

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE : DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET LA
RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE BLIBA 1
FACULTE DE TECHNOLOGIE
DEPARTEMENT DE GENIE MECANIQUE



Projet de Fin d'Etudes
Pour l'obtention du diplôme master en Génie Mécanique
Option :IMS

Thème :

Application de la méthode des plans d'expériences pour le soudage TIG
des alliages d'aluminium 7075 T6

Proposé et dirige par :
Temmar Mustapha

Présenté par :
Boussaid ramdane
Tchalabi Abdelkader
Bounoua Riyadh

Année universitaire 2020/ 2021

Remerciements

❖ Avant tout, je remercie 'Dieu' de m'avoir donné la force, le courage, et la volonté pour réaliser ce modeste travail ; que je dédie :

❖ À Mes chers parents qui m'ont tout donné, qui m'ont soutenu, et encourager durant toute ma formation et éclairer mon chemin avec leurs bénédictions Je leur souhaite une longue vie.

❖ À mes chers frères et chères sœurs.

❖ À mes amis du département de métallurgie
génie des matériaux.

❖ À toutes les personnes que j'aime.

❖ Et enfin à tous mes professeurs , mon promoteur

Mr : Temmar Mustapha et à toute notre famille du département de génie mécanique

Dédicace

Je dédie ce travail :

- A mes chers parents
- Mon père et ma mère
- Pour leur patience, leur amour, leur soutien et Leurs
 - encouragements.
- toute ma famille et tous mes amis et camarades
- Sans oublier tous mes professeurs

Sommaire

Remerciement.....	I
Dédicace	II
Sommaire.....	III
Introduction Générale.....	6
Chapitre 1 : Les alliages d'aluminium 7075 T6	9
1.1. Les états traités thermiquement (T).....	9
1.2. Utilisation.....	11
Chapitre 2: Le soudage TIG	13
2.1. Domaines d'applications concernés :	13
2.2. Générateurs et méthodes d'amorçage :	14
2.3. Qualité du soudage TIG	15
Chapitre 3 : Matériaux et procédures expérimentales.....	17
3.1. Présentation du matériau utilisé :	17
3.2. Technique de soudage TIG :	18
3.2.1. Préparation des tôles à souder :	18
3.2.2. Principe et paramètres technologiques du soudage TIG :	20
3.2.3. Contrôle des soudures :	23
3.2.3.A. Contrôle avant le soudage :	23
3.2.3.B. Contrôle pendant le soudage :	24
3.2.3.C. Contrôle après le soudage :	24
3.3.1. Mise en solution :	26
3.3.2. Trempe :	27
3.3.3. Revenu :	27
3.3.4. Caractérisation de la soudure :	28
3.4. Caractérisation de la microstructure :	29
3.4.1. La microscopie optique :	29
3.4.1.A. Enrobage :	30
3.4.1.B. Polissage :	30
3.4.1.C. Attaque chimique :	31
3.5. Méthodes d'essais mécaniques :	31
3.5.2. Essai de résilience :	32
Chapitre 4 : Résultats et interprétations.....	36
4.1. Introduction :	36
4.4. Résilience des échantillons à l'état soudé et traité :	36
Chapitre 5 : Modélisation numérique de l'essai de résilience	43

5.1. Introduction :.....	43
5.2. Méthode des plans d'expérience :.....	44
5.2.1. Définition :	44
5.2.2 Notion d'espace expérimental et terminologie :	45
5.2.2.A. Le facteur :	45
5.2.2.B. La réponse :	48
5.2.2.C. Surface de réponse :	48
5.2.3. Notion de modélisation mathématique et application :	49
CONCLUSION GENERALE	63
Références.....	65

Introduction Générale

Introduction Générale

Notre travail consiste à souder par le procédé de soudage TIG des alliages d'aluminium 7075 T6. Ces alliages sont appréciés par les constructeurs à cause de leur légèreté, leurs qualités mécaniques et leur caractère écologique.

Lors du processus de soudage TIG de notre matériau, un gradient de température se crée entre le métal de base et la zone fondue. Ainsi, les variations de gradient de température vont engendrer des structures métallographiques et des caractéristiques mécaniques diverses dans les différentes zones constituant le cordon de soudure.

Après avoir étudié ces alliages et le procédé de soudage TIG, nous allons exposer la partie expérimentale qui concernera l'application du soudage par le procédé TIG de notre matériau, et de l'application des traitements thermiques.

Par la suite, nous allons présenter et interpréter les résultats expérimentaux obtenus à travers les différentes expériences.

Nous allons terminer par l'application d'un modèle de modélisation. Elle concernera le logiciel Autodesk Inventor pour le cas de l'essai de traction.

Chapitre 1

Les alliages d'aluminium 7075 T6

Chapitre 1 : Les alliages d'aluminium 7075 T6

La sélection de l'alliage est importante pour les projets d'extrusion, et dans l'industrie aérospatiale, l'alliage d'aluminium 7075 est couramment utilisé.

Avec le zinc comme élément d'alliage principal, il est exceptionnellement résistant. Membre de la série 7000, c'est l'un des alliages les plus résistants disponibles et est comparable à de nombreux types d'acier. Bien qu'il ait une résistance élevée, il a une résistance à la corrosion inférieure à celle des autres alliages d'aluminium courants et n'offre pas les mêmes niveaux d'usinabilité ou de soudabilité.

En raison de sa haute résistance, il est souvent utilisé dans des applications où il sera soumis à de fortes contraintes, telles que le longeron d'aile d'avion et l'équipement de soutien au sol.

1.1. Les états traités thermiquement (T)

T6 : mis en solution, trempé, revenu

La trempe T6 7075 a une résistance à la traction ultime de 510 à 540 MPa (74 000 à 78 000 psi) et une limite d'élasticité d'au moins 430 à 480 MPa (63 000 à 69 000 psi). Il a un allongement à la rupture de 5 à 11 %.

Le revenu T6 est généralement obtenu par homogénéisation de la fonte 7075 à 450 °C pendant plusieurs heures, trempé puis vieillissement à 120 °C pendant 24 heures. Cela donne la résistance maximale des alliages 7075. La résistance est dérivée principalement des précipités η et η' finement dispersés à la fois dans les grains et le long des joints de grains

Comparaison des caractéristiques mécaniques

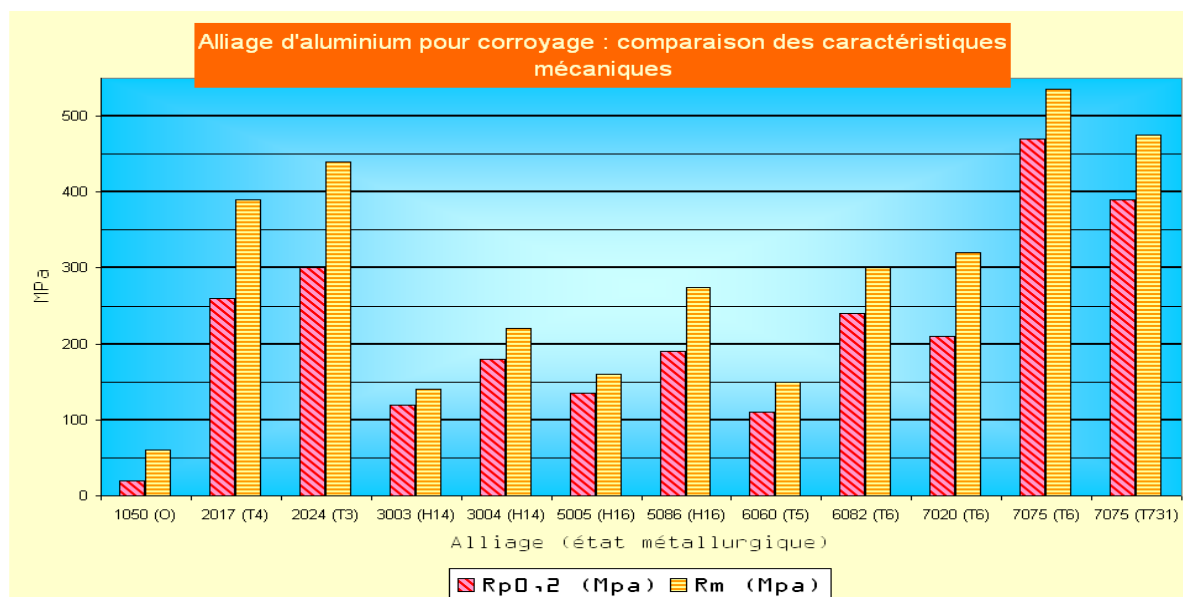


Figure 1

<u>Caractéristiques physiques</u>	
Masse volumique (g/cm ³)	2,80
Intervalle de fusion	475-630
Coefficient de dilatation linéique (0 à 100 °C) (10 ⁻⁶ K ⁻¹)	23,5
Module d'élasticité (MPa) (1)	72 000
Coefficient de Poisson	0,33
Conductivité thermique (0 à 100 °C) (W m ⁻¹ K ⁻¹)	État T6 : 130
Résistivité à 20 °C (μΩ cm)	État T6 : 5,2
Limité d'élasticité RP0.2 (MPa)	470 (3)
Limité à la rupture Rm (MPa)	535 (3)
Allongement (%)	8 (3)
Limité d'élasticité RP0.2 (MPa)	390 (4)
Limité à la rupture Rm (MPa)	475 (4)
Allongement (%)	7 (4)

Tableau 1

1.2. Utilisation

La première utilisation au monde de l'alliage d'aluminium 7075 en série a été pour le chasseur Mitsubishi A6M Zéro (1940).

L'avion était connu pour son excellente maniabilité, facilitée par la résistance plus élevée du 7075 par rapport aux alliages d'aluminium précédents.

Chapitre 2

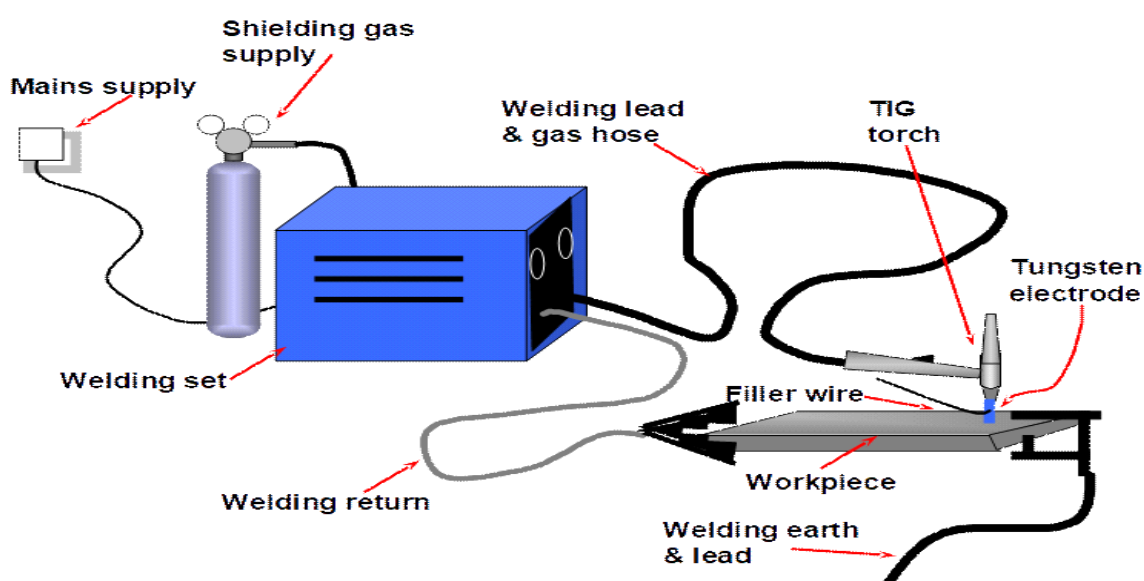
Le soudage TIG

Chapitre 2: Le soudage TIG

Le soudage TIG : est un procédé de soudage à l'arc avec une électrode non fusible, en présence d'un métal d'apport si besoin. TIG est un acronyme de Tungsten Inert Gas, où Tungsten (Tungstène) désigne l'électrode et Inert Gas (Gaz inerte) le type de gaz plasmagène utilisé. L'arc électrique se crée entre l'électrode et la pièce à souder qui est protégée par un gaz ou un mélange de gaz rares tels que l'argon et l'hélium. De fait, l'arc électrique remplace la flamme du chalumeau traditionnel. La soudure à l'arc s'appuie sur l'élévation de la température des pièces à assembler jusqu'au point de fusion grâce au passage d'un courant électrique alternatif ou continu¹.

