètres de soudage.

N°	I (A) haut	I (A) bas	V (volt)	tps (s)	Fréquence (Hz)
7*	53	52	14	40	6
12*	66	63	15	19	6
23	75	74	15	14	6
24	88	87	15	11	6
25	94	92	15	9	6

Pour une fréquence de 6 nous avons obtenu une meilleure stabilité de l'arc qu'avec des intensités supérieures à 90A qui ont donnés une meilleure fluidité et mouillage du bain de fusion. L'écart entre l'intensité du courant haut et bas diminue en fonction de l'augmentation

de l'intensité est de l'ordre de 3% pour une intensité de 60 A et de l'ordre 3% pour une intensité de 110A.

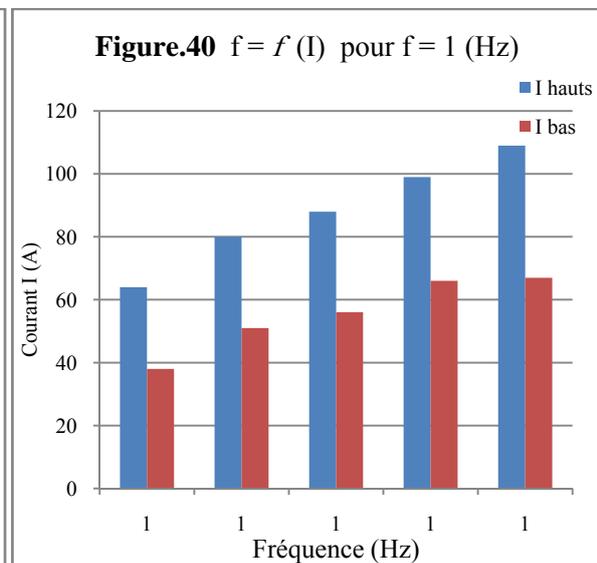
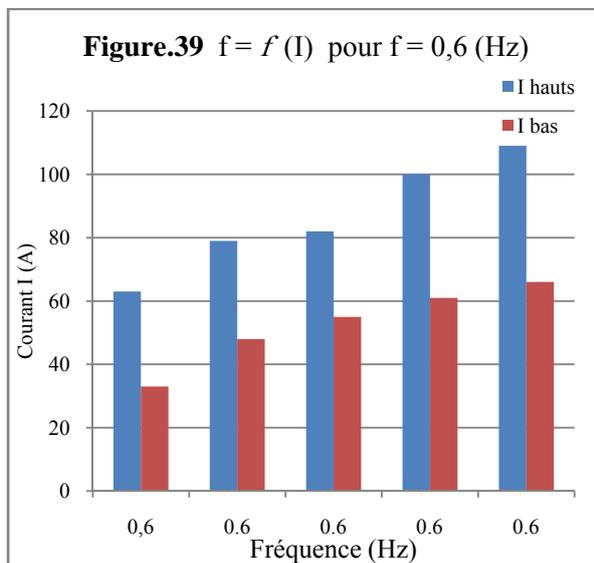
- **Fréquence = 10 (Hz). Pour I (60, 75, 90, 100, 110).**

Tableau.17 Paramètres de soudage.

N°	I (A) haut	I (A) bas	V (volt)	tps (s)	Fréquence (Hz)
8*	55	52	14	25	10
13*	69	66	14	10	10
26	79	78	15	10	10
27	86	84	15	10	10
28	95	92	15	30	10

Pour une fréquence de 10 nous avons obtenu une meilleure stabilité de l'arc qu'avec des intensités supérieures à 75A qui ont donnés une meilleure fluidité et mouillage du bain de fusion. L'écart entre l'intensité du courant haut et bas diminue en fonction de l'augmentation de l'intensité est de l'ordre de 3% pour une intensité de 60 A et de l'ordre 2% pour une intensité de 110A.

On trace les histogrammes de la variation de la fréquence en fonction du courant haut et bas.



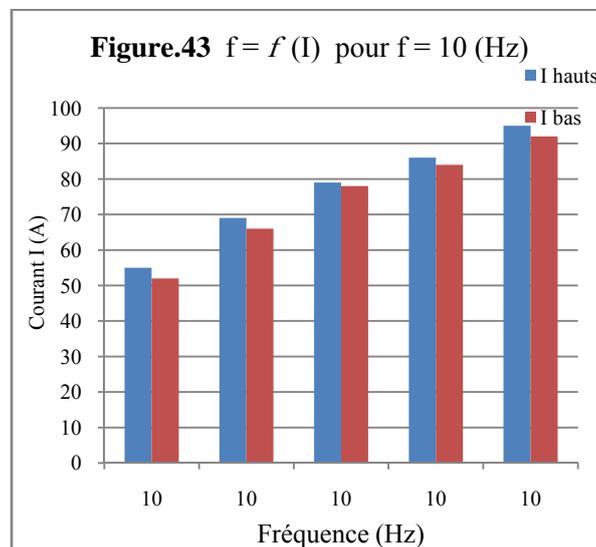
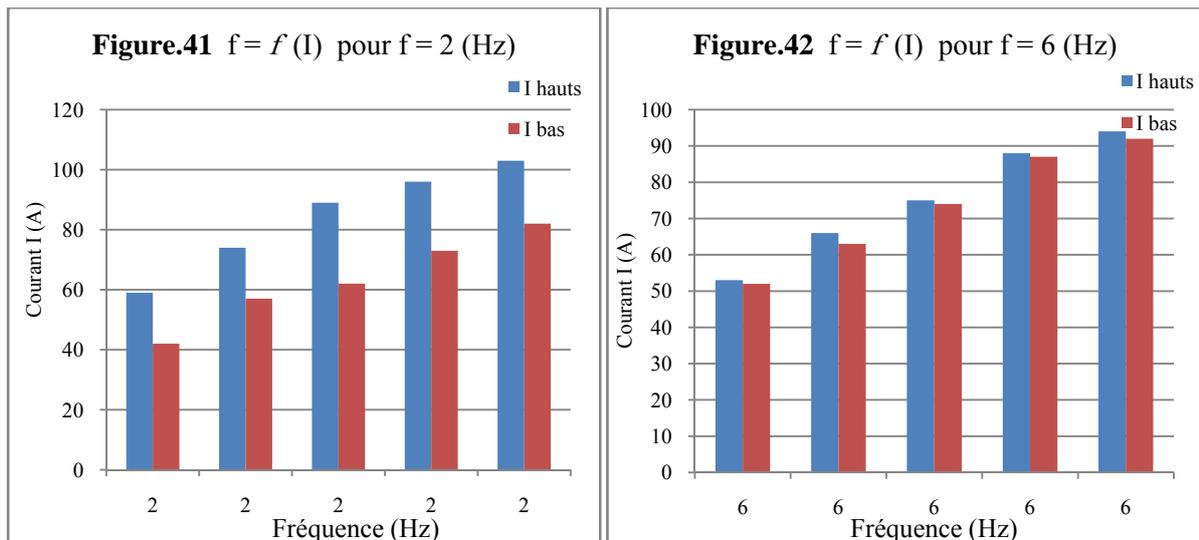


Figure.39, 40, 41, 42,43 Variations de la fréquence en fonction de l'intensité.

La stabilité de l'arc électrique et du bain de fusion sont liées à l'intensité du courant de soudage et la fréquence. Cette modulation du courant permet une régulation du cycle thermique, en particulier, il est possible de procéder à la fusion de petite partie seulement du métal de base pendant les temps de passage du courant de haut, avec solidification au moins partielle pendant les temps de passage du courant de bas. Ce qui est souhaitable dans certains cas opératoire.

On constate que l'augmentation de la fréquence influe notablement sur le pic du courant haut et du courant bas, c'est-à-dire, l'augmentation du nombre de pulsations pour une même période de (1seconde) ne permet pas aux courant du haut et du bas d'atteindre leurs pics, c'est pour cela que le courant se stabilise à un certain nombre de pulsations (plus élevés), en procurant une tendance à ressembler à un courant continu.

V.A.2.1 Effet des paramètres en mode Pulsé sur les soudures

Après avoir compris les paramètres et effets du courant pulsé, nous avons procédé à la réalisation des soudures bout à bout sur des tôles de l'alliage AM60B d'épaisseur de 3mm.

Deux expériences ont été réalisées l'une sans protection à l'envers et l'autre avec protection en choisissant comme fréquence 1Hz. Le but de ces expériences est la compréhension des effets du choix des paramètres et de la protection à l'envers sur l'aspect et la qualité du joint soudé.

➤ Soudure sans protection à l'envers

Les paramètres de soudage appliqués aux tôles de même épaisseur et de longueur de 138mm sont présentés sur le [Tab.18].

Tableau.18 Paramètres de soudage.

Type de Courant : Pulsé									
Position	I (A) haut	I (A) bas	V (volt)	x (mm)	tps (s)	V (mm/s)	E _n hauts (J/mm)	E _n bas (J/mm)	Fréquence (Hz)
Pour I = 70 A									
Endroit	65	39	15	40	54	0,7407407	1316,25	789,75	1
Pour I = 58 A									
Endroit	60	36	15	85	62	1,37096	656,470	393,882	1
Envers	60	38	15	80	45	1,7777778	506,25	320,625	1

La (figure.44), Montre le résultat de l'effet des paramètres de soudage appliqués tel que : un effondrement est observé pour une intensité de 70A qui est corrigé en donnant une bonne continuité métallique avec apparition de porosités à la surface.

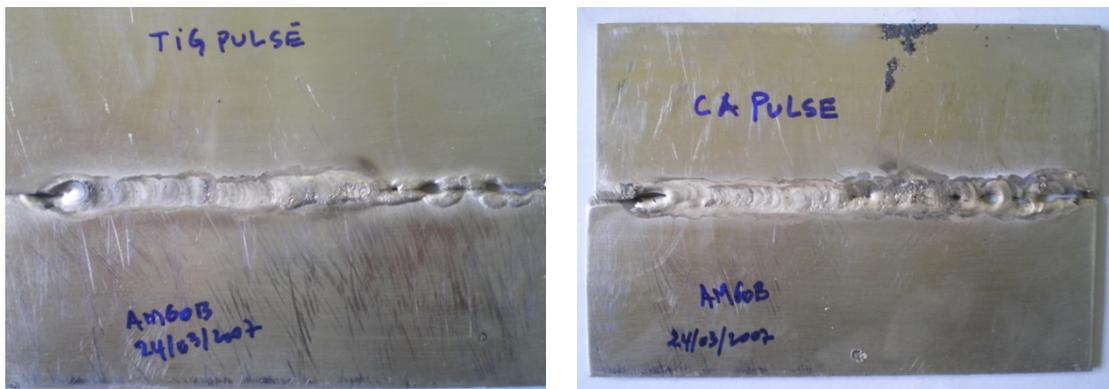


Figure.44 soudure endroit et envers sans protection

➤ Soudure avec protection à l'envers

La protection à l'envers consiste à injecter un gaz inerte sous les tôles à souder qui est dans notre cas de l'argon avec un débit de 6L/mn. Pour cela, un système pour cette protection est réalisé pour l'exécution d'une soudure sous atmosphère contrôlée en évitant ainsi la formation de la magnésie.