Le soudage s'effectue le plus souvent en polarité directe (pôle - du générateur relié à l'électrode) pour les métaux et alliages (aciers, inox, cuivreux, titane, nickel...) sauf dans le cas des alliages légers d'aluminium ou du magnésium, où l'on soude en polarité alternée. Il n'est pas possible de souder en polarité inverse (pôle + relié à l'électrode) car cela détruirait cette électrode en la faisant fondre

TIG (Tungsten-arc Inert Gas shielded)



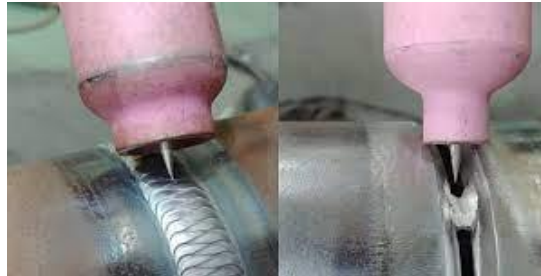
Fuguer 2

2.1. Domaines d'applications concernés :

1. La soudure TIG est une soudure de qualité, avec la possibilité de souder les faibles épaisseurs, un arc stable. Elle nécessite une dextérité particulière du soudeur².

2. Les domaines d'application les plus courants sont :

- L'aéronautique
- L'automobile
- La tuyauterie industrielle
- L'agro-alimentaire



Fuguer 3

2.2. Générateurs et méthodes d'amorçage :

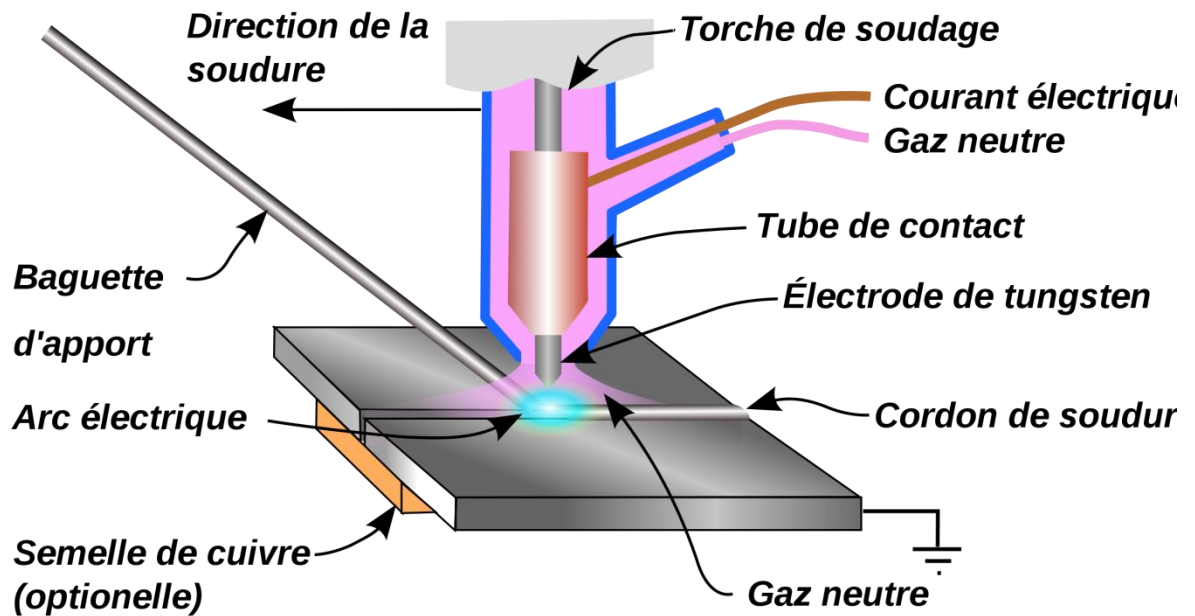
L'arc électrique permet d'élever la température autour de 3 600 °C, quand la température de fusion du métal à souder se situe à une valeur nettement inférieure (vers 1 740 °C pour l'acier).

Les générateurs utilisés sont des générateurs dont la courbe tension-intensité est de type plongeante, c'est-à-dire que pour une variation de tension dans une plage donnée, l'intensité va peu varier. Ces générateurs peuvent également s'employer pour le soudage à l'électrode enrobée.

Il existe 3 façons d'amorcer l'arc :

1. Par contact (lift-arc) : le soudeur va faire entrer en contact l'électrode avec la pièce à souder puis va éloigner l'électrode afin de « tirer » un arc électrique. Cette méthode peut être utilisée avec tous les générateurs de soudage mais peut créer une inclusion de tungstène. Cette méthode s'emploie uniquement dans des endroits où la HF (haute fréquence) est interdite.
2. Par hautes fréquences : le générateur va créer un arc électrique de faible intensité en appliquant une haute tension (env. 1 000 V) à une très haute fréquence (env. 1 000 000 Hz) entre l'électrode et la pièce. L'ionisation de l'air entre pièce et électrode va permettre la création d'un arc de soudage de forte intensité malgré une tension modeste (environ 20-30 V). Cette méthode d'amorçage a pour inconvénient d'engendrer une pollution électromagnétique de l'environnement immédiat.

3. Par court-circuit (grattage manuel) : L'arc s'amorce en grattant l'électrode sur le matériau. Il est conseillé d'amorcer sur un cuivre afin d'éviter d'abîmer le tungstène et de contaminer la soudure.



Fuguer 4

Torche de soudage au TIG



Fuguer 5

2.3. Qualité du soudage TIG

La qualité visuelle d'une soudure TIG est excellente, le procédé convient à tous les métaux. Noter qu'un gaz de protection envers (cas du soudage d'acier inox) voire une boîte à gants ou un traînard (cas du soudage du titane) peuvent être nécessaires. La compacité de la torche permet de souder dans des endroits difficilement accessibles pour d'autres procédés.

Chapitre 3

Matériaux et procédures expérimentales

Chapitre 3 : Matériaux et procédures expérimentales

3.1. Présentation du matériau utilisé :

Dans le cadre de notre étude, nous avons choisi l'alliage d'aluminium 7075. Il nous a été remis, par le service de maintenance d'Air Algérie, sous forme de tôles (290 x 210 mm) à l'état T6 et sous différentes épaisseurs (respectivement 2 et 2,5 mm).

Une plaque brute d'aluminium 7075 T6 d'épaisseur égale à 2 mm est représentée dans la figure 3.1 :



Figure 3.1 : Plaque brute d'aluminium 7075 T6 (épaisseur = 2 mm)

Les alliages d'aluminium industriels 7075 T6 sont notamment utilisés en tant que tôles fortes pour les voilures d'avions. Ces alliages comportent les éléments Zn, Mg et Cu comme principaux éléments d'addition. Leur utilisation est due à leurs caractéristiques mécaniques supérieures.

Les échantillons de cet alliage d'aluminium 7075 T6 ont été traités au niveau du laboratoire des Grands Travaux Pétroliers (GTP) de Reghaia (Wilaya de Boumerdès) pour déterminer et vérifier la composition chimique. Ce travail a été fait dans le but de vérifier la conformité de la fiche technique du fournisseur du matériel.

Le Tableau 3.1 représente la composition chimique des échantillons de l'alliage d'aluminium 7075 T6 :

	Si	Ti	Mn	Cu	Fe	Cr	V	Zn	Mg	Autres	Al
7075 T6	0,10	0,04	0,03	1,53	0,22	0,19	0,01	5,63	2,50	0,03	89,72

Tableau 3.1: Composition chimique (%) des échantillons d'alliage d'aluminium 7075 T6

3.2. Technique de soudage TIG :

Les procédés de soudage par fusion utilisant un arc électrique comme source de chaleur sont classés comme procédés de soudage à l'arc. Ils représentent la source d'énergie la plus utilisée car la chaleur de fusion peut être facilement produite, concentrée et contrôlée.

Le procédé de soudage TIG consiste à chauffer la pièce à souder par la chaleur d'un arc électrique, qui jaillit entre l'électrode de tungstène non fusible et le matériau concerné. Ce procédé est le plus utilisé en comparaison avec les autres procédés de soudage à l'arc du fait qu'il ne nécessite pas obligatoirement de métal d'apport pour transmettre la chaleur à la pièce à souder, contrairement au soudage à électrode fusible ou enrobée.

En pratique, la notion de passe est importante. Le résultat d'une passe est un cordon de soudure. La première passe est appelée passe de fond et le reste est appelé passe de remplissage.

La pénétration correspond à la profondeur sur laquelle s'étend la fusion dans le métal de base.

3.2.1. Préparation des tôles à souder :

Avant d'arriver à l'étape finale de la réalisation de la soudure, et dans le but d'obtenir un bon état de soudure, les plaques de l'alliage d'aluminium à souder doivent être préparées d'une manière très soignée. Plusieurs étapes doivent être respectées car l'alliage d'aluminium 7075 T6 est difficile à souder du fait que l'oxydation superficielle de l'aluminium et de ses alliages produit une couche d'alumine Al_2O_3 . Cette couche constitue un barrage entre les plaques à assembler. Ainsi donc, le soudage

TIG, dans notre cas, demande au préalable un décapage des plaques à assembler et une protection du bain de fusion pour éviter une réoxydation du métal fondu. Ce décapage se fait avant et en cours de soudage.

La préparation et le soudage de notre matériau furent pratiqués au Centre de Recherche Scientifique et Technique en Soudage et Contrôle de Cheraga (Alger).

Un exemple de cette préparation est représenté dans la figure 3.2.

Un exemple de plaque d'aluminium 7075 T6 prête pour le soudage est représenté dans la figure 3.3.

La prochaine étape consiste à préparer le chanfrein. Le choix de ce dernier dépend de :

- L'épaisseur de la tôle,
- La possibilité d'accès à l'envers,
- Des déformations minimales imposées,
- La minimisation des coûts.

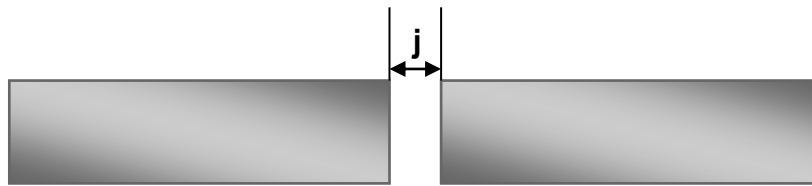


Figure 3.2 : Préparation des échantillons avant le soudage

Avec :

j = distance entre les deux plaques avant le soudage

Ainsi et avant de souder, le choix du type de chanfrein dépend de l'épaisseur de la tôle. A partir de cette épaisseur, on détermine l'intensité du courant utilisé, le diamètre de l'électrode et le diamètre de la baguette d'apport.

Le tableau 3.2 illustre le type de préparation des plaques :


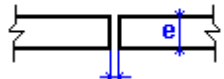
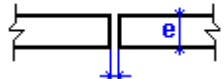

Epaisseur de la tôle $e = \text{mm}$	Fourchette d'intensité (A)	Diamètre du métal d'apport (mm)	Type de préparation
0,80 à 1,00	10 à 80	Sans ou $\varnothing 1,00$	
1,50 à 2,00	40 à 100	1,60	
2,00 à 3,00	80 à 160	1,60 à 2,00	
3,00 à 4,00	120 à 260	2,00	

Tableau 3.2 : Type de préparation du joint avant le procédé de soudage TIG

Sachant que notre type de matériau est difficile à souder, un décapage des pièces à assembler est exigé ainsi qu'une protection du bain de fusion pour éviter une réoxydation du métal fondu. Comme il a été mentionné dans le chapitre 2, le décapage est réalisé soit mécaniquement (brosse rotative à fils d'acier inoxydable), soit chimiquement (attaque à la soude, passivation à l'acide nitrique et rinçage à l'eau).

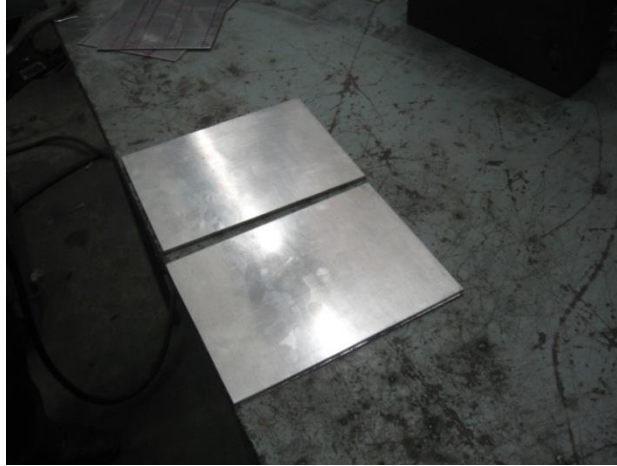


Figure 3.3 : Plaque d'aluminium 7075 T6 prête pour le soudage (épaisseur = 2,5 mm)

3.2.2. Principe et paramètres technologiques du soudage TIG :

Lors de l'application du procédé de soudage TIG, on fait jaillir de l'argon (arc électrique) entre une électrode infusible de tungstène et la pièce à souder opposée. [3.1]. Un champ magnétique auto induit est engendré et crée à son tour des forces de Lorentz. Celles-ci vont entraîner le gaz en protection vers la surface de la pièce à souder. Cette énergie calorifique permet de faire fondre localement la pièce à souder formant ainsi le joint soudé après refroidissement. La forme de la pointe de l'électrode peut affecter la forme du bain de fusion. Généralement, les pointes des électrodes utilisées, comme pour le cas du courant direct, sont ragrées sous une forme conique.