Les conditions opératoires appliquées sur une longueur de 75mm sont présentées dans le [Tab.19].

- $I = 60 \text{ A}$.

Tableau.19 Paramètres de soudage.

Type de Courant : Pulsé									
Position	I (A) haut	I (A) bas	V (volt)	x (mm)	tps (s)	V (mm/s)	E_n hauts (J/mm)	E_n bas (J/mm)	Fréquence Hz
Endroit	62	38	15	75	57	1,31578947	706,8	433,2	1
Envers	59	37	15	68	58	1,17241379	754,853	473,382	1



Figure.45 Deux passes de soudure endroit et envers

On constate qu'avec une vitesse variant entre 1,1 et 1,3 (mm/s) on obtient une bonne stabilité de l'arc et de bain de fusion pour une intensité de 60A, avec et sans protection à l'envers. Se qui est favorable pour assurer une pénétration.

Le courant de base assure le maintien de l'apport thermique nécessaire et contribue à éviter le déplacement de l'arc ; il sert également à agir sur la vitesse et la température de refroidissement. Il doit donc avoir une durée qui permet un refroidissement suffisant du cordon.

On peut ainsi réduire les risques de fissuration à chaud du fait que la chaleur se répartit moins, puisque la zone fondue se refroidit entre les impulsions et que, par suite, la surchauffe est évitée.

Il apparaît que, par suite de réduction de la porosité, l'absorption de gaz est moindre, cet avantage peut être compensé par l'inconvénient d'un dégazage plus difficile puisque le refroidissement est plus rapide ; il peut être avantageux d'augmenter le courant de base pour éviter la porosité.

Enfin, un courant de haut I_h élevé avec un courant de base I_b faible produisent une zone en fusion plus rapidement et réduisent l'apport de chaleur nécessaire. Par contre, les impulsions avec un rapport I_b/I_h élevé donnent une formation plus régulière du cordon fond.

V.A.2.2 Effet des paramètres en courant alternatif sur les soudures

L'opportunité qu'offre le poste TIG de posséder la caractéristique du courant pulsé et du courant alternatif, qui aussi utilisé pour le soudage des alliages de magnésium.

Nous avons voulu voir les effets de ce dernier sur la qualité d'une soudure en maîtrisant aussi les paramètres technologiques du poste à souder à savoir : l'influence de la polarité du cycle alternatif. Néanmoins, les mêmes expériences dans le cas du courant pulsé sont reconduites.

➤ Soudure avec protection à l'envers

Cette expérience est assurée avec implantation de thermocouples (**figure.46**) afin d'apprécier les effets des cycles thermiques de soudage. Les paramètres de soudage appliqués sont présentés dans le [Tab.20].

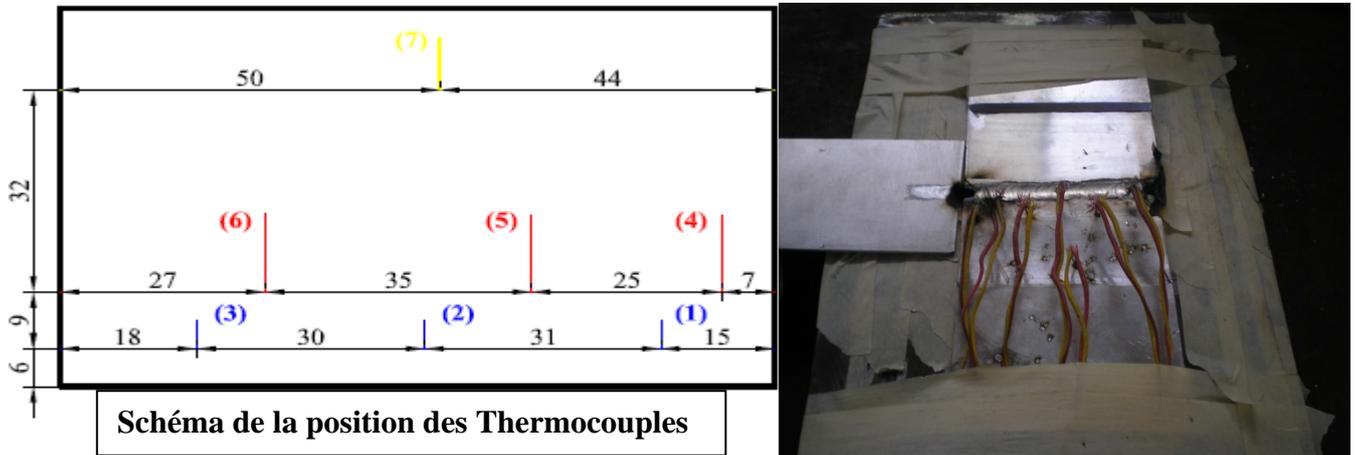


Figure.46 Illustration de l'assemblage après soudage, implantation des thermocouples et protection à l'envers.

- I = 52 A

Tableau.20 Paramètres de soudage.

Type de Courant : Alternatif (2/3 pénétration et 1/3 nettoyage).						
	I (A)	V (volt)	x (mm)	tps (s)	V (mm/s)	E _n (J/mm)
Cordon	64	14	90	40	2,25	398,2222222

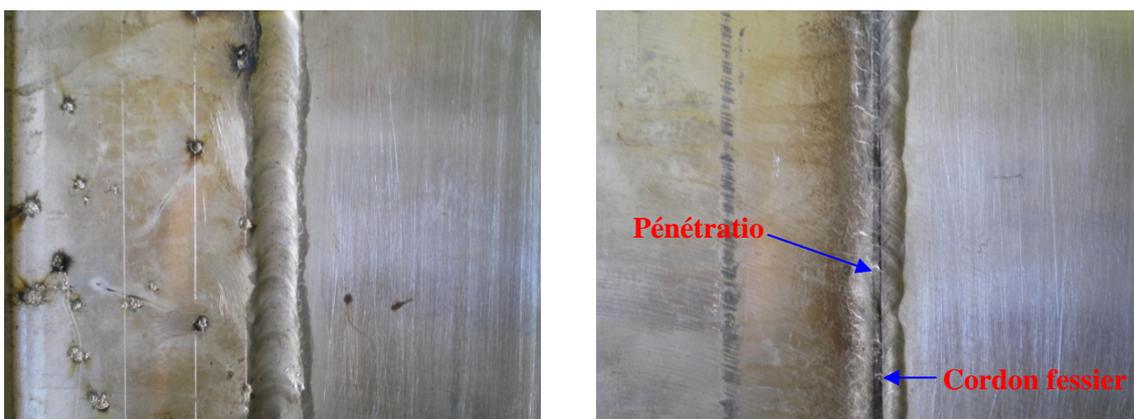


Figure.47 Soudure (face à l'endroit et à l'envers).

La (**figure.47**) montre un bel aspect du cordon de soudure avec apparition sur la face envers un trait au milieu est du probablement au gaz qui joue un double rôle : la protection et le refroidissement du bain de fusion.

Les températures prélevées par les thermocouples sont représentées sur la (**figure.48**). Théoriquement, un cycle thermique du soudage est caractérisé par la vitesse de montée, de la température maximale atteinte, du temps de séjour à une température et de la vitesse de refroidissement. Ainsi, les cycles thermiques prélevés montrent que l'allure et les températures maximales atteintes dépendent de la distance de l'emplacement des thermocouples par rapport au bord du joint soudé et du déplacement de la source de chaleur.

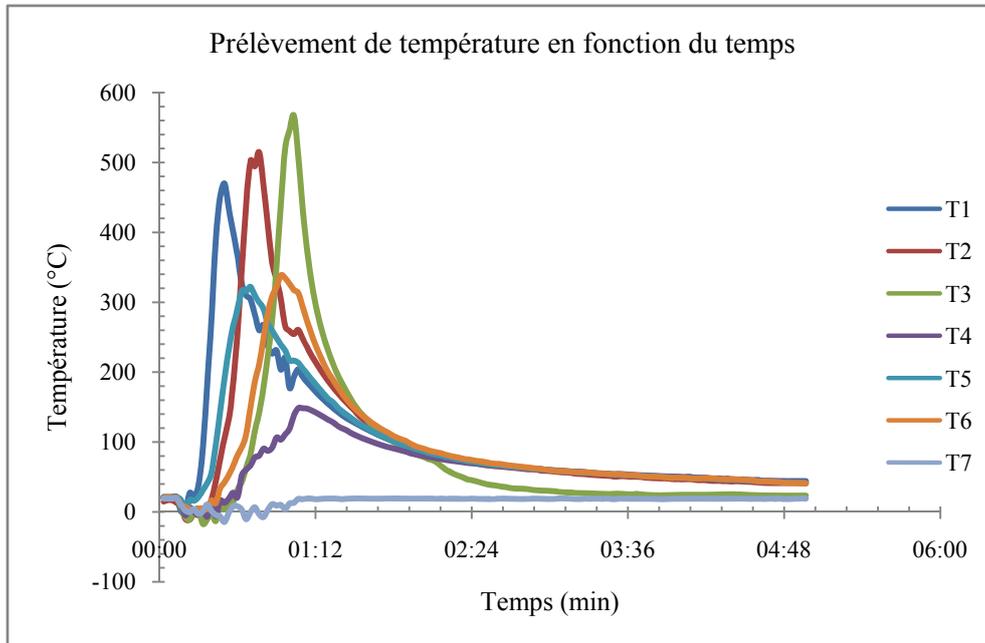


Figure.48 Prélèvement de température en fonction du temps

➤ **Soudure sans protection à l'envers**

Les paramètres de soudage appliqués sont présentés dans le [**Tab.21**].

- **I = 52 A**

Tableau.21 Paramètres de soudage

Type de Courant : Alternatif (2/3 pénétration et 1/3 nettoyage).						
	I (A)	V (volt)	x (mm)	tps (s)	V (mm/s)	E _n (J/mm)
Cordon	62	15	80	36	2,22222222	418,5



Figure.49 Soudures envers.

D'après ce travail, nous pouvons dire que pour une vitesse de 2,2 (mm/s) on obtient une bonne stabilité de l'arc et de bain de fusion pour une intensité de 52A, avec et sans protection à l'envers se qui est favorable pour assurer une bonne pénétration.

L'effet de la conduction de la chaleur de l'alliage à travers le déplacement de l'arc en produisant un effet de préchauffage des zones voisines comme le montre (**figure.48**). On remarque que le gradient thermique diminue en s'éloignant de la source de la chaleur.

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

Les ondes de courant sont d'amplitudes très inégales. En d'autres termes, il circule dans les conducteurs une composante de courant continu qui est précisément dans le sens non favorable au décapage électronique du bain de fusion.

- L'arc devient instable.
- Le film d'oxydes formé conduit à un état de surface défectueux du cordon, à des inclusions inacceptables et à des conditions opératoires défavorables.

En effet, les ions de gaz inerte viennent frapper la surface de la pièce et leur énergie cinétique brise le film d'oxyde.

Lorsque l'on soude au courant alternatif, Il est recommandé d'employer la haute fréquence et des impulsions à hautes fréquences superposées au courant de soudage. Ce procédé a pour effet de faciliter l'amorçage de l'arc, de la stabiliser et de remédier aux interruptions qui peuvent se produire chaque fois que le courant alternatif passe par zéro.

PARTIE

B

CARACTERISATION
METALLURGIQUE

La caractérisation a pour but de comprendre les phénomènes métallurgiques et mécaniques induits par les cycles thermiques du soudage. Pour cela, une étude macrographique et micrographique a été effectuée pour comprendre les différentes transformations microstructurales engendrées par les effets thermiques des deux types de courant alternatif et pulsé utilisés dans notre travail. Les conséquences métallurgiques du soudage de l'alliage AM60B sont évaluées par la mesure de la microdureté.

V.B.1 Etude métallographique

L'étude métallographique consiste à suivre les étapes suivantes :

- Préparation des Echantillons
- Enrobage
- Polissage
- La métallographie comporte :
 - La macrographie.
 - La micrographie.
- Essai de Microdureté

V.B.1.1 Préparation des échantillons

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

V.B.1.2 Prélèvement

On prend des coupes transversales de l'ordre de 5 mm sur les pièces soudées, et un autre échantillon de métal de base comme référentiel de l'évolution microstructural.

V.B.1.3 Enrobage

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

Il existe deux types d'enrobage :

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

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

V.B.1.4 Polissage

Est une opération nécessaire avant toute observation métallographique, les échantillons doivent être parfaitement polis, en utilisant les méthodes de polissage connues et disponibles. Pour une bonne observation, les échantillons sont polis jusqu'à l'état de miroir. Le polissage a été effectué avec des papiers abrasifs dans l'ordre suivant :

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

Il est préconisé en finition sur feutre pour les alliages de magnésium d'utiliser :

- une pâte ou une suspension diamantée de 3 puis 1 μm .

V.B.1.5 Observation Métallographique

Il existe plusieurs méthodes d'observation des métaux, parmi les méthodes classiques qui permettent d'observer les évolutions structurales de ces matériaux, 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.

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

L'examen macroscopique (examen à l'œil nu) ou macrographique (examen avec un optique comme une binoculaire) permet de révéler la structure métallographique homogène ou hétérogène d'une coupe transversale d'une éprouvette soudée. Le réactif chimique appliqué sur la surface polie de l'éprouvette révèle, par dissolution, les hétérogénéités chimiques de la surface métallique examinée. Dans notre travail :

Dans notre cas de l'alliage AM60B nous avons utilisé la solution d'attaque de composition :

- L'Acide Picrique 3 gr.
- L'Acide Acétique 2,5 ml.
- Alcool Ethylique (Ethanol) 50 ml.
- L'eau 50 ml.
- L'attaque se fait de 5 à 10 secondes [44].

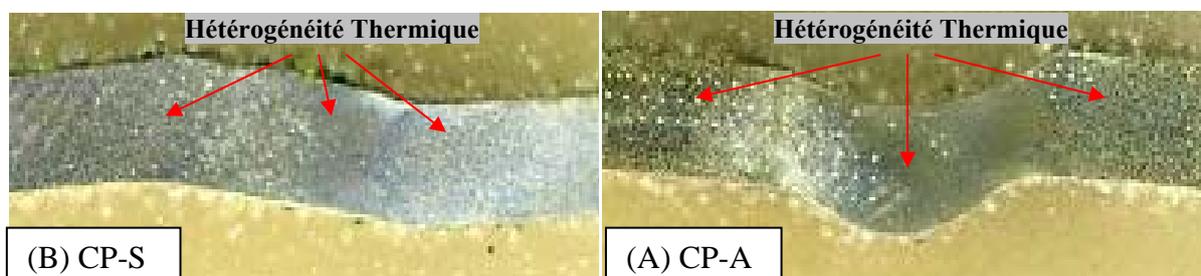
Les résultats macrographiques et micrographiques sont présentés ci-dessous.

➤ La macrographie

La (figure.50) présente les macrographies de toutes les soudures réalisées.

Ces macrographies présentent l'aspect de cordon, la distribution et les variations morphologiques et thermiques des différentes zones constituant la soudure.

Les macrographies obtenues en utilisant un Scanner et ce, à défaut d'appareil adéquat. De ce fait, le grossissement des images ne sont pas donnés.



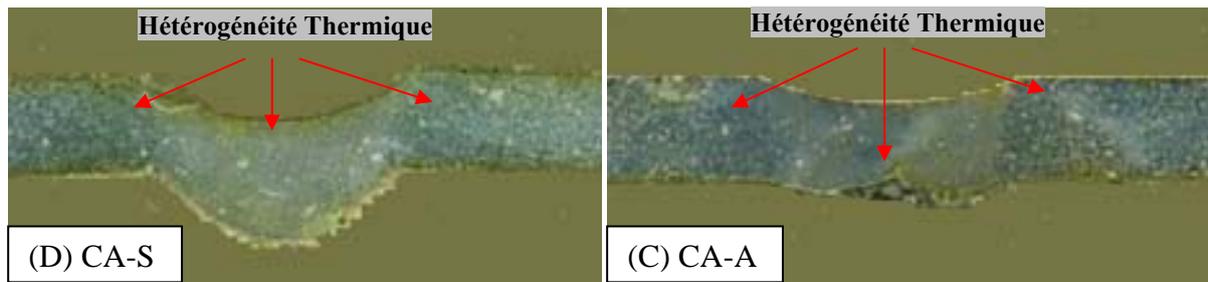


Figure.50 Macrographie des soudures.

La sélection de ces échantillons est basée sur le type de courant et la protection à l'envers :

- (A) CP-A Echantillon du courant pulsé avec protection à l'envers.
- (B) CP-S Echantillon du courant pulsé sans protection à l'envers.
- (C) CA-A Echantillon du courant alternatif avec protection à l'envers.
- (D) CA-S Echantillon du courant alternatif sans protection à l'envers.

Les macrographies nous révèlent que la distribution de la chaleur est hétérogène entre la ZF et la zone adjacente ZAT. Par conséquent, des hétérogénéités et variations structurales. On peut clairement constater qu'il y a une différence morphologique entre les deux zones : La zone fondue est une transformation liquide-solide dont les structures caractéristiques à celle de la fonderie par coulée, la ZAT est le siège d'une transformation solide-solide sur une largeur en fonction de la température maximale atteinte en différents points et celle du métal de base non affecté par la chaleur qui est une structure de tôles laminées.

➤ La micrographie

L'étude métallographique que nous présenterons nous permet de confirmer ces hétérogénéités entre les différentes zones. Les observations métallographiques des échantillons sont faites par microscope optique Zeiss doté d'une caméra CCD reliée à un PC grâce au logiciel d'exploitation.

Les (figures 51, 52, 53, 54 et 55) présentent les micrographies des différentes zones des soudures réalisées respectivement en type de courant et le mode de protection.

Echantillon (A) CP-A

Sans attaque On prend quelques micrographies avant l'attaque chimique (figure.51).

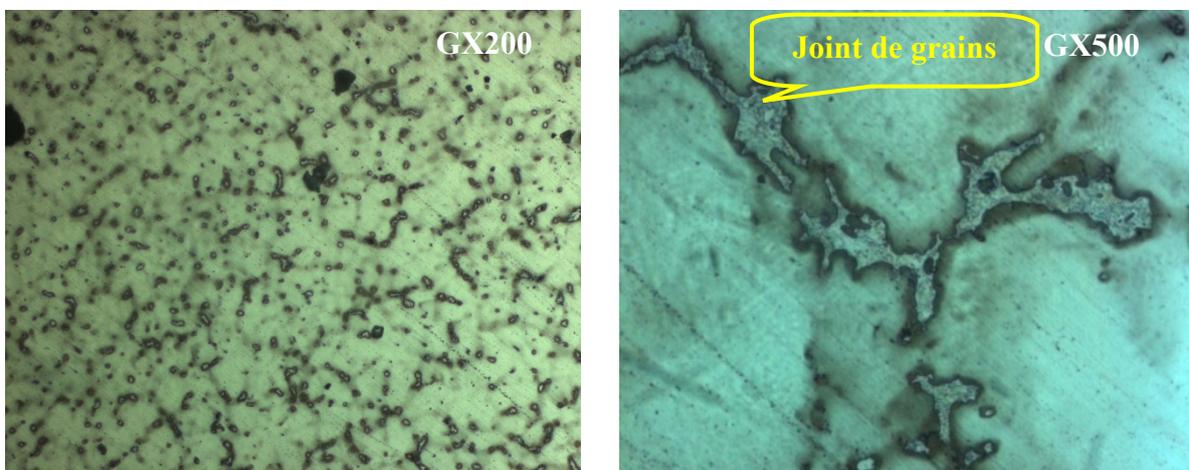


Figure.51 Micrographie sans attaque chimique (Limite ZF VERS ZAT).

Après attaque chimique

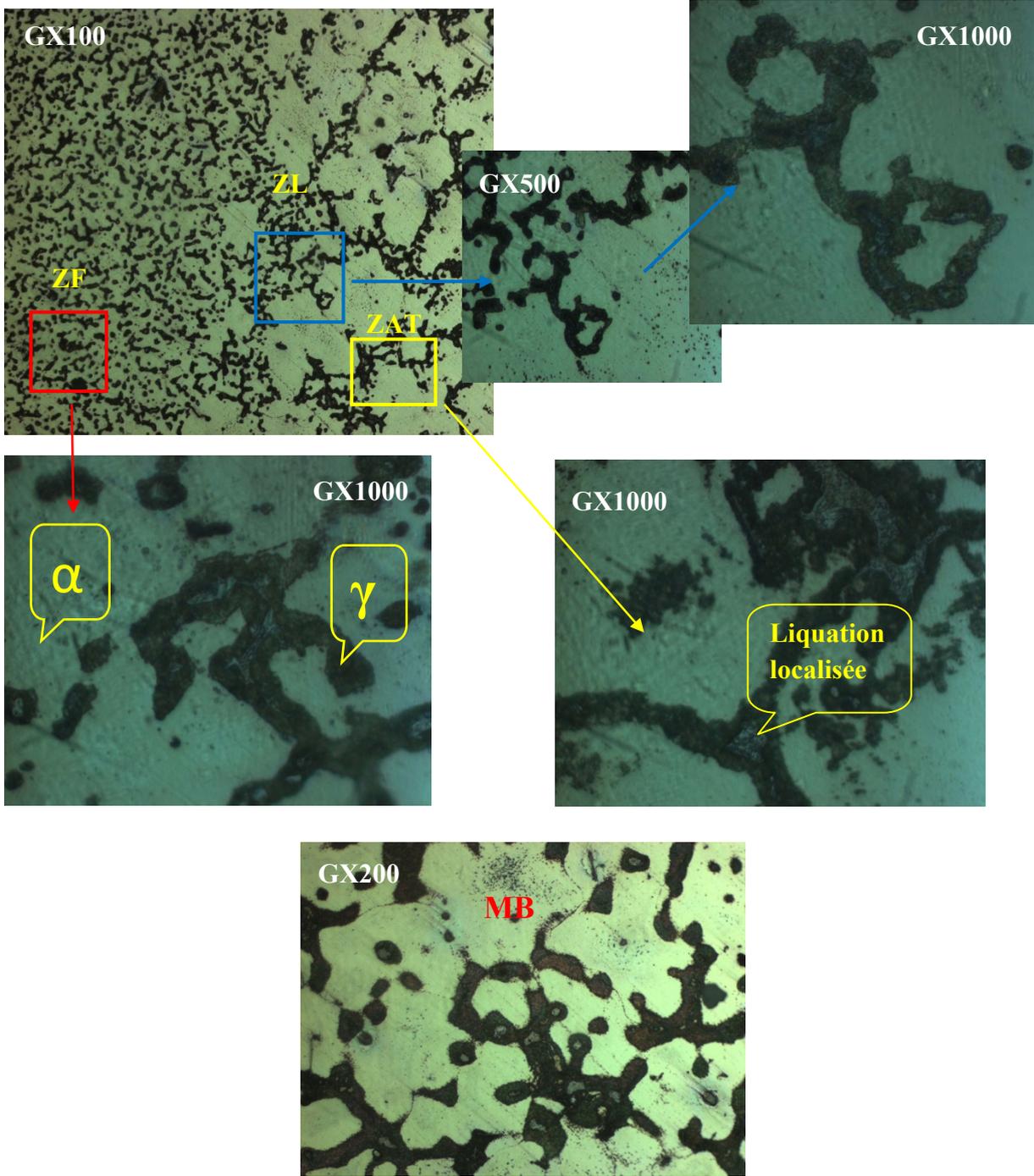


Figure.52 Micrographie des différentes zones de l'échantillon (A).
Soudage avec courant pulsé avec protection à l'envers.