La figure 3.4 représente les premières étapes du procédé de soudage TIG :

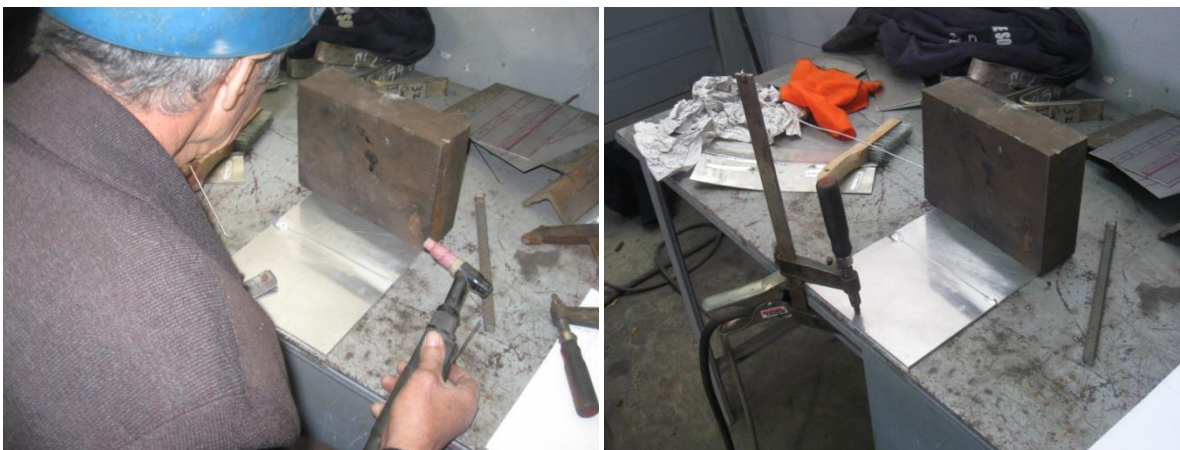


Figure 3.4 : Premières étapes du procédé de soudage TIG

Les procédés de soudage à l'arc peuvent être utilisés en courant continu (DC), avec l'électrode négative (EN) ou positive (EP), ou en courant alternatif (AC). Ces différentes configurations se traduisent par des différentes morphologies du bain de fusion (voir chapitre 2).

En pratique, l'intensité et la vitesse de soudage sont les paramètres les plus importants à contrôler du fait qu'ils sont directement liés à la profondeur de pénétration, à la largeur du bain de fusion et à la qualité du joint soudé. L'intensité affecte également la tension si la longueur de l'arc (distance entre la pointe de l'électrode et la pièce à souder) est fixée. Aussi, l'augmentation de l'intensité du courant favorise une pénétration et une largeur du cordon plus importante, alors qu'une augmentation de la vitesse de soudage aura une influence inverse.

A titre d'exemple, et ayant utilisé une grande vitesse et une grande intensité lors du soudage d'un matériau traité, une fissure est apparue.

Ce phénomène est représenté dans la figure 3.5 :

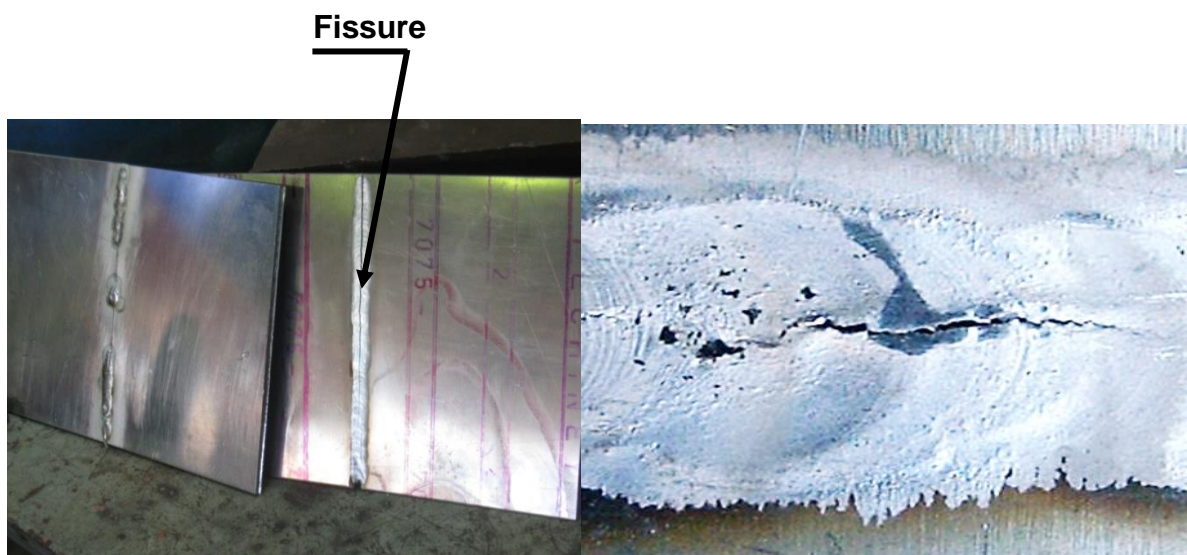


Figure 3.5 : Apparition d'une fissure dans l'échantillon (épaisseur = 2 mm) lors de l'utilisation d'un ampérage de 140 A

Le tableau 3.3 retrace les paramètres de soudage utilisés lors de notre expérience :

Epaisseur de l'échantillon (mm)	Courant utilisé (V)	Intensité (A)	Diamètre électrode (mm)
2	12 - 18	85 – 140	1,5
2,5	12 - 18	100 – 140	2

Tableau 3.3 : Paramètres de soudage

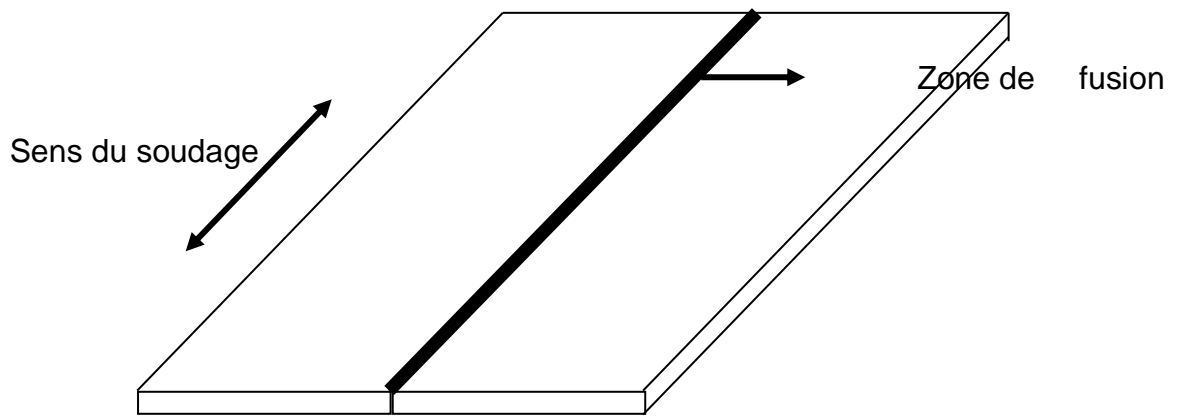


Figure 3.6 : Schéma du procédé de soudage



Figure 3.7 : Plaques soudées (épaisseur = 2.5 mm)

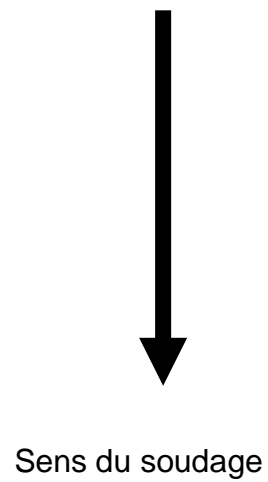
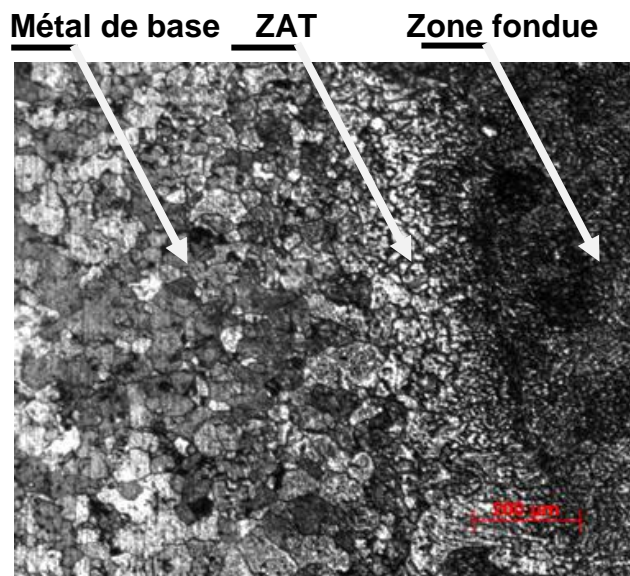


Figure 3.8 : Micrographie d'un échantillon soudé montrant les différentes zones de soudage (épaisseur = 2mm)

La distribution du pic de température en métal de base adjacent à la soudure est donné par la formule suivante : [3.2]

$$\frac{1}{T_m - T_o} = x \frac{4,13(\rho Cv)Ep}{Hn} + \frac{1}{T_f - T_o} \quad (3.1)$$

Avec :

x = Distance à la zone de liaison où l'on veut connaître le pic de température,

T_m = Température (°C) maximum à la distance x (mm) de la zone de liaison,

T_o = Température initiale de la pièce (°C),

T_f = Température de fusion (°C) du métal de base,

E_p = Epaisseur de la tôle (mm),

H_n = Energie de soudage net en J/mm.

3.2.3. Contrôle des soudures :

La qualité d'un assemblage soudé dépend du procédé employé, de la nature des matériaux à assembler, du réglage des paramètres de soudage (intensité, vitesse et tension), du choix du métal d'apport et éventuellement du réglage du débit du gaz. De nombreux défauts peuvent donc affecter la qualité d'une soudure. Ces défauts sont classés d'après la norme NF EN 26520, en 6 groupes : fissures, cavités, inclusions, manque de fusion et de pénétration, défauts de forme et défauts divers. Certains de ces défauts sont détectables à la surface du cordon de soudure, d'autres le sont à l'intérieur du joint soudé et nécessitent des examens approfondis.

Le choix d'une méthode de contrôle dépend du type des défauts probables et nocifs, de la procédure d'exploitation et des critères d'acceptation adaptés aux produits à contrôler car chaque soudure doit résister aux différentes sollicitations auxquelles elle sera soumise. Cette soudure doit être parfaite et ne doit en aucun cas présenter des défauts pouvant altérer la structure dont elle fait partie. Ainsi, il existe plusieurs types de contrôle pour vérifier l'état de cette soudure. On pratique ces contrôles avant, pendant, et après le soudage. [3.3].[3.4].

3.2.3.A. Contrôle avant le soudage :

Dans le but de prévenir les défauts, on vérifie :

- Le matériel de soudage,
- La préparation des pièces à souder,
- La qualité du métal,
- Le mode opératoire de soudage,
- La qualification des soudeurs et opérateurs de soudage.

3.2.3.B. Contrôle pendant le soudage :

Il consiste à assurer que le soudage se déroule dans de bonnes conditions et que les règles de soudage soient bien respectées.

On vérifiera :

- Le réglage du matériel de soudage,
- Les séquences et cycles de soudage,
- La nature et la dimension du métal d'apport,
- Le maintien en température,
- L'état du joint à réaliser,
- Les déformations.

3.2.3.C. Contrôle après le soudage :

Pour mettre en évidence des défauts éventuels du soudage, on doit utiliser une ou deux des méthodes suivantes :

- Le contrôle destructif,
- Le contrôle non destructif.

Le contrôle destructif : Il s'agit d'essais mécaniques ou métallographiques conduisant à la destruction de la construction. Ce type de contrôle comprend les essais de texture, mécaniques, corrosion, macrographiques et micrographiques.

Le contrôle non destructif : Il s'agit d'une méthode qui permet d'obtenir sans destruction, ni altération de la construction, des informations sur les défauts ou anomalies présents dans une construction soudée. Ce type de contrôle comprend le contrôle visuel, par ressuage, magnétique, par radiographie et par ultrasons.

3.3. Traitements thermiques :

En 1911, Wilms découvrit qu'un alliage Al-Cu durcissait lors du vieillissement à température ambiante après trempe. [3.5]. Cela permit une nouvelle technique d'amélioration des propriétés mécaniques des métaux et en particulier pour les alliages d'aluminium. Grâce à cette technique, cet alliage est devenu privilégié pour les applications dans le domaine du transport aérien. Aujourd'hui, le durcissement par précipitation est devenu une pratique courante en métallurgie et s'applique à d'autres alliages que ceux à base d'aluminium.