Echantillon (B) CP-S

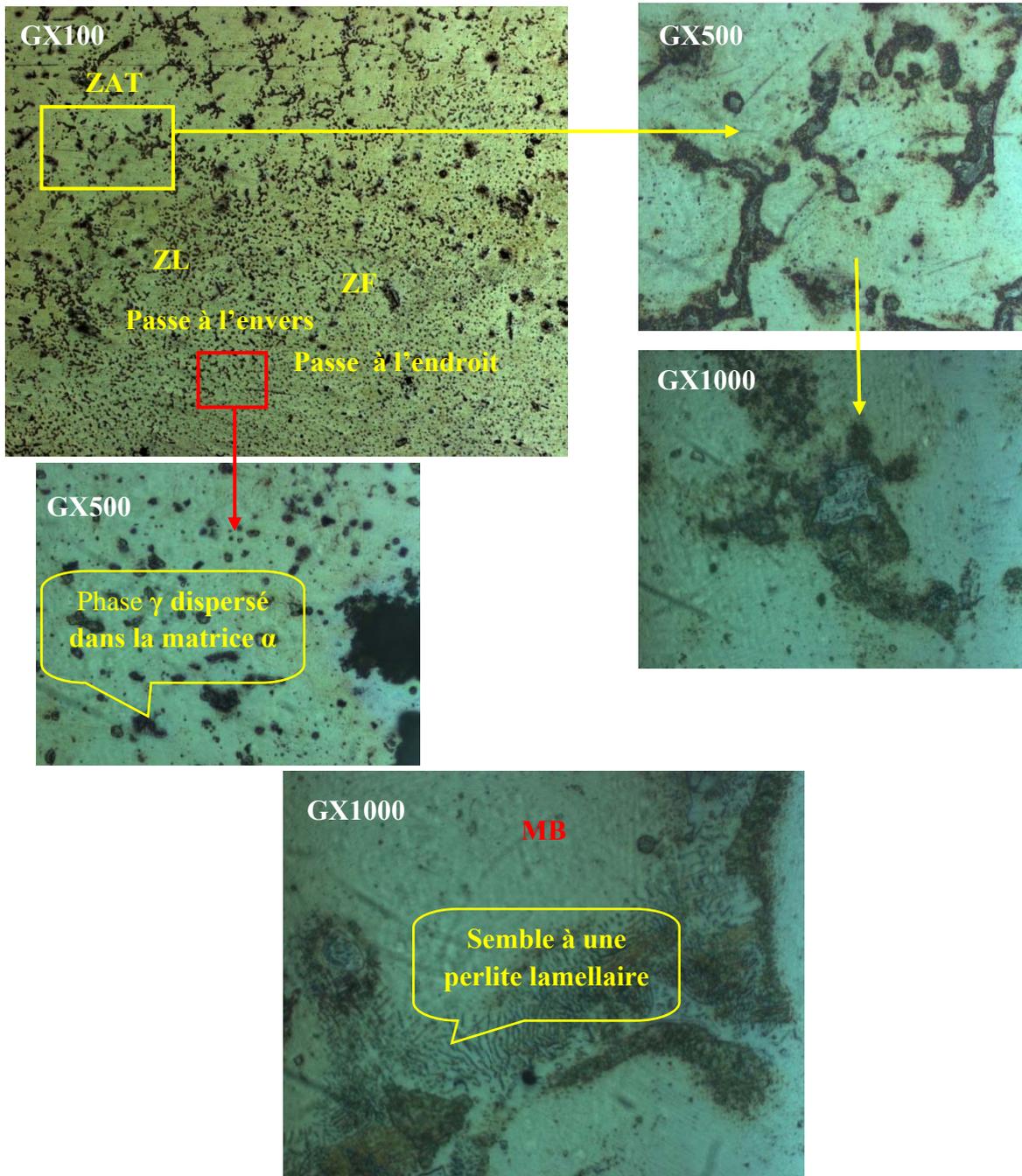


Figure.53 Micrographie des différentes zones de l'échantillon (B)
Soudage avec courant pulsé sans protection à l'envers.

Echantillon (C) CA-A

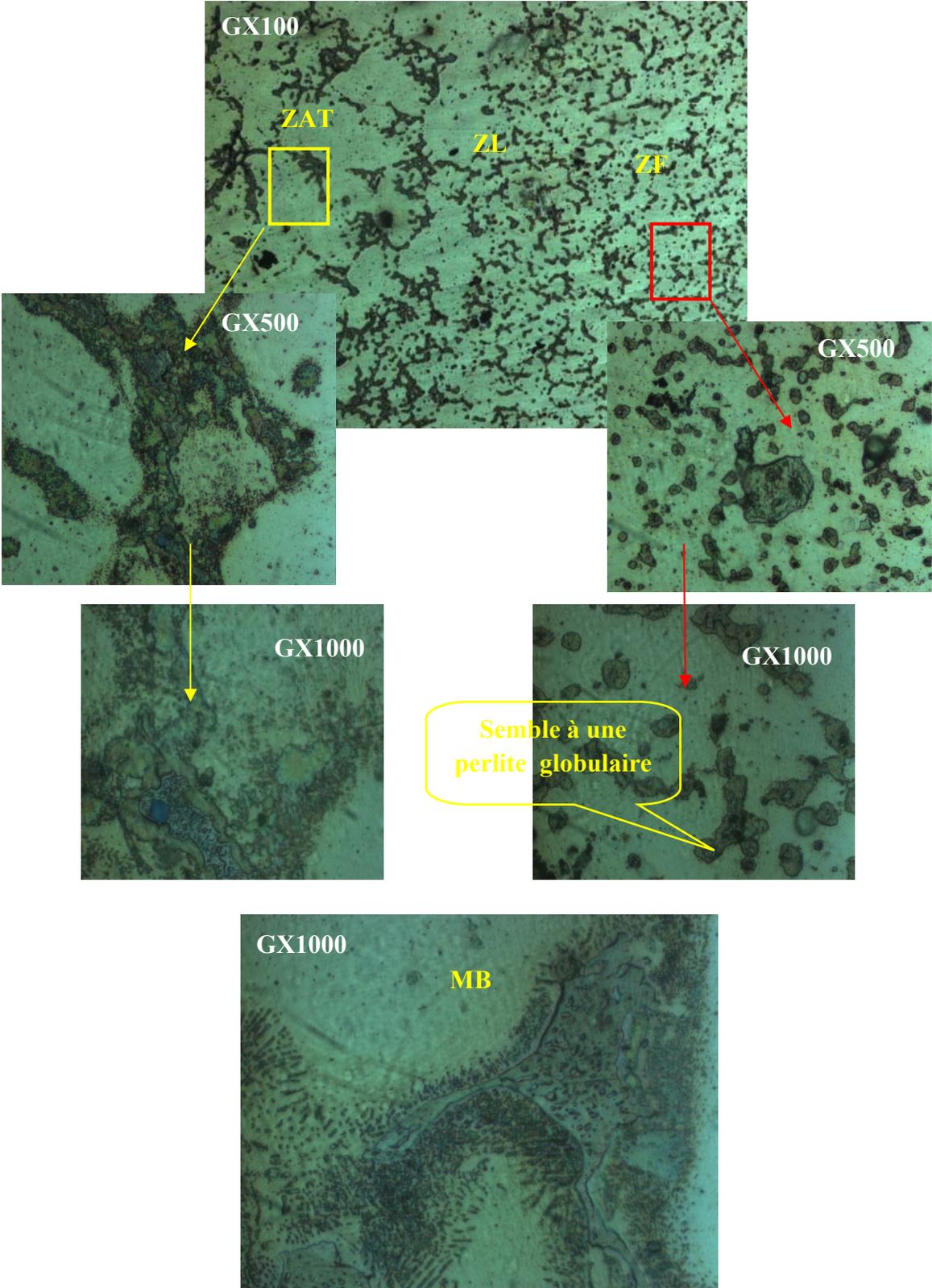


Figure.54 Micrographie des différentes zones de l'échantillon (C). Soudage avec courant alternatif avec protection à l'envers.