Comme mentionné dans le premier chapitre, le but des traitements thermiques est de modifier la nature et la répartition des constituants d'un matériau. Selon le domaine d'application du matériau, ces traitements peuvent améliorer ou détériorer les propriétés mécaniques de ce matériau. Ils font subir au matériau des

transformations de structure grâce à des cycles prédéterminés de chauffage et de refroidissement dont le but est d'améliorer les caractéristiques mécaniques comme : la dureté, la ductilité, la limite d'élasticité,..... Ils sont souvent couplés à l'emploi d'une atmosphère contrôlée lors de la mise en température de la pièce pour éviter l'oxydation du matériau et pour effectuer un apport moléculaire à la surface du matériau.

En métallurgie, les traitements thermiques souvent retrouvés sont : La trempe, le revenu, le recuit et le vieillissement.

Dans notre cas, nous avons procédé par les trois étapes suivantes :

- La mise en solution,
- La trempe,
- Le revenu.

Le tableau 3.4 donne des exemples d'alliages qui durcissent par précipitation lors d'un revenu après trempe :

Métal de base	Alliage	Composition (% en poids)	Précipités
Aluminium	Al-Cu	Al – 4.5Cu – 1.5Mg – 0.6Mn (Al 2024)	S' Al ₂ CuMg
	Al-Mg ₂ Si	Al – 1.0Mg – 0.6Si – 0.25Cu – 0.2Cr	β' Mg ₂ Si
	Al-Zn	Al – 5.6Zn – 2.5Mg – 1.6Cu – 0.2Mn – 0.30Cr (Al 7075)	η' Mg ₃ Zn ₃ Al ₂
	Al-Li	Al – 2.5Li – 1.0Cu	Al ₃ Li

Tableau 3.4 : Alliages d'aluminium durcissables par précipitation après une seconde phase

Lors d'un traitement thermique, la résistance à chaud est faible au-delà de 100°C.

La figure 3.9 illustre la variation de la résistance à chaud en fonction de la température :

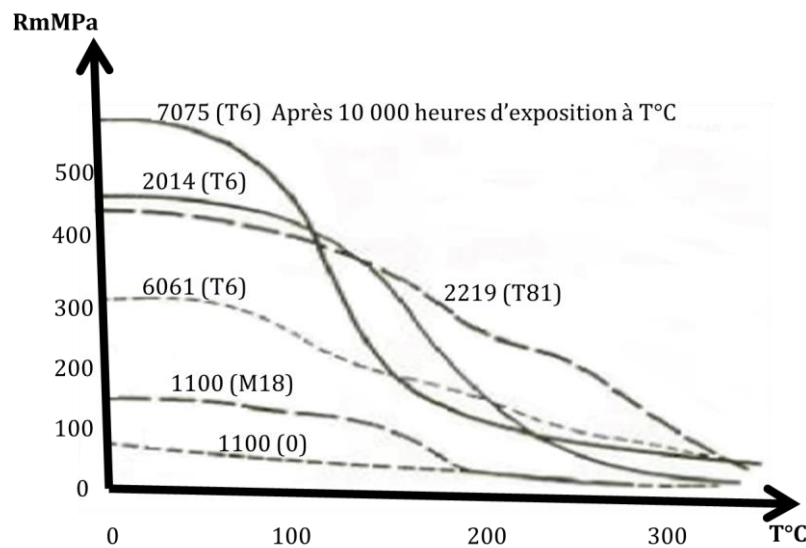


Figure 3.9 : Variation de la résistance à chaud en fonction de la température [3.6]

Les traitements thermiques furent réalisés dans un four électrique à affichage numérique de type LM321.11 dont la température maximale peut atteindre 1100 $^{\circ}C$.

3.3.1. Mise en solution :

Dans notre travail, le matériau est porté à une température aussi élevée que possible, pour permettre la dissolution des éléments qui provoquent le durcissement. Pour éviter tout risque de fusion partielle, cette température doit rester inférieure à la température eutectique et à la température de fusion des phases intermétalliques éventuellement présentes, car une fusion partielle d'un composant de l'alliage rend l'échantillon inutilisable.

Au départ, une température optimale de mise en solution est sélectionnée. Plusieurs échantillons à différentes températures furent utilisés pour permettre une dissolution d'une grande quantité de phase présente dans les échantillons ainsi que pour déterminer le temps optimal de maintien à la température sélectionnée.

La même procédure fut utilisée pour les traitements de revenu mais avec des températures et des temps de maintien différents ; le but était d'obtenir une bonne dureté.

3.3.2. Trempe :

La trempe sert à maintenir les éléments durcissables en solution métastable. La vitesse de refroidissement nécessaire dépend alors très fortement de l'alliage.

3.3.3. Revenu :

Ce traitement permet de réaliser une démixtion aussi fine que possible de la solution sursaturée dans l'aluminium presque pur et dans les précipités intermétalliques.

On parle de revenu, lorsqu'un apport de chaleur est nécessaire pour faire démarrer ou accélérer une réaction. Excepté dans les phases qui précipitent (composition et détails cristallographiques), la réaction se déroule de manière semblable dans les différents alliages durcissables.

La figure 3.10 illustre un exemple de traitement thermique d'un de nos échantillons.

Le tableau 3.5 résume les différentes applications des traitements thermiques pour chaque expérience.

Le même procédé fut utilisé pour chaque échantillon et pour chaque épaisseur : 2 et 2,5 mm.

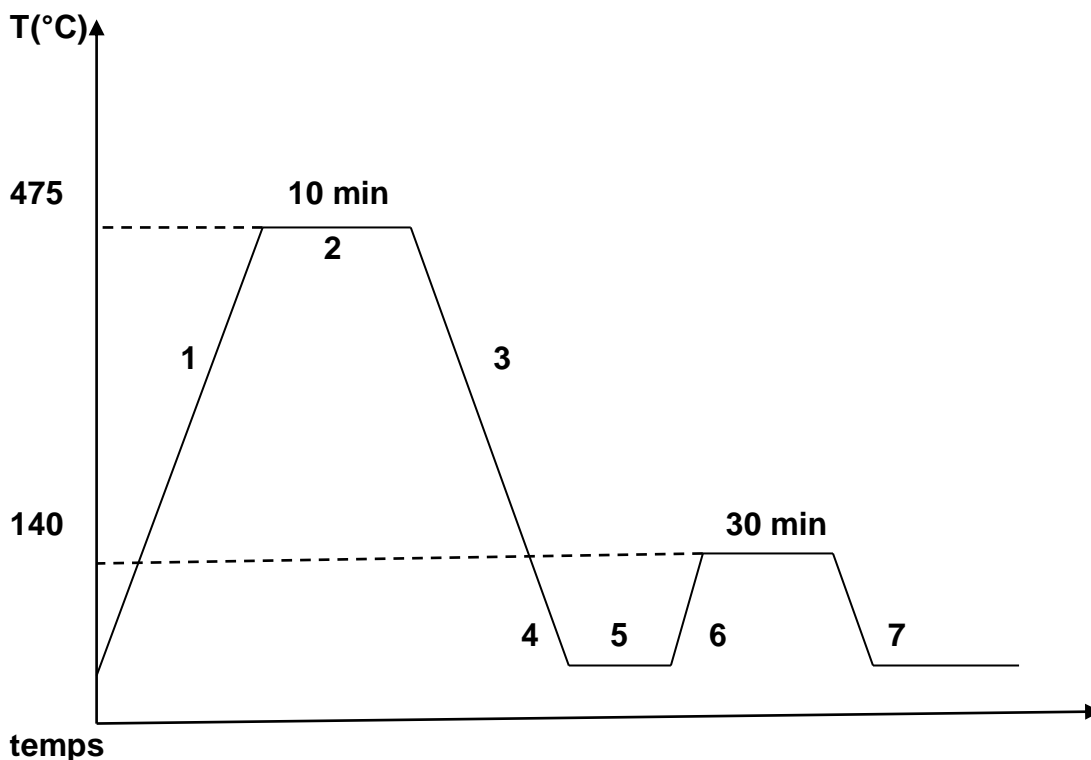


Figure 3.10 : Exemple de traitement thermique d'un échantillon

Avec :

1 = mise en solution

2, 4 et 6 = temps de maintien

3 et 7 = trempe à l'eau

5 = revenu

Mise en Solution : 475 495 510 525°C
Temps de maintien pour chaque mise en solution : 10 20 min
Trempe à l'eau
Revenu : 140 160 180°C
Temps de maintien pour chaque température de revenu : 30min 1h 4h 6h 10h

Tableau 3.5 : Application des traitements thermiques

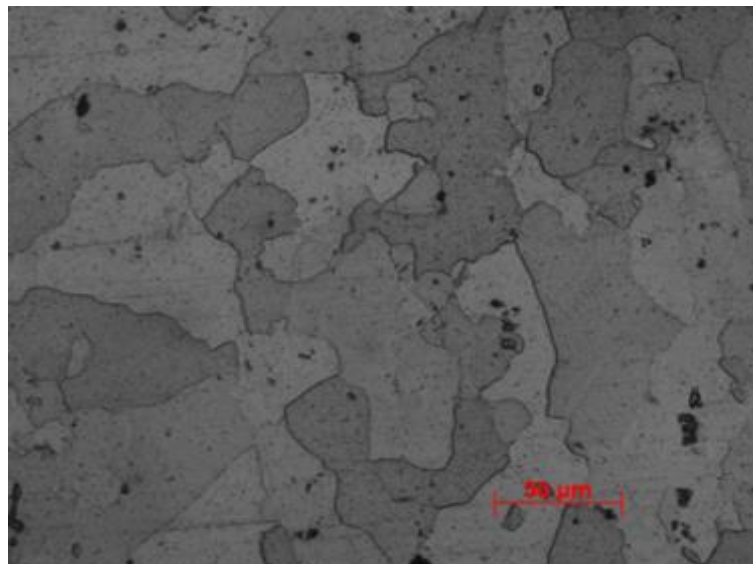


Figure 3.11 : Micrographie d'un échantillon traité : revenu = 160 °C avec un temps de maintien de 6 heures (épaisseur = 2,5 mm)

3.3.4. Caractérisation de la soudure :

Les propriétés mécaniques des alliages d'aluminium 7075 T6 sont en partie liées à la nature et à la proportion des éléments qui les composent et à leur caractère à

favoriser, soit la formation et la répartition des phases α et β , soit à précipiter de nouveaux composés souvent durcissant. Tout processus activé thermiquement ou mécaniquement affecte globalement la morphologie microstructurale, entraînant des modifications des propriétés mécaniques de l'alliage. [3.7]. [3.8]. Lors du processus de soudage TIG, un gradient de température se crée entre le métal de base et la zone fondue. Ainsi, les variations de gradients de température vont engendrer des structures métallographiques et des caractéristiques mécaniques diverses dans les différentes zones constituant le cordon de soudure. La compréhension de la métallurgie du soudage exige l'analyse des phases de fusion et de solidification, des phases de transformation au refroidissement, des effets des traitements thermiques postsoudage et des structures/propriétés mécaniques.

3.4. Caractérisation de la microstructure :

La connaissance des propriétés d'un matériau nécessite la détermination des phases qui le composent, relative à leur nature, leur forme, leur distribution, leur quantité : ces paramètres sont regroupés sous le nom de structure du matériau.

Dans le cas de notre matériau, l'alliage d'aluminium 7075 T6, et après l'élaboration des échantillons, la caractérisation de la microstructure par la diversité de ses composants en termes de taille et de nature, nécessite l'utilisation de plusieurs techniques d'investigations. Celles-ci sont classées en deux catégories :

- L'utilisation de la microscopie optique, de la microscopie électronique à balayage (MEB) et de l'analyse EDX pour des approches locales,
- L'indexation des phases par diffraction (RX) pour des approches globales.

Ces techniques d'investigation permettent de décrire les caractéristiques de la structure granulaire et des intermétalliques. Aussi, et en raison de la grande variété de taille des précipités, une caractérisation quantitative ne peut être obtenue que par l'utilisation de l'indexation des phases par diffraction (RX).

3.4.1. La microscopie optique :

L'examen micrographique a pour but principal la mise en évidence de la structure de l'échantillon et des inclusions non métalliques lors de l'observation au microscope optique.

Avant l'utilisation de la microscopie optique, une préparation des échantillons devait être établie au préalable de la manière suivante :

- Enrobage,
- Polissage,

- Attaque chimique.

3.4.1.A. Enrobage :

Les échantillons des matériaux aluminium variés peuvent être enrobés à froid ou à chaud. Lors du choix d'une résine d'enrobage, il est important de s'assurer que la dureté de la résine est identique ou légèrement supérieure à celle du composant le plus dur dans la surface de l'échantillon.