Echantillon (D) CA-S

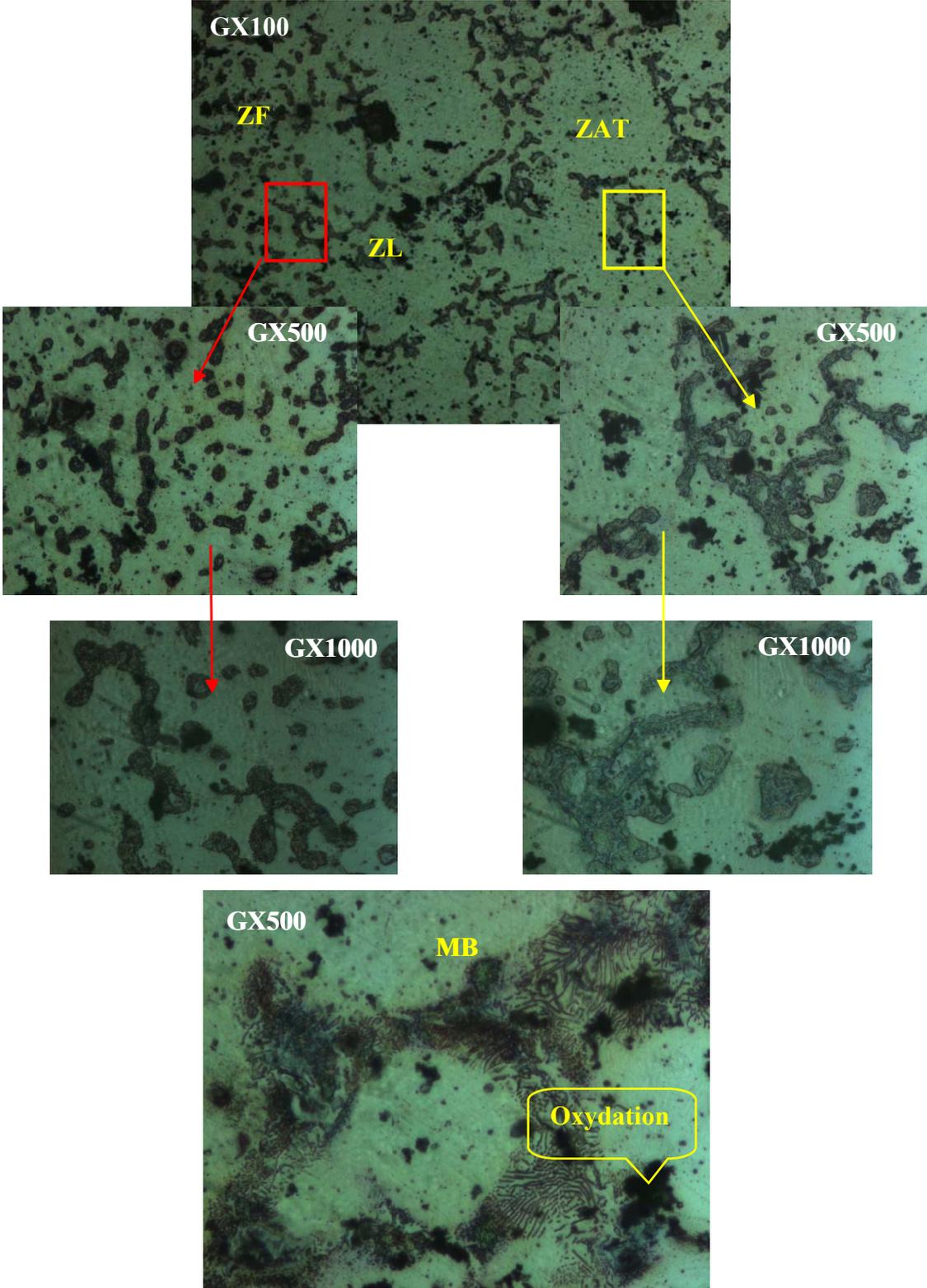


Figure.55 Micrographique des différentes zones de l'échantillon (D).
Soudage avec courant alternatif sans protection à l'envers

Ces résultats obtenus sont semblables aux travaux déjà réalisés à l'Université de Technologie et l'Université d'Auckland de New Zealand. Donc on suggère que :

Pendant le soudage, la zone affectée thermiquement est la partie de l'alliage de base la plus proche de la zone adjacente ZF de fusion complète, la ZAT est chauffée à une température comprise entre la température du liquidus et la température eutectique, les figures des micrographies des soudures ci-dessus, montrent les microstructures de la zone fondue, la zone affectée thermiquement et le métal de base.

Dans cette zone (ZAT) la partie fondue se solidifie par une réaction de séparation des composantes d'eutectique ayant pour résultat des îles d'eutectique de phase α entourée par les particules γ .

C'est les mêmes observations que nous présentons, où la phase γ (**phase semblable à une perlite**) à deux formes : globulaire dispersée dans la matrice α qu'on retrouve dans la ZF et inter-granulaire dans la ZAT en entourant ainsi la phase α [41].

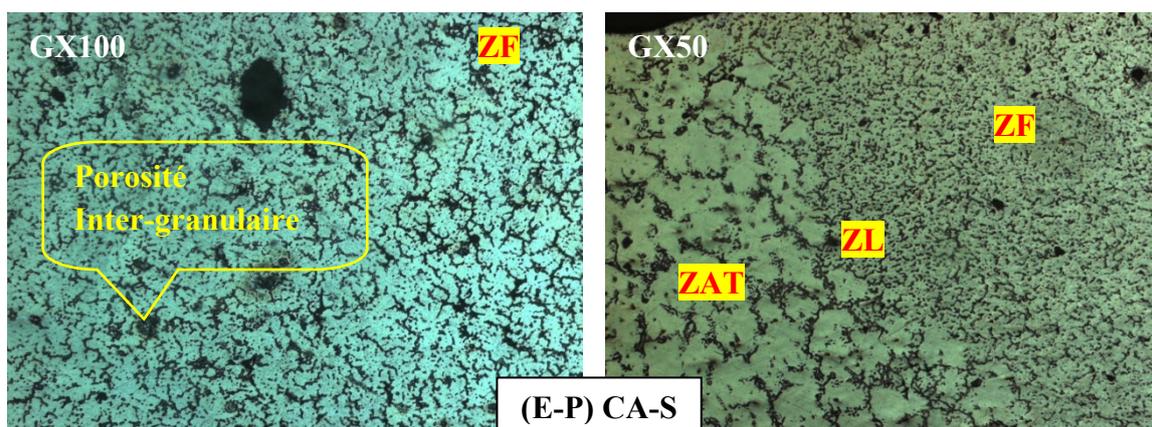
En comparant les structures de la ZF entre le courant pulsé et l'alternatif on constate que dans le premier type (CP) la structure est très fine par rapport au second (CA) que nous expliquons par les phénomènes des pulsations qui est aussi appelé par certains par le pulsage thermique.

Comme nous avons observé sur la ZAT et le MB des phases inter-granulaires qui se trouvent dans la phase dite perlitique sont identifiées comme étant des liquations localisées [43].

L'analyse métallographique nous a révélé des défauts dans certains assemblages réalisés : les porosités et la fissuration à chaud.

Ces défauts sont constatés que sur les soudures réalisées en courant alternatif. La (**figure.56**) montre des porosités de forme sphérique et inter-granulaire (**figure.56-(E-P) CA-S**) et des fissures inter-granulaire de la fissuration à chaud (**figure.56-(E-F) CA-S**).

Porosités



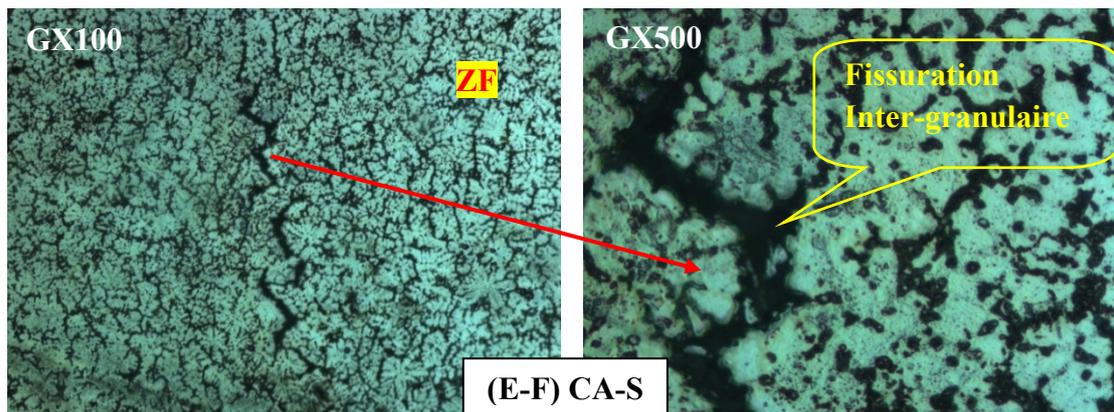
Fissuration

Figure.56 Présentation Micrographique des défauts de soudage.

(E-P) CA-S Echantillon du courant alternatif sans protection à l'envers avec porosités.

(E-F) CA-S Echantillon du courant alternatif sans protection à l'envers avec fissuration.

De tous les résultats obtenus nous pourrions apprécier la qualité du courant pulsé qui est nettement meilleure que celle du courant alternatif si on ne prend que ce côté de défauts comme critère de choix.

V.B.2 La microdureté

Pour apprécier les effets thermiques ainsi que les variations structurales et leurs conséquences sur les propriétés mécaniques, on a procédé aux mesures des microduretés sur les mêmes échantillons avec des charges de l'ordre 25, 200 et 300 g et un scanning (balayage) du centre de la ZF vers le métal de base avec un pas de 500 μ m selon les abscisses et ordonnées. Les mesures et les profils des microduretés sont indiqués dans les tableaux [Tab.22, 23, 24, 25, 26 et 27] et figures ci-dessous (fig.59, 60, 61, 62, 63 et 64).

V.B.2.1. Principe de l'essai de microdureté

L'essai consiste à appliquer sur une éprouvette à mesurer un pénétrateur sous une charge d'appui donnée. La dureté est mesurée par rapport aux dimensions des empreintes laissées par le pénétrateur sur la surface du matériau contrôlé. Ces empreintes sont d'autant plus importantes que le métal est qualifié de mou, en d'autres termes, la dureté peut être définie comme la résistance à la pénétration.

- Essai de microdureté Vickers

Notre essai a été réalisé sur un échantillon prélevé de manière perpendiculaire à l'axe du cordon de soudure de tôles soudées. Il est été poli à l'aide d'une polisseuse et du papier abrasif, l'état de surface est alors bon.

La mesure de la dureté dans notre cas à été effectuée par un balayage ce qui a pour objectif d'étudier l'évolution de la dureté dans les différentes zones dont le gradient microstructural est nettement apparent dans l'analyse métallographique : le métal de base, la ZAT et la zone fondue.

A cet effet, les mesures ont été faites selon des profils parallèles aux bords de l'éprouvette, de distant de 0.5 mm. Le choix de cette méthode est motivé par la soudure en 2 passes en TIG.



Figure.58 Schéma du balayage de la microdureté.

Les résultats et les profils obtenus sont présentés pour les mêmes échantillons.

Echantillons (A) CP-A

Tableau.22 Mesure de la microdureté de l'échantillon (A)
Soudage avec courant pulsé avec protection à l'envers.

Position (mm)	passe 1(HV)	passe 2 (HV)	passe 3 (HV)
0	54	51	49
0,5	56	54	54
1	48	56	55
1,5	54	58	55
2	55	69	62
2,5	52	69	62
3	53	61	54
3,5	51	54	63
4	58	61	49
4,5	52	51	50
5	46	54	52
5,5	51	45	56
6	51	63	52
6,5	45	56	51
7	53	56	51
7,5	53	66	53
8	57	52	55

Tableau.23 Mesure de la microdureté sous cordon de l'échantillon (A)
Soudage avec courant pulsé avec protection à l'envers.

	Zones				
	ZF (mm)		ZL	ZAT (mm)	
Position (mm)	-1	0,5	0	0,5	1
Dureté (HV)	51	58	62	55	59
	64	57	56	62	54

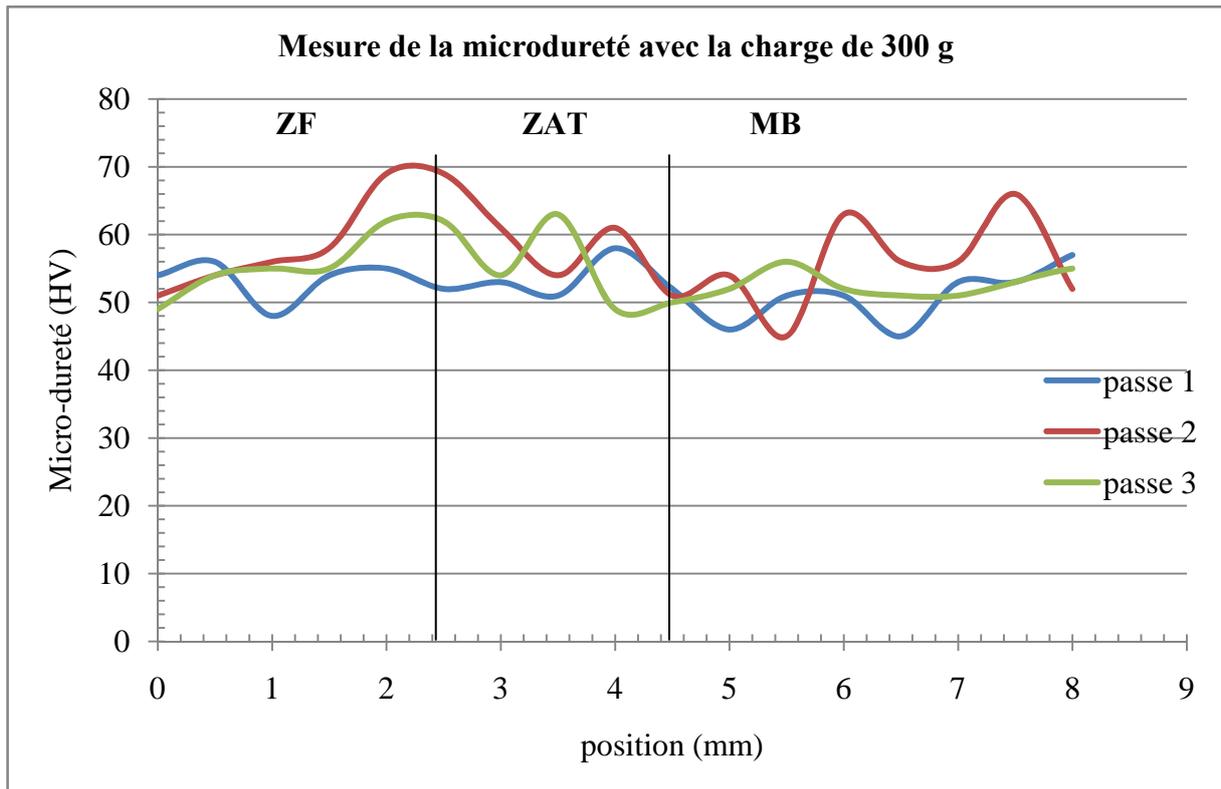


Figure.59 Profil de la microdureté de l'échantillon (A)
Soudage avec courant pulsé avec protection à l'envers.

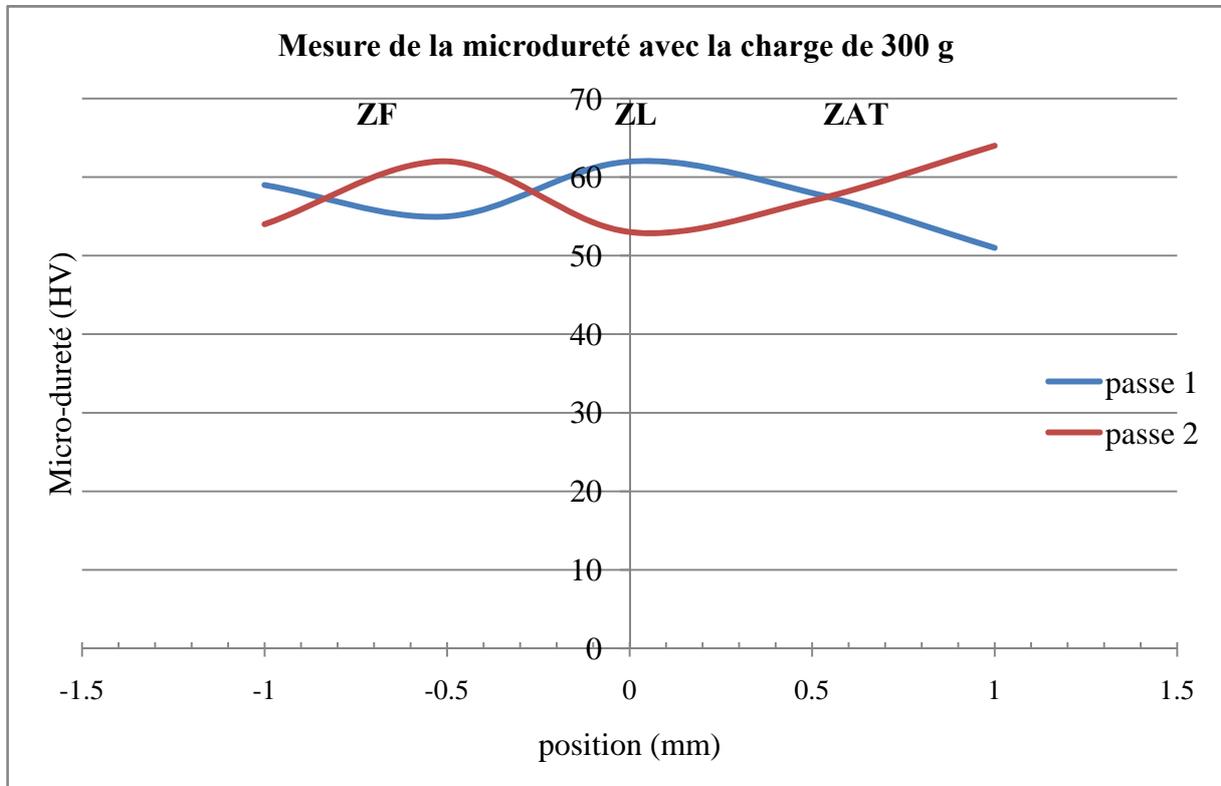
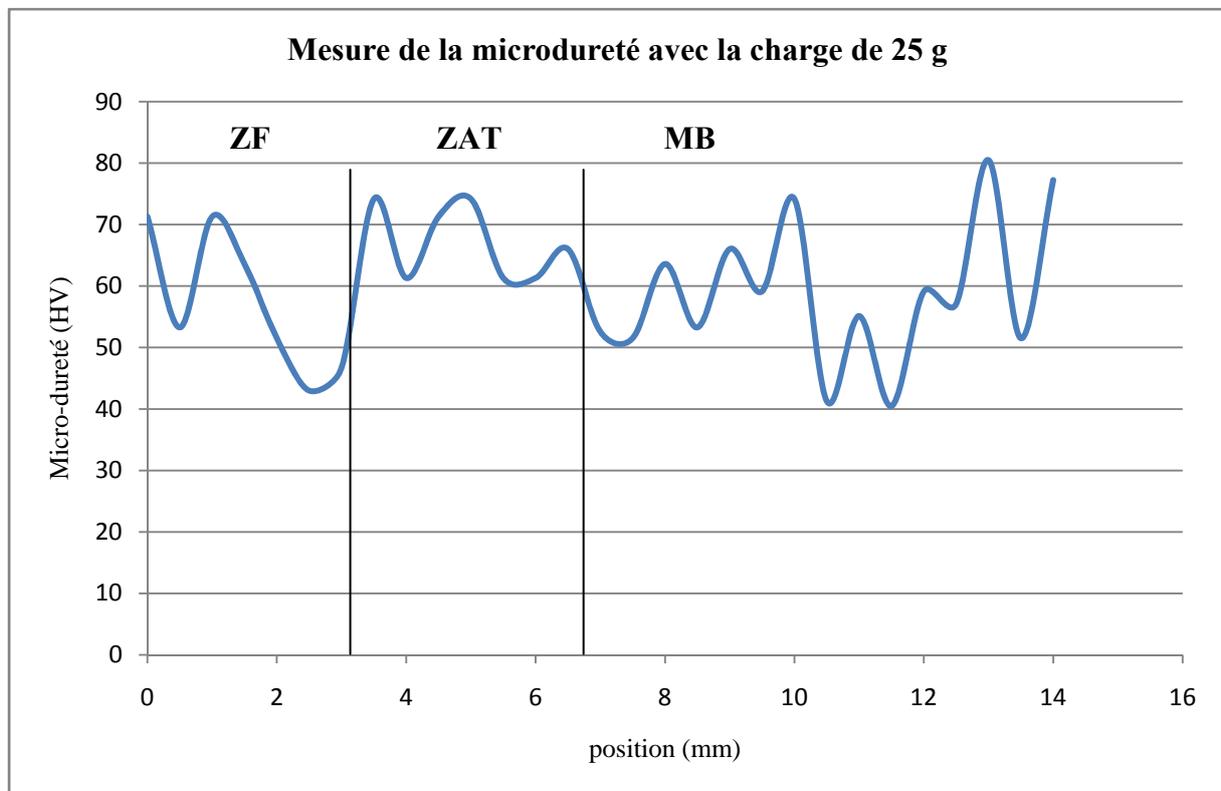


Figure.60 Profil de la microdureté sous cordon de l'échantillon (A)
Soudage avec courant pulsé avec protection à l'envers

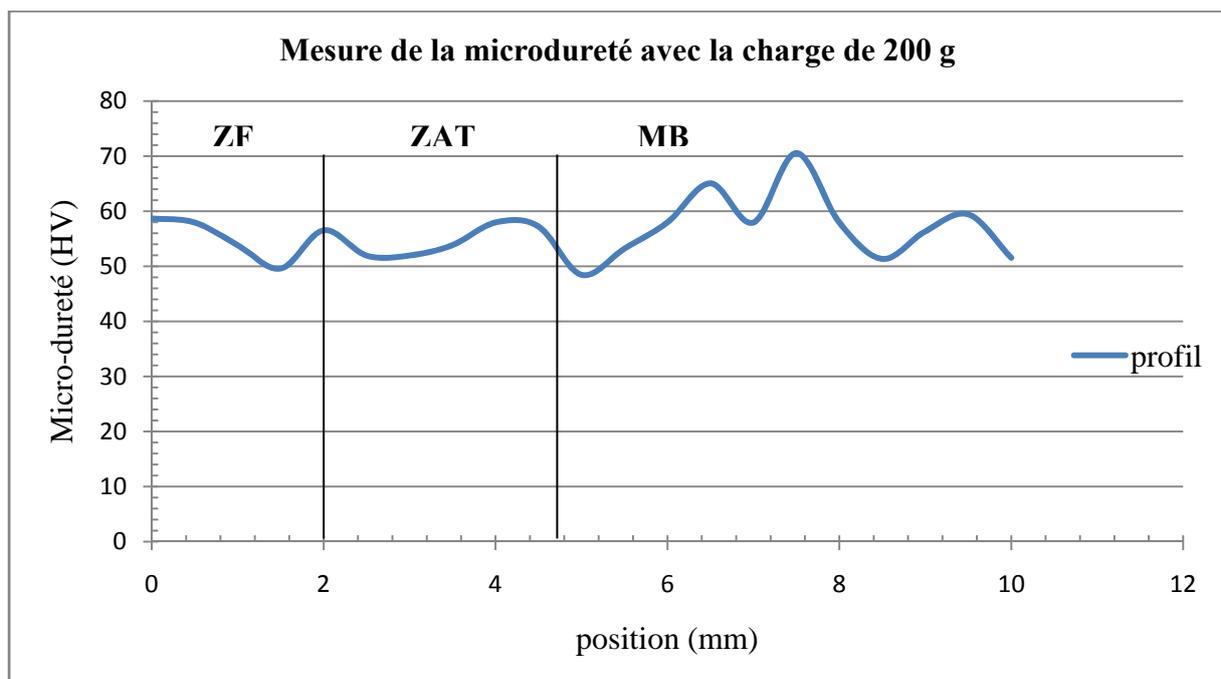
Echantillons (B) CP-S**Tableau.24** Mesure de la microdureté de l'échantillon (B)
Soudage avec courant pulsé sans protection à l'envers.