Pour notre expérience, un enrobage à froid a été utilisé. Ce procédé ne nécessite pas de mise en pression. Il consiste à enrober un échantillon de la matière dans une résine en polyester transparent versé dans un moule récupérable pour permettre la fixation dans un porte-échantillon ou de faciliter sa prise en main lors du polissage manuel.

L'expérience s'est déroulée au niveau de notre Département de Mécanique.

3.4.1.B. Polissage :

Cette étape permet d'obtenir une surface avec un effet de miroir (la plus lisse possible et sans rayure). De la qualité du polissage dépendront en partie la viabilité des observations et les résultats de l'examen micrographique.

L'opération consiste à polir mécaniquement les échantillons à l'aide de papiers abrasifs en carbure de silicium. Ces papiers sont classés par grosseur de grains : 120, 400, 800, 1000 et 1200. Ces nombres correspondent au nombre de grains utilisé par unité de surface (grains/cm²). Le polissage est accompagné d'une lubrification à l'eau constante de l'échantillon afin d'éviter tout risque de surchauffe de ce dernier. Une opération de finition est exigée en utilisant un tapis de velours et une patte d'alumine. Cette ultime étape nous permet d'obtenir une surface avec un effet miroir où l'état de la surface doit être le plus lisse possible et ne possédant aucune rayure.

L'expérience s'est déroulée au niveau de notre Département de Mécanique. La polisseuse utilisée de marque Metasinex est représentée dans la figure 3.12.



Figure 3.12 :Polisseuse Metasinx

3.4.1.C. Attaque chimique :

Par la suite, et pour mettre en évidence les phases présentes dans l'échantillon qu'est la structure micrographique, ces échantillons seront attaqués chimiquement par un réactif Keller constitué de :

- 2 ml d'acide fluorhydrique (HF),
- 5 ml d'acide nitrique (HNO₃),
- 3 ml d'acide chlorhydrique (HCl),
- 190 ml d'eau distillée (H₂O).

Les échantillons furent immergés durant 30 à 40 secondes, lavés à l'eau et séchés à l'aide d'un sèche-cheveux ordinaire.

3. 5. Méthodes d'essais mécaniques :

Les essais mécaniques des soudures dérivent des techniques conventionnelles. Initialement établis pour des produits homogènes, ils sont mis en œuvre sur des produits hétérogènes présentant des discontinuités de forme, des hétérogénéités (zone fondue, zone affectée thermiquement,...) et d'éventuels défauts internes.

Le but de ces essais est de contribuer à l'évaluation de la qualité d'un assemblage, de caractériser l'interaction entre un matériau et un procédé de soudage, et de fournir des données quantitatives sur le comportement des assemblages soudés.

3. 5.2. Essai de résilience :

Les matériaux présentent au niveau de leur microstructure des caractéristiques qui diminuent leur résistance à la propagation des fissures. De ce fait, la ténacité à la rupture est déterminée par la propagation des fissures en suivant des chemins de fissuration faciles. La distribution des chemins de fissuration faciles est importante pour pouvoir déterminer la ténacité à la rupture.

Les dimensions, le mode de fissuration et la distribution de ces constituants de la microstructure sont importants à connaître pour pouvoir déterminer la facilité avec laquelle une fissure peut se propager dans le matériau, et par conséquent pour pouvoir déterminer la ténacité à la rupture. L'importance de ces paramètres peut varier par modification de la composition de l'alliage ou du traitement du composant.

La connaissance des caractéristiques mécaniques déduite de certains essais (essai de traction) peut être insuffisante, car des ruptures peuvent être obtenues en dessous de la limite élastique dans les conditions particulières qui rendent le métal fragile. L'un des moyens pour caractériser la fragilisation d'un matériau est fourni par l'essai de résilience sur éprouvettes entaillées, décrit dans la norme NF EN 10045. Le principe consiste à rompre, d'un seul coup de mouton pendule, une éprouvette entaillée en son milieu et reposant sur deux appuis. On détermine alors l'énergie absorbée dont on déduit la résilience.

En mesurant la résilience en fonction de la température, on peut tracer une courbe mettant en évidence, si elle est effective, une zone de transition ductile-fragile correspondant à un changement de comportement de ductile à fragile.

Cette transition est rarement abrupte. On peut alors sélectionner des températures de transition arbitraires.

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

Ces éprouvettes sont représentées dans la figure 3.18.

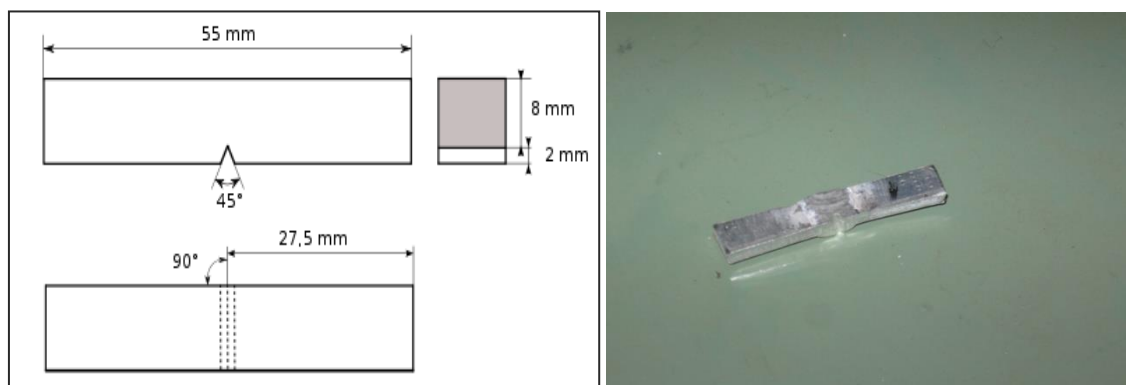


Figure 3.18 : Epreuve normalisée

Aussi, l'entaille est réalisée selon le type de l'expérience désiré :

- Métal de base,
- ZAT,
- Cordon.

Un exemple d'emplacement (zone fondue) est représenté dans la figure 3.19 :

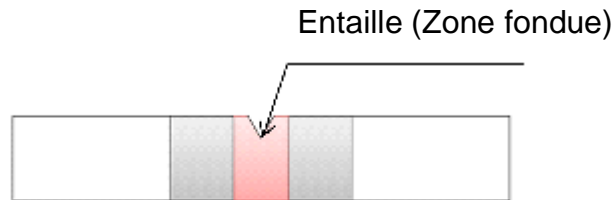


Figure 3.19 : Emplacement de l'entaille dans la zone fondue

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

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

$$\text{Résilience} = \frac{\text{énergie absorbée par la rupture } W \text{ (Joules)}}{\text{section au droit de l'entaille (cm}^2\text{)}} \quad (3.3)$$

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

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

Cette machine est représentée dans la figure 3.20 :



Figure 3.20 :Machine de résilience de marque Instron

Chapitre 4

Résultats et interprétations

Chapitre 4 : Résultats et interprétations

4.1. Introduction :

La microstructure de l'aluminium conditionne largement les propriétés des matériaux, qu'elles soient mécaniques, magnétiques, électriques ou autres. Elle dépend de la chimie du matériau mais également de toute la gamme de transformation depuis la solidification, dont les traitements thermomécaniques (laminage à chaud) et les traitements mécaniques et thermiques. Tout au long de la gamme de fabrication, les transformations de phases, la déformation plastique des grains, la restauration et/ou la recristallisation des grains écrouis, les interactions précipitation-recristallisation, la croissance normale ou anormale des grains, influent sur la microstructure finale du matériau.

Lors de notre expérience et avant l'utilisation du procédé de soudage, la séquence de précipitation dans notre matériau est relativement complexe et fait intervenir à la fois des phases stables ainsi que des phases métastables telles que les zones de Guinier-Preston et la phase métastable η' .

Cette séquence est représentée par :

Solution solide sursaturée \longrightarrow GP Zones \longrightarrow η' \longrightarrow η

Les alliages d'aluminium 7075 T6 sont dans l'ensemble difficilement soudables car d'une part, ils sont sujets aux criques lors de la solidification de la soudure et d'autre part, leurs caractéristiques mécaniques après soudage sont fortement diminuées. Cependant, ces alliages sont plus ou moins sensibles à ces phénomènes. L'utilisation du procédé de soudage TIG à grande concentration d'énergie et à protection gazeuse accrue améliore les résultats. Des soudures TIG (sans métal d'apport) des éprouvettes avec une pénétration complète ont été réalisées manuellement.

4.4. Résilience des échantillons à l'état soudé et traité :

Afin d'exploiter convenablement les résultats des essais de résilience, il est nécessaire de s'intéresser préalablement aux particularités des essais de résilience, à l'évolution des propriétés mécaniques de notre matériau et à son mode de rupture en fonction des conditions particulières des essais de résilience.

Au cours de l'essai, l'entaille va modifier le comportement du matériau en provoquant l'apparition de contraintes. La relation entre ces contraintes fait qu'il est nécessaire d'appliquer des contraintes élevées au risque d'engendrer la rupture sans passer par un stade de déformation plastique. En variant la température à laquelle on soumet le matériau à l'essai, les caractéristiques mécaniques mesurées varient. Cette variation se fait d'une façon continue de part et d'autre de la température

ambiante. Aussi, et lors de l'essai, une augmentation de la vitesse de déformation engendre une élévation de la limite d'élasticité et de la résistance à la rupture qui par conséquence entrainera une diminution de la déformation plastique avant rupture.

L'application de l'essai de résilience peut avoir certains avantages comme: [4.15]

- Préparation facile (voir chapitre 3),
- Facilité de l'application de cet essai,
- Cout négligeable lors de l'utilisation.

Pour chaque échantillon, une rupture lui est appliquée. Celle-ci diffère selon les conditions de travail et selon les paramètres utilisés. Mais ce phénomène de la rupture diffère lors de l'expérience et lors de la théorie.

En théorie, le phénomène de la rupture dynamique est complexe.

En pratique, le phénomène d'une contrainte critique est aussi complexe à déterminer.

Parmi les conséquences de cet essai, on peut citer la fissure qui apparaît sous l'effet du choc en utilisant une très grande vitesse (les contraintes montent et descendent presque instantanément). De ce fait, leur mesure exacte n'est pratiquement pas possible.

Pour avoir une idée sur les deux parties, expérimentale et théorique, nous nous sommes intéressés à utiliser une méthode numérique : la méthode des plans d'expérience. Cette étude est détaillée dans le prochain chapitre.

Lors de cet essai, 6 différentes températures ont été utilisées : 0, 15, ambiante, 30, 45 et 60 °C. Les résultats sont montrés dans les figures suivantes :

Pour obtenir ces températures, une solution composée du CO₂ à l'état solide et de l'alcool furent préparés.

Chaque température est mesurée à l'aide d'un thermocouple.

Les figures 4.33 et 4.34 illustrent cette préparation :



Figure 4.33: Préparation de l'échantillon avant l'essai de résilience



Figure 4.34: Obtention d'une température souhaitée à l'aide d'un thermocouple

Les résultats de cet essai sont représentés dans les figures 4.35, 4.36 et 4.37. Ces dernières résument les résultats des cas du métal de base, de la zone affectée thermiquement et de la zone fondue. L'analyse nous conduit au tracé de la courbe dite de transition de la résilience qui représente les variations de la résilience mesurée en fonction de la température d'essai (0, 15, ambiante, 30, 45 et 60 °C).

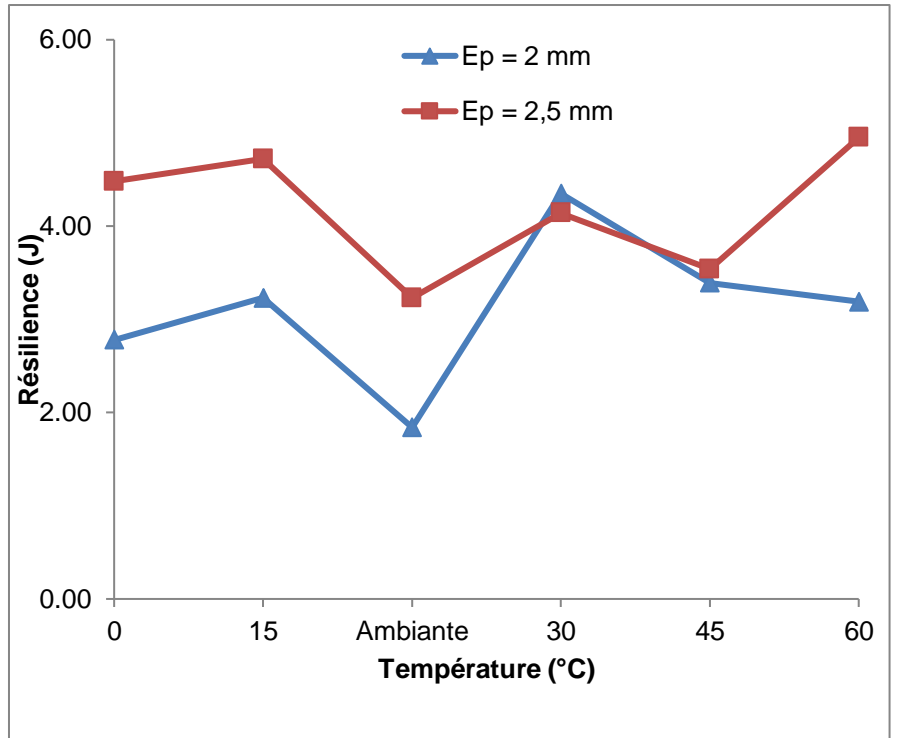
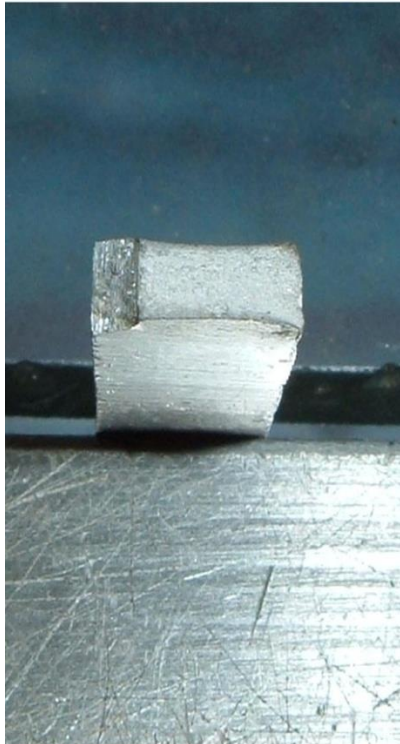


Figure 4.35 : Photo d'une éprouvette ayant subi un essai de résilience et Variation de la résilience en fonction des différentes températures (Métal de base)

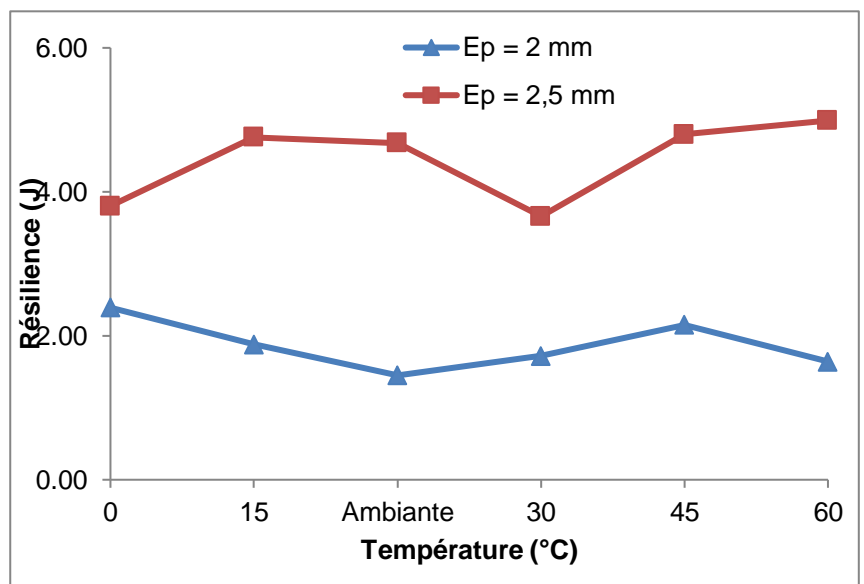
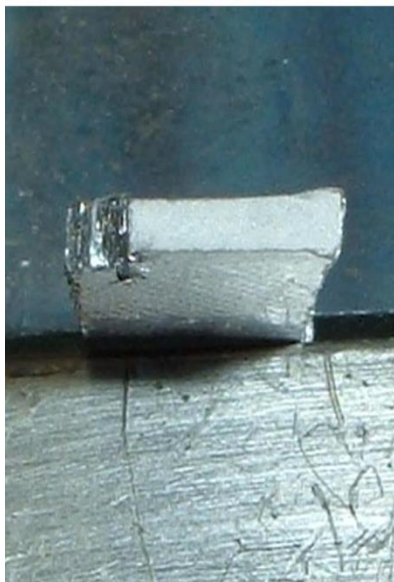


Figure 4.36 : Photo d'une éprouvette ayant subi un essai de résilience et Variation de la résilience en fonction des différentes températures (Zone affectée thermiquement)

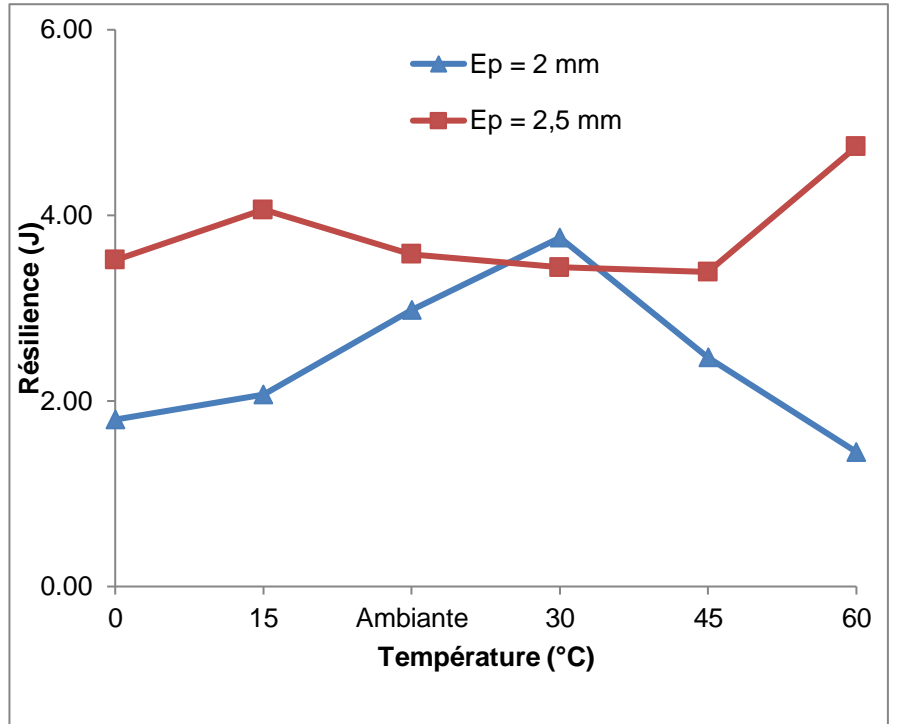
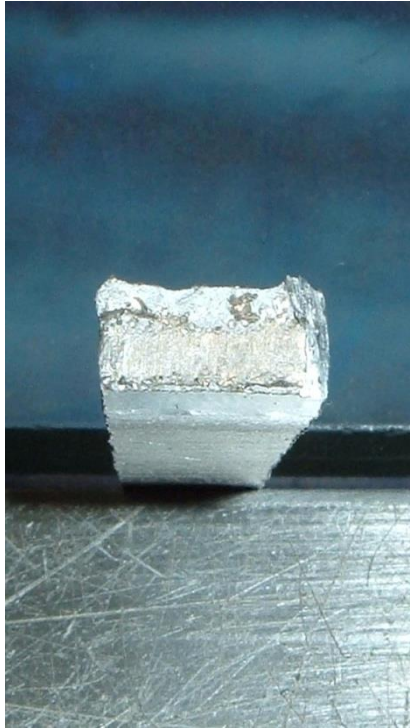


Figure 4.37 : Photo d'une éprouvette ayant subi un essai de résilience et Variation de la résilience en fonction des différentes températures (Zone fondue)

L'énergie varie d'une zone à une autre. Son impact dans la zone fondue reste le même tandis que dans la zone affectée thermiquement, il varie.

L'utilisation des alliages d'aluminium 7075 T6 soudés engendre deux importantes applications :

- Changement de la microstructure et une variation importante des dimensions des grains,
- Formation et apparition de fissures qui n'étaient pas présentes à l'état initial du matériau (non soudé).

De notre expérience, on déduit que l'essai de résilience permet de tester la résistance à la rupture brutale dans les conditions qui lui sont propres mais qu'un seul essai réalisé à une température quelconque n'a qu'une signification très limitée. En pratique, c'est l'analyse des variations des résultats des essais de résilience effectués à différentes températures qui va donner tout son intérêt à ce type d'essai en permettant d'apprécier la résistance à la rupture fragile de notre matériau.

Les figures 4.38, 4.39 et 4.40 du Microscopie Electronique à Balayage (MEB) représentent les effets de l'essai dans la zone fondue et la zone affectée thermiquement. L'état des surfaces des fractures de la zone de fusion révèle les faciès de clivage indiquant la présence d'une fissure fragile. Les images obtenues montrent que la rupture est ductile.

L'impact de l'énergie appliquée sur la zone de fusion est un peu lent. Il est dû à la présence de quelques microfissures comme le montre ces figures.

Les images montrent clairement l'apparition des microfissures dans notre matériau.

Parmi les principales catégories de ce phénomène, on peut citer : [4.16].

- Clivage,
- Cavités,
- stries de fatigue,
- fatigue intra granulaire,
- fatigues mixtes,
-

(

Chapitre 5 :

Modélisation numérique de l'essai de résilience

Chapitre 5 : Modélisation numérique de l'essai de résilience

5.1. Introduction :

Les chapitres précédents ayant retracé les différents phénomènes liés au procédé de soudage TIG ainsi que leurs conséquences thermiques, métallurgiques et mécaniques sur notre matériau à savoir l'alliage d'aluminium 7075 T6, nous nous intéresserons dans ce chapitre à expliquer un type de modélisation.

La modélisation numérique des liaisons des assemblages est difficile en raison des grandes déformations, des modifications thermiques ou des frottements qu'elles subissent. La simulation de mise en forme d'assemblage est représentée dans la plupart des cas par un modèle mathématique non linéaire. Cette non linéarité est induite par l'existence des grands déplacements, du modèle de comportement et des conditions de frottement inhérents à la simulation de pièces assemblées.

La modélisation des procédés de soudage nécessite au préalable l'étude des phénomènes physiques intervenant au niveau des états suivants :

- Microscopique,
- Macroscopique,
- Bain liquide.

L'échelle microscopique concerne l'étude de la structure microscopique du cordon, c'est-à-dire l'étude des phénomènes liés à la solidification rapide du matériau.

L'échelle macroscopique intéresse la détermination des différentes contraintes et des distorsions résiduelles.

Le bain liquide étudie les interactions intervenant directement sous l'arc.

En pratique, chaque cas est étudié séparément, mais la fiabilité des résultats reste liée aux connaissances des lois de comportement du matériau utilisé lors de l'expérience. Actuellement, aucun modèle ne permet de prendre en considération tous les phénomènes simultanément (échelle microscopique, macroscopique et bain liquide).

Dans les travaux étudiés, dont ceux de Taylor, Hughes, Strusevich et Pericleous [5.1], il est mentionné que la simulation numérique du procédé de soudage ne peut avoir lieu qu'en deux étapes :

- Modélisation du bain fondu en tenant compte des différents phénomènes thermohydrauliques afin de déterminer la forme du bain fondu et celle de la ZAT.

- Modélisation du comportement thermomécanique global de la structure soudée où le rôle de la source de chaleur est important.

Deux différentes méthodes vont être utilisées séparément. La première, plan des expériences, concernera l'essai de résilience et la seconde, logiciel Autodesk Inventor, l'essai de traction.

5.2. Méthode des plans d'expérience :

Parmi les méthodes de simulations existantes, nous avons utilisé celle des plans d'expérience pour simuler nos résultats expérimentaux. [5.2].

Dans les différentes recherches, les essais sont obligatoires. Or ces essais sont trop souvent conduits sans méthodologie et les résultats obtenus sont le plus souvent mal exploités.

La méthode des plans d'expériences permet une meilleure organisation des essais accompagnant des résultats expérimentaux et ces essais seront applicables à de nombreuses disciplines et à toutes les industries.

Les plans d'expérience servent à optimiser l'organisation des essais afin d'obtenir le plus de renseignements possibles avec le minimum d'expériences. Elle permet également d'obtenir la meilleure précision possible sur la modélisation des résultats. [5.3].

5.2.1. Définition :

Les plans d'expériences sont une méthode de calcul d'une fonction décrivant un phénomène à n variables indépendantes basé sur les statistiques.

Sir Ronald Fisher (1890-1962), l'un des fondateurs de la statistique inductive moderne, introduit la notion de plan d'expérience. Durant les années 20, son travail se fera dans une station expérimentale agricole où il sera amené à réaliser un nombre important d'expériences. Son intérêt était de trouver une méthode réduisant le nombre d'expériences réalisées et augmentant la précision des expériences.

Cependant, c'est Genichi Taguchi, ingénieur et statisticien Japonais qui va démocratiser cette méthode afin que les techniciens puissent en bénéficier.