position (mm)	Microdureté (HV)	position (mm)	Microdureté (HV)
0	71,30	7,5	51,51
0,5	53,27	08	63,59
01	71,30	8,5	53,27
1,5	63,59	9	66,02
2	51,51	9,5	59,13
2,5	42,97	10	74,18
3	46,72	10,5	41,28
3,5	74,18	11	55,12
4	61,30	11,5	40,48
4,5	71,30	12	59,13
5	74,18	12,5	57,08
5,5	61,30	13	80,49
6	61,30	13,5	51,51
6,5	66,02	14	77,23
7	52,56		

**Figure.61** Profil de la microdureté de l'échantillon (B)
Soudage avec courant pulsé sans protection à l'envers.

Echantillons (C) CA-A**Tableau.25** Mesure de la microdureté de l'échantillon (C)
Soudage avec courant alternatif avec protection à l'envers.

Position (mm)	Microdureté (HV)
0	58,68
0,5	57,95
1	53,84
1,5	49,57
2	56,53
2,5	51,94
3	51,94
3,5	53,84
4	57,95
4,5	57,23
5	48,44
5,5	53,19
6	57,95
6,5	65,06
7	57,93
7,5	70,56
8	57,95
8,5	51,33
9	56,33
9,5	59,43
10	51,54

**Figure.62** Profil de la microdureté de l'échantillon (C)
Soudage avec courant alternatif avec protection à l'envers.

Echantillons (D) CA-S**Tableau.26** Mesure de la microdureté de l'échantillon (D)
Soudage avec courant alternatif sans protection à l'envers.

Position (mm)	passe 1 (HV)	passe 2 (HV)
0	43	52,56
0,5	53	48,62
1	55	57,23
1,5	48	55,16
2	61	59,43
2,5	50	49,57
3	51	57,95
3,5	51	51,33
4	55	51,33
4,5	56,53	50,73
5	58	52,56
5,5	53	54,49
6	55	56,53
6,5	61	50,73
7	55	50,15
7,5	52	50,73
8	56,53	51,94
8,5	43,63	50,73
9	55,84	52,56
9,5	48,33	48,44
10	56,53	52,56

Tableau.27 Mesure de la microdureté sous cordon de l'échantillon (D)
Soudage avec courant alternatif sans protection à l'envers.

	Zones				
	ZF (mm)		ZL	ZAT (mm)	
Position (mm)	-1	0,5	0	0,5	1
Dureté (HV)	66,82	55,16	64,21	55,16	59,43
	55,16	63,5	56,53	58,68	56,53
	60,96	61,75	54,49	53,19	57,95

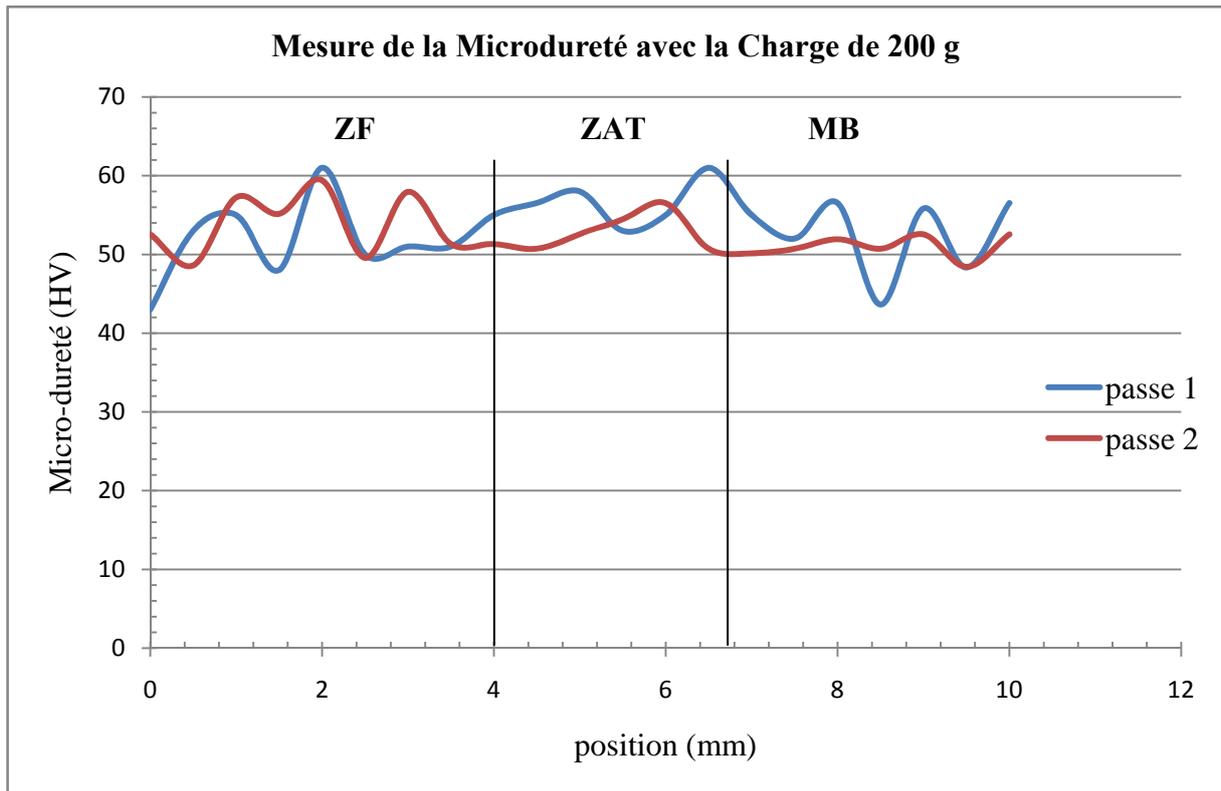


Figure.63 Profil de la microdureté l'échantillon (D)
Soudage avec courant alternatif sans protection à l'envers.

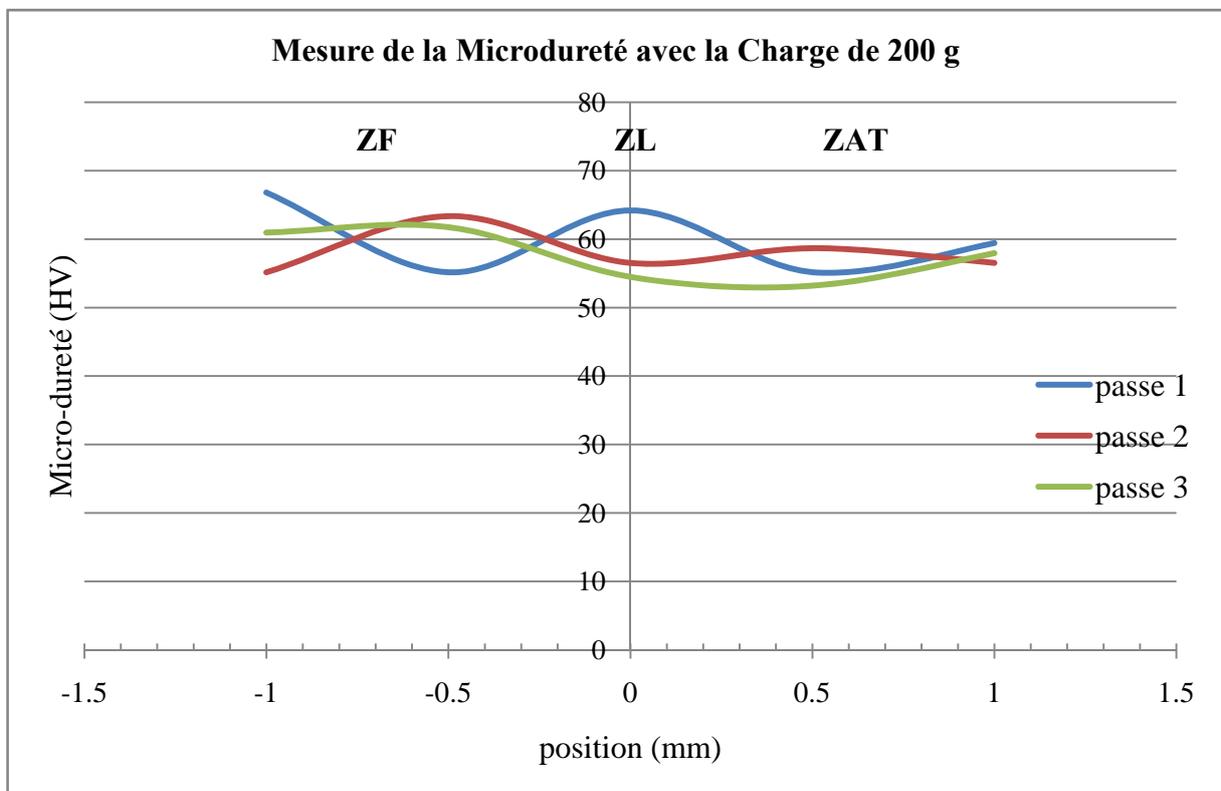


Figure.64 Profil de la microdureté sous cordon de l'échantillon (D)
Soudage avec courant alternatif sans protection à l'envers.

L'analyse des courbes montre que les profils des micro-duretés sont pratiquement les mêmes pour les différentes charges appliquées, sauf des petites fluctuations de plus au moins de 10 HV. Le balayage de la microdureté se fait à travers toutes les zones qui ont subies une hétérogénéité thermique de la zone fondue à grains fins puis la zone de liaison et la zone affectée thermiquement à gros grains vers le métal de base qui donne une moyenne entre 50-60 HV.

Pour la charge de 25g les microduretés sont faites sur des grains et des joints de grains ce qui explique les grandes fluctuations entre les valeurs dues aux différentes que nous avons relevées dans l'analyse métallographique.

Les variations de microdureté données par la bibliographie sont identiques à celles que nous avons prélevées.

Cette dernière nous donne une approche appréciable des résultats obtenus qui peuvent être expliqués par la bonne soudabilité de ces derniers.