Les principaux avantages de cette méthode sont :

- Diminution du nombre d'essais,

- Etude d'un grand nombre de facteurs,
- Détection des interactions entre facteurs,
- Modélisation des réponses étudiées,
- Précision optimale des résultats.

Cette méthode permettra une interprétation rapide et infallible des résultats en fournissant un modèle expérimental précis du système étudié, et donnera le maximum de renseignements avec le minimum d'expériences. On devra suivre alors des règles mathématiques et adopter une démarche rigoureuse. Il existe de nombreux plans d'expériences adaptés à tous les cas rencontrés par un expérimentateur.

La compréhension de cette méthode est basée sur deux notions essentielles : la notion d'espace expérimental et la notion de modélisation mathématique des grandeurs étudiées.

5.2.2 Notion d'espace expérimental et terminologie :

Ce paragraphe rappelle les principaux termes utilisés dans la méthode des plans d'expériences qui sont :

- Le facteur,
- La réponse,
- La surface de réponse.

5.2.2.A. Le facteur :

Lors de l'étude, les variables à étudier sont appelées facteurs. Ces derniers varient généralement entre deux bornes :

- La borne inférieure,
- La borne supérieure.

Lors de l'application des plans d'expérience, le facteur varie entre le niveau bas et le niveau haut qui sont représentés respectivement par -1 et + 1. L'ensemble de toutes les valeurs prises par le facteur entre le niveau bas et le niveau haut est dénommé le domaine de variation du facteur ou plus simplement le domaine du facteur. Un facteur peut prendre plusieurs niveaux à l'intérieur de son domaine de variation.

La figure 5.1 représente le domaine de variation d'un seul facteur :

Domaine du facteur

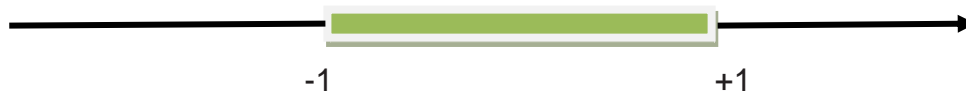


Figure 5.1 : Domaine de variation d'un seul facteur

Avec :

-1 : niveau bas

+1 : niveau haut

Les facteurs étudiés peuvent être des variables continues que l'on ne peut pas ordonner ou des variables discontinues que l'on peut ordonner. On parlera alors de facteurs continus, de facteurs discrets et de facteurs ordonnables.

Un facteur est représenté par un axe orienté. Si le facteur est continu, cet axe est gradué selon une certaine échelle. Si le facteur est ordonnable, on indique l'ordre choisi sur l'axe.

S'il y a 2 facteurs, le second facteur est représenté, lui aussi, par un axe gradué et orienté. On définit, comme pour le premier facteur : son niveau haut, son niveau bas et son domaine de variation. Ce second axe est disposé orthogonalement au premier. L'espace créé est appelé espace expérimental.

La figure 5.2 montre le domaine de variation de deux facteurs :

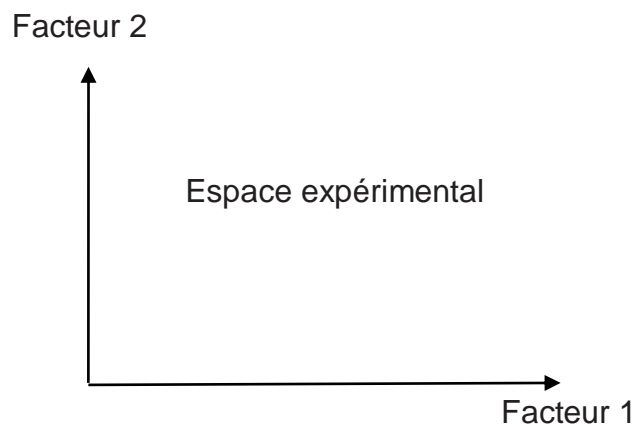


Figure 5.2 : Domaine de variation de deux facteurs

Les niveaux des facteurs peuvent être considérés comme les coordonnées d'un point de l'espace expérimental.

Une expérience donnée est alors représentée dans ce système d'axes par un point : Ce point est appelé point expérimental ou point d'expérience.

Un plan d'expériences représente un ensemble de plusieurs points expérimentaux. Ces derniers sont illustrés dans la figure 5.3.

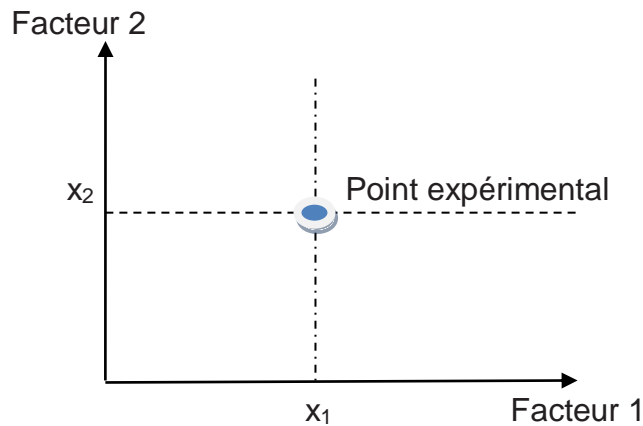


Figure 5.3 : Points expérimentaux dans l'espace expérimental.

La figure 5.4 schématise plusieurs expériences bien définies représentées par des points répartis dans le domaine d'étude :

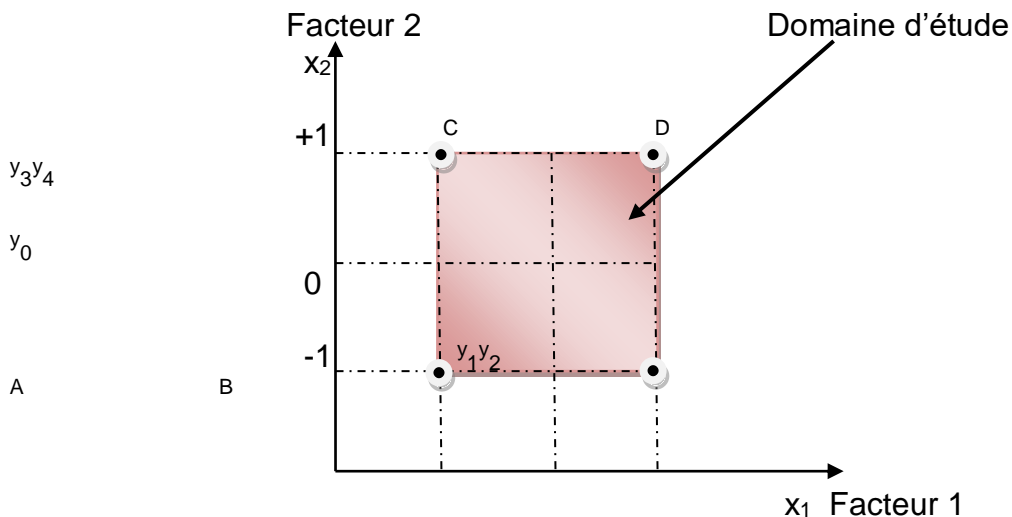


Figure 5.4 : Domaine d'étude pour le cas de 2 facteurs

Cette manière de représenter une expérimentation par un ensemble de points dans un espace cartésien est une représentation géométrique de plan d'expériences.

5.2.2.B. La réponse :

Les grandeurs intéressant l'expérimentateur et mesurées à chaque expérience sont appelées réponses.

Le choix des réponses est un problème difficile qui ne relève pas de la théorie des plans d'expériences. Ce n'est qu'après une analyse minutieuse des phénomènes, des enjeux, des objectifs et des contraintes de l'étude que l'on peut définir la ou les bonnes réponses.

5.2.2.C. Surface de réponse :

En l'absence de toute indication sur la fonction liant la réponse aux facteurs, on se guide, à priori, par une loi d'évolution.

Cela définit le modèle mathématique à priori ou modèle postulé.

Quand on recherche le lien existant entre une grandeur d'intérêt, y , et des variables, x_i , on se référera aux plans d'expériences si l'on étudie une fonction de type :

$$Y = f(x_i) \quad (5.1)$$

On attribue un axe à une réponse et cet axe est orthogonal à l'espace expérimental.

A chaque point du domaine d'étude correspond une réponse. A l'ensemble de tous les points du domaine d'étude correspond un ensemble de réponses qui définissent une surface appelée la surface de réponse.

La figure 5.5 représente une surface de réponse :

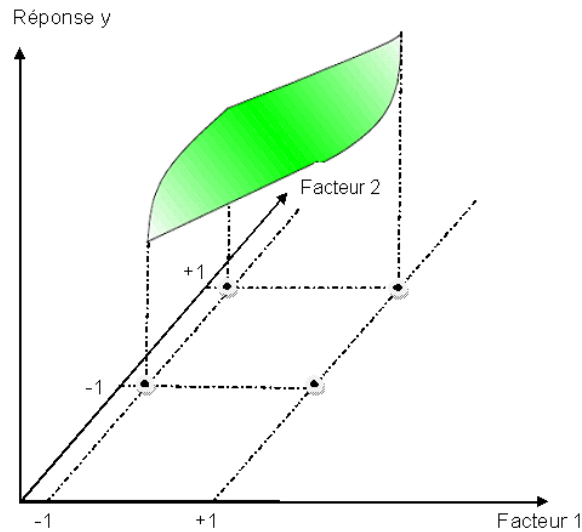


Figure 5.5 : Représentation d'une surface de réponse

5.2.3. Notion de modélisation mathématique et application :

Quand on veut connaître la dépendance d'une variable de sortie F d'un cas précis, plusieurs interrogations sont posées:

- Quels sont les facteurs les plus influents ?
- Existe-t-il des interactions entre les facteurs (corrélations) ?
- Peut-on linéariser le processus en fonction de ces facteurs et le modèle ainsi obtenu est-il prédictif ?
 - Comment minimiser le nombre de points de mesure du processus pour obtenir le maximum d'informations ?
 - Existe-t-il des biais dans les résultats des mesures ?

La méthode du plan d'expérience répond à ces questions et sera ainsi appliquée à notre cas.

Le principe consistera à planifier nos essais en utilisant des tables ayant la propriété d'orthogonalité pour configurer les combinaisons des facteurs à tester. [5.4].

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

$$y_i = a_0 + \sum_{i=1}^k a_i x_i + \sum_{i=1}^k a_{ii} x_i^2 + \sum_{i=1}^{k-1} \sum_{j=j+1}^k a_{ij} x_i x_j \quad (5.2)$$

La forme développée pour notre cas s'écrit :

$$y_i = a_0 + a_1 x_{i,1} + a_2 x_{i,2} + a_3 x_{i,3} + a_{12} x_{i,1} x_{i,2} + a_{13} x_{i,1} x_{i,3} + a_{23} x_{i,2} x_{i,3} + a_{11} x_{i,1}^2 + a_{22} x_{i,2}^2 + a_{33} x_{i,3}^2 \quad (5.3)$$

Avec :

x_1 = Epaisseur de l'éprouvette normalisée,

x_2 = Température au moment de l'essai,

x_3 = Zone d'impact.

Ces 3 paramètres (x_1 , x_2 , x_3) agissent sur la réponse "y", donc sur la résilience.