CONCLUSION GENERALE

Ce premier travail sur le soudage des alliages de magnésium particulièrement sur l'alliage AM60B nous a permis d'évaluer et d'apprécier l'aptitude à assurer une continuité métallique qui caractérise d'ailleurs la soudabilité de cet alliage. Cette soudabilité a deux aspects : opératoire et métallurgique.

L'aspect opératoire a pris la plus grande partie dans le travail réalisé. En effet, nous étions devant un nouveau matériau dont peu de travaux sont réalisés dans le monde. La méconnaissance du comportement de l'alliage AM60B vis-à-vis de l'apport thermique du soudage TIG, nous a imposé d'explorer toutes les possibilités que peut-nous offrir le poste TIG à savoir le choix du type de courant qui est un paramètre essentiel des paramètres de soudage.

Deux types de courants peuvent être débités par le poste TIG (lincoln square wave TIG 355). Le courant Alternatif qui est usuellement utilisé pour le soudage des alliages de magnésium et le courant pulsé qui est une technologie nouvelle qui est appliquée pour la première fois au CSC. C'est pourquoi, dans un premier temps nous avons essayé de comprendre ce qu'est un courant pulsé et les effets des paramètres du courant pulsé sur la stabilité de l'arc avant d'arriver à une première optimisation des paramètres en réussissant à réaliser des cordons de soudures où la continuité métallique est assurée.

Néanmoins, nous relevons des difficultés de souder des tôles à faibles épaisseurs de l'alliage AM60B. Cependant, l'utilisation de ces deux courants (alternatif et pulsé) et le choix des paramètres adéquats restent encore à explorer dans les futurs travaux.

Quant à L'aspect métallurgique dans ce travail il a consisté à l'implantation des thermocouples dans le but de prélever les cycles thermiques de soudage en différents points et d'apprécier ainsi la conductibilité thermique de l'alliage AM60B.

En effet, nous avons relevé que les températures et les allures entre le premier thermocouple au début du soudage et le dernier thermocouple à la fin du soudage sont différentes. La différence est de 200°C en température maximale atteinte sur les deux thermocouples explique la grande conductibilité thermique de l'alliage. C'est pourquoi il est utile de diminuer l'énergie mise en jeu à la fin du parcours lors du soudage en diminuant soit l'intensité de courant soit en augmentant la vitesse de soudage. Cet effet, est constaté en utilisant le courant Alternatif.

Le courant pulsé, a la propriété de produire des énergies stables grâce à la durée de passage du cycle pulsé. Par conséquent, l'utilisation du courant pulsé présente de meilleures conditions opératoires et éventuellement métallurgiques car sa possibilité de moduler l'énergie mise en œuvre et donc l'apport thermique permet d'avoir :

- Moindre absorption de gaz par la zone de fusion ;
- Refroidissement plus rapide ;
- Réduction de la zone affectée thermiquement ;
- Réduction de la fissuration à chaud ;
- Plus grande souplesse opératoire.

Néanmoins, que l'utilisation du courant alternatif nous offre une importante caractéristique est l'effet nettoyant en polarité inversée sur certains métaux, tels le magnésium, l'aluminium, le

béryllium et le cuivre. En effet, les ions de gaz inerte viennent frapper la surface de la pièce et leur énergie cinétique brise le film d'oxyde. Il y a un fort effet de nettoyage du bain de fusion.

La conséquence des paramètres de soudage en courant pulsé ou alternatif sur la métallurgie de soudage de l'alliage AM60B est une nouveauté pour nous. C'est pourquoi l'analyse macro et micrographique n'est que qualitative et mériterait une analyse plus approfondie avec l'utilisation de moyens de caractérisations plus importants pour une réelle compréhension des transformations de phases qui se sont produites. Néanmoins, nous avons pu observer et délimiter les différentes zones où une grande transition microstructurale entre la zone fondue ZF de la zone affectée thermiquement ZAT et le métal de base MB. Les résultats présentés correspondent à certains travaux de recherches d'autres chercheurs déjà obtenus dans le monde.

Perspectives

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

En revanche, c'est une base de données que nous pourrions suivre en allant plus loin dans l'expérimentation.

REFERENCES
BIBLIOGRAPHIQUES

BIBLIOGRAPHIE

- [1] M. Colombie et Coll. Matériaux industriels matériaux métalliques. Technique et Ingénierie série matériaux
- [2] Le magnésium et ses alliages – Caractéristiques – Mise en œuvre – applications. Recueil Afnor, Fascicule de documentation A65-700, 1982.
- [3] Kaplan, C. H., J. Hryn, and B. Clow. Beck, A., The Technology of magnesium and its alloys, F.A. Hughes, Abbey House, London, 1940. Magnesium Technology 2000, The Metallurgical Society, Warren- date, PA, 2000.
- [4] BAZILE F. — Propriétés du magnésium et de ses alliages ; Données numériques sur le magnésium et ses alliages ; Traitements thermiques des alliages de magnésium. Techniques de l'Ingénieur tome II, M450 ; M453 et tome IV M1305, 1985.
- [5] Myer Kutz. Mechanical Engineer's Handbook: Materials and Mechanical Design, Volume1, Third Edition.
- [6] Houch S., MIKUCKI B. — Selection and application of magnesium and magnesium alloys, p. 455-479; Properties of magnesium alloys, p. 480-519. ASM Metals Handbook, Vol 2. \1990.
- [7] Elektron diecasting alloys web: www.magnesium-elektron.com
- [8] DUPUIS T. – Le magnésium. Nouveau Traite de chimie minérale, Tome IV, Masson, 1957.
- [9] FACY G., POMPIDOU M. – Les pièces en alliages de magnésium. Précis de foundries, AFNOR, p 146, 148, 1983.
- [10] F. Czerwinski. The generation of Mg–Al–Zn alloys by semisolid state mixing of particulate precursors. Acta Materialia 52 (2004) 5057–5069.
- [11] PEREY J.-F. — L'avenir du magnésium : ses emplois structurels. Matériaux et Techniques n° 6-7, p. 13-17, 1993.
- [12] Clermont Ferrand Métallurgie du magnésium et recherche d'allègement dans l'industrie des transports. Atouts industriels et économiques, 29/30 octobre 1996. IMA-P MAG.
- [13] E. Schubert , M. Klassen, I. Zerner, C. Walz and G. Sepold. Light-weight structures produced by laser beam joining for future applications in automobile and aerospace industry. Journal of Materials Processing Technology. Volume 115, Issue 1, 22 August 2001, Pages 2-8
- [14] W. Elber, Ch. Gunther, What experience gained in the aerospace industry might be useful when using new materials in the automotive industry, No. 1235, VDI-Berichte 1995, p. S1–S16.
- [15] B. L. Mordike and T. Ebert, Clausthal-Zellerfeld, Germany. Magnesium, Properties — applications — potential. Department of Material Science and Engineering, Technical University of Clausthal, Sachsenweg 8, 38678. Available online 5 February 2001. Materials Science and Engineering A Volume 302, Issue 1, 15 April 2001, Pages 37-45.
- [16] K.U. Kainer, Potential von Magnesium in der Karosserie — Möglichkeiten und Entwicklungsbedarf, in: Stahl, Aluminium und Magnesium im Wettbewerb, EUROFORUM-Konferenz, Bonn, 17–18.02, 1998.
- [17] Collection terme et définition utilisés en soudage et techniques connexes, publications de la soudure autogène, 1996
- [18] Régis Blondeau, METAALURGIE ET MECANIQUE DU SOUDAGE, Editeur Hermès science publique (Paris), 2001.

- [19] BERNARD G., PRUDHOMME M., compléments à l'étude des phénomènes thermiques dans les joints soudés, doc. IIS/IIW n° X.913-78, 1978.
- [20] Guy MURRY, Soudage et soudabilité métallurgique des métaux. Technique e l'ingénieur [M715].
- [21] PORTEVIN (A.) et SEFERIAN (D.). – Étude thermique de la soudure au chalumeau et à l'arc. XIe Congrès International de l'Acétylène et de la Soudure Autogène, vol. 3 (1934) et CR Acad. Sciences, 199 (1934).
- [22] ROSENTHAL D., the theory of moving sources of heat and its applications to metals treatments / transactions ASME, vol 68,849,1946.
- [23] RYKALINE N.N., calcul des processus thermiques de soudage / soudage et techniques connexes, n°1-2, 1961.
- [24] CLYDE M.ADAMS C.M., cooling rates and peak temperatures in fusion welding/Welding research supplement, mai 1958
- [25] DEVILLERS L., KAPLAN D., JANSEN J.P., simulation thermique des zones affectées par la chaleur en soudage multipasse des aciers de construction/ soudage et technique connexes, mars-avril 1987
- [26] Seferian, D., Métallurgie de la soudure, Éd. Dunod, 1965.
- [27] MURRY (G.) et CONSTANT (A.). – Rev. De Métall., vol. 62 (1965).
- [28] W. F. SAVAGE, E. F NIPPES, A Study of Weld Interface Phenomena in a Low Alloys Steel, Welding Journal Research Supplement (1976), p. 260s-268s.
- [29] GRANJON H., bases métallurgiques du soudage. Publication du soudage et ses applications, 2^eédition, 1995.
- [30] R. BLONDEAU, Procédés et applications industrielles du soudage, Hermès Science publication, Paris (2001).
- [31] GUIDE DU SOUDAGE, Soudage à l'arc sous gaz de protection TIG, MIG, MAG, Tome V, publication de la soudure autogène.
- [32] Roland CAZES, Soudage à l'arc. Technique de l'ingénieur [B7730].
- [33] J. CORNU, Traité de soudage Automatique: Volume 2 Procédés ; Hermes (1985).
- [34] Belakhowsky, S., Théorie et pratique du soudage, Éd. Desforges, 1968.
- [35] R. Varisellaz, SOUDAGE ; Eléments de conception et de réalisation, Bordas, Paris, 1982.
- [36] R.W. MESSLER Jr, Principles of Welding, John Willey & Sons Edi., New York (1999), p 50-55.
- [37] VARIANTE DU PROCÉDÉ TIG SOUDAGE TIG PAR IMPULSION, soudage électrique à l'électrode réfractaire; bibliothèque C.S.C.
- [38] Publication de l'Institut de Soudure, Documentation pratique sur la soudabilité des aciers, Ed. I.S./C.E.T.I.M., Paris, 1979.
- [39] [Http \\.www.Netlim1\web\diocese\cttc\matériaux_pdf\oxyde_mg.htm](http://www.Netlim1/web/diocese/cttc/matériaux_pdf/oxyde_mg.htm)
- [40] EASTERLING K., introduction to the physical metallurgy of welding, Editions butterwrouths, 1983.
- [41] T.Zhu et al. / Materials Science and Engineering A 416 (2006) 246–252. Incipient melting in partially melted zone during arc welding of AZ91D magnesium alloy.
- [42] GRIS (J.). – La fonderie des alliages de magnésium et son évolution. Fonderie (F),n° 93, p. 3623-36, oct. 1953.
- [43] François BAZILE, Traitements thermiques des alliages de magnésium. Technique de l'ingénieur [M1305].
- [44] Changfu Dong. Gas tungsten-arc filler welding of AZ31 magnesium alloy. Liming Liu, Materials Letters 60 (2006) 2194–2197.