Le tableau du plan d'expérimentation est dressé de la façon suivante :

Exp No	Exp Name	Incl/Excl	Résilience
1	N1	Incl	2,78
2	N2	Incl	3,23
3	N3	Incl	1,84
4	N4	Incl	4,35
5	N5	Incl	3,39
6	N6	Incl	3,19
7	N7	Incl	2,39
8	N8	Incl	1,88
9	N9	Incl	1,45
10	N10	Incl	1,72
11	N11	Incl	2,15
12	N12	Incl	1,64
13	N13	Incl	1,8
14	N14	Incl	2,07
15	N15	Excl	2,98
16	N16	Incl	3,76
17	N17	Incl	2,47
18	N18	Incl	1,45
19	N19	Incl	4,48
20	N20	Incl	4,72
21	N21	Incl	3,23
22	N22	Incl	4,14
23	N23	Incl	3,54
24	N24	Incl	4,95
25	N25	Incl	3,8
26	N26	Incl	4,76

27	N27	Incl	4,68
28	N28	Incl	3,66
29	N29	Incl	4,8
30	N30	Incl	4,99
31	N31	Incl	3,52
32	N32	Incl	4,06
33	N33	Incl	3,58
34	N34	Incl	3,44
35	N35	Incl	3,39
36	N36	Incl	4,74

Tableau 5.1 : Tableau du plan expérimental

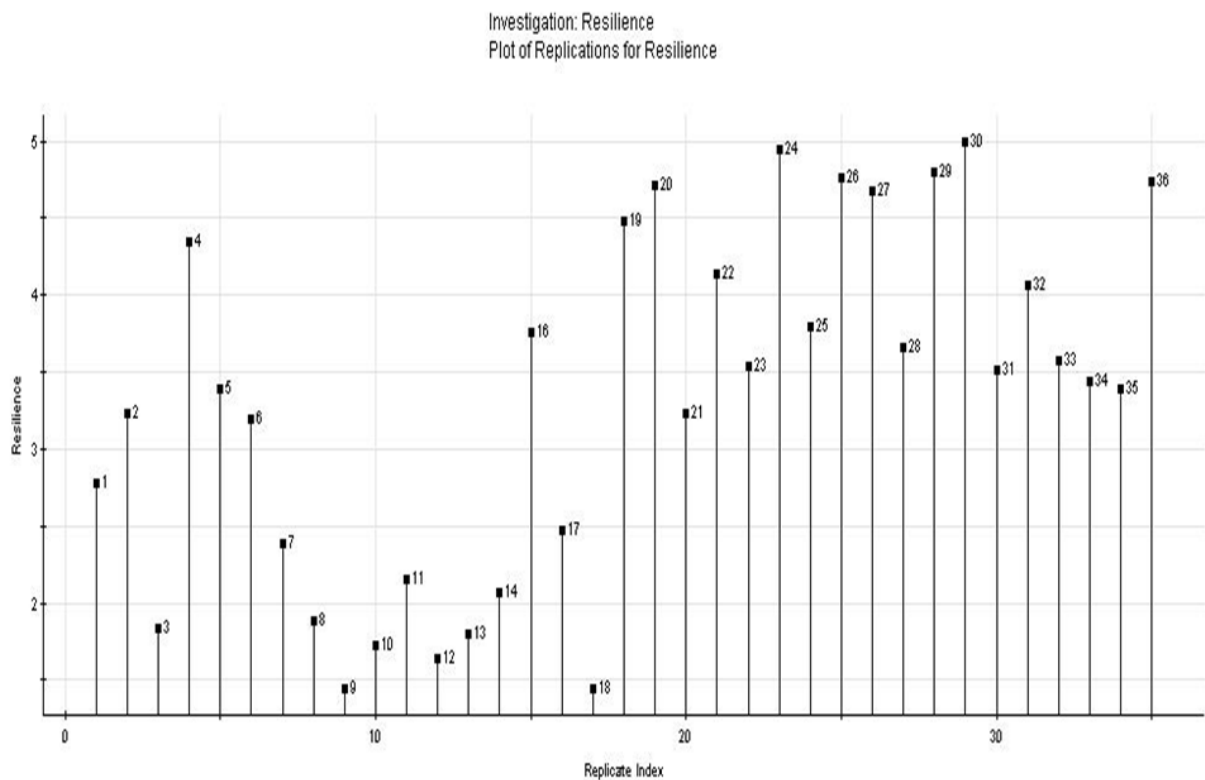


Figure 5.6 : Histogramme des valeurs des résiliences dans l'ordre du tableau expérimental

La forme codifiée s'écrit comme suit en utilisant l'équation suivante :

$$x_i = \frac{u_i - \left(\frac{u_{\min i} + u_{\max i}}{2} \right)}{\left(\frac{u_{\max i} - u_{\min i}}{2} \right)} \quad (5.4)$$

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

Avec :

x_i = Valeur codifiée à trouver,

u_i = Valeur réelle du paramètre,

u_{\max} = Valeur maximale du paramètre,

u_{\min} = Valeur minimale du paramètre.

Exp No	Layer	Température	Area
1	-1	-1	-1
2	-1	-0,5	-1
3	-1	-0,333	-1
4	-1	0	-1
5	-1	0,5	-1
6	-1	1	-1
7	-1	-1	0
8	-1	-0,5	0
9	-1	-0,333	0
10	-1	0	0
11	-1	0,5	0
12	-1	1	0
13	-1	-1	1
14	-1	-0,5	1
16	-1	0	1
17	-1	0,5	1
18	-1	1	1
19	1	-1	-1
20	1	-0,5	-1
21	1	-0,333	-1
22	1	0	-1
23	1	0,5	-1
24	1	1	-1
25	1	-1	0
26	1	-0,5	0
27	1	-0,333	0
28	1	0	0
29	1	0,5	0
30	1	1	0
31	1	-1	1
32	1	-0,5	1
33	1	-0,333	1
34	1	0	1
35	1	0,5	1
36	1	1	1

Tableau 5.2 : Valeurs codées des résiliences

Les coefficients a_i du polynôme sont obtenus par la formule :

$$\text{Coefficients} = ({}^tXX)^{-1}({}^tX)(Y) \quad (5.5)$$

Résilience	Coeff. SC	Std. Err.	P	Conf. int(±)
Constant	3,70861	0,576507	5,75593e-007	1,18094
e	0,500723	0,373135	0,190399	0,764342
T	0,00712272	0,0165974	0,671101	0,0339986
A	-0,296368	0,270235	0,282112	0,553557
e*T	0,00405732	0,00628109	0,523566	0,0128664
e*A	0,121991	0,154949	0,437721	0,317401
T*A	-0,000698331	0,00770398	0,928418	0,0157811

N = 35	Q2 =	0,485	Cond. no. =	411,3314
DF = 28	R2 =	0,648	Y-miss =	0
	R2 Adj. =	0,573	RSD =	0,7410
			Conf. lev. =	0,95

Tableau 5.3 : Coefficients a_i du modèle polynômial

Le modèle mathématique qui décrit la résilience en fonction des 3 paramètres cités prend alors la forme suivante :

$$y = 3,70861 + 0,500723x_1 + 0,00712272x_2 - 0,296368x_3 + 0,00405732x_1x_2 + 0,121991x_1x_3 - 0,000698331x_2x_3$$

Avec :

y = Résilience,

x_1 = Epaisseur de l'éprouvette normalisée,

x_2 = Température au moment de l'essai,

x_3 = Zone d'impact.

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

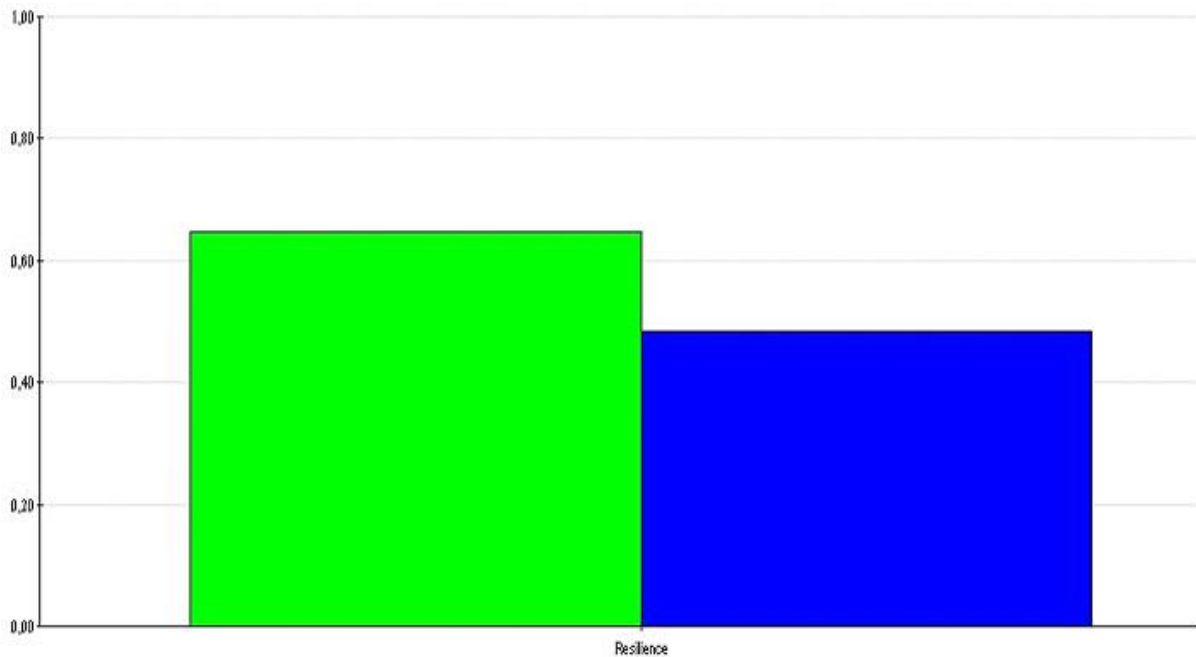


Figure 5.7 : Coefficient de qualité R² et de prédiction Q²

Le coefficient $R^2=0,648$ du polynôme montre la qualité du polynôme à décrire et à rapprocher des valeurs expérimentales, alors que le coefficient $Q^2 = 0,485$ représente la faculté du polynôme à donner les valeurs se situant dans la plage expérimentale non effectuées. Les valeurs des coefficients montrent l'action de chaque paramètre sur la résilience "y". On remarque que le paramètre le plus prépondérant est l'épaisseur égale à $0,500723x_1$ qui va augmenter donc la résilience. A l'inverse, le paramètre de la zone de contact en passant de 1 à 3 (existence de 3 zones d'impact) agit négativement ($-0,296368x_3$) : la résilience diminuera en passant du métal de base vers la ZAT puis vers la ZF. On en déduit alors que la zone fondue du point de vue choc dynamique est plus faible que le métal de base et la ZAT.

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

Les figures suivantes 5.8 et 5.9 montrent la déviation de chaque expérience par rapport au modèle mathématique. On remarque, par exemple, que les points qui se rapprochent du modèle sont les points 1 et 7 alors que ceux qui s'éloignent sont les points 4 et 16. En fonction de cela, on peut dresser un classement dans un tableau décrivant dans l'ordre croissant les écarts des points par rapport au modèle.

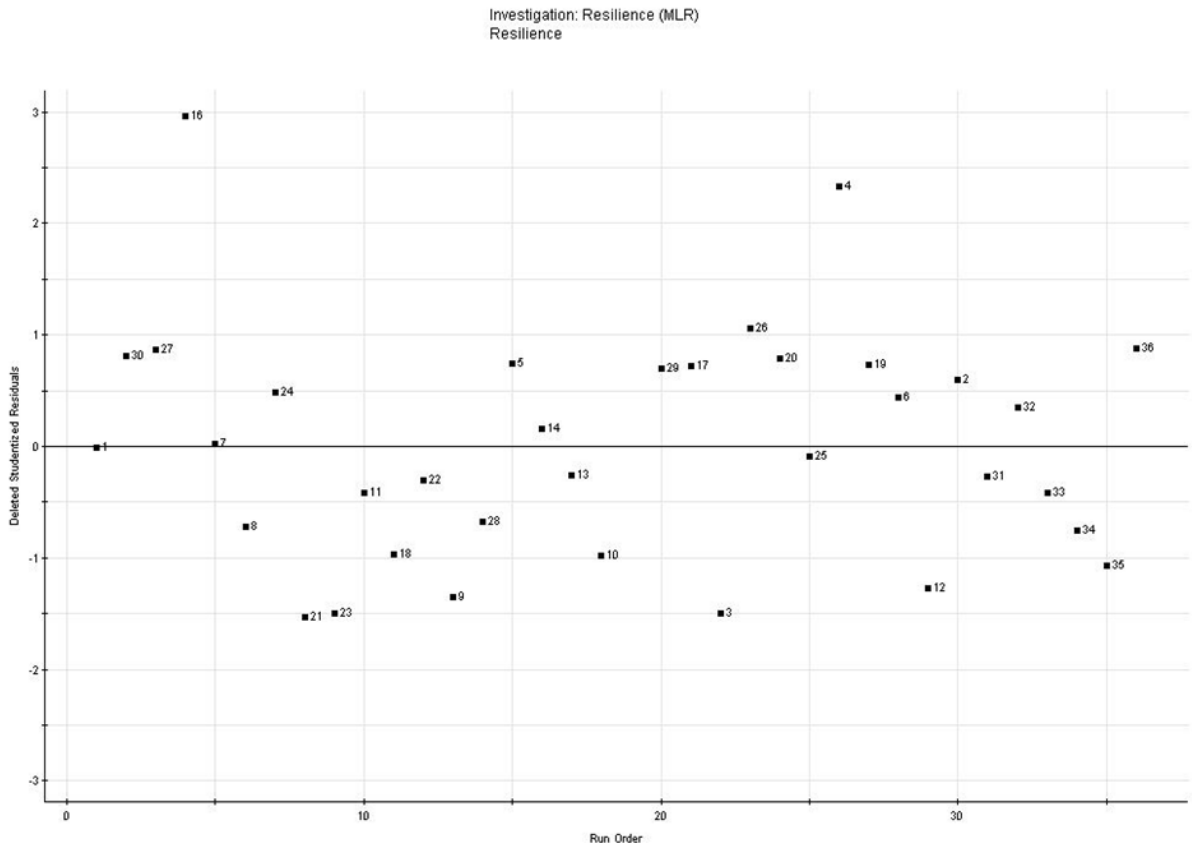


Figure 5.8 : Graphe I des écarts des points par rapport au modèle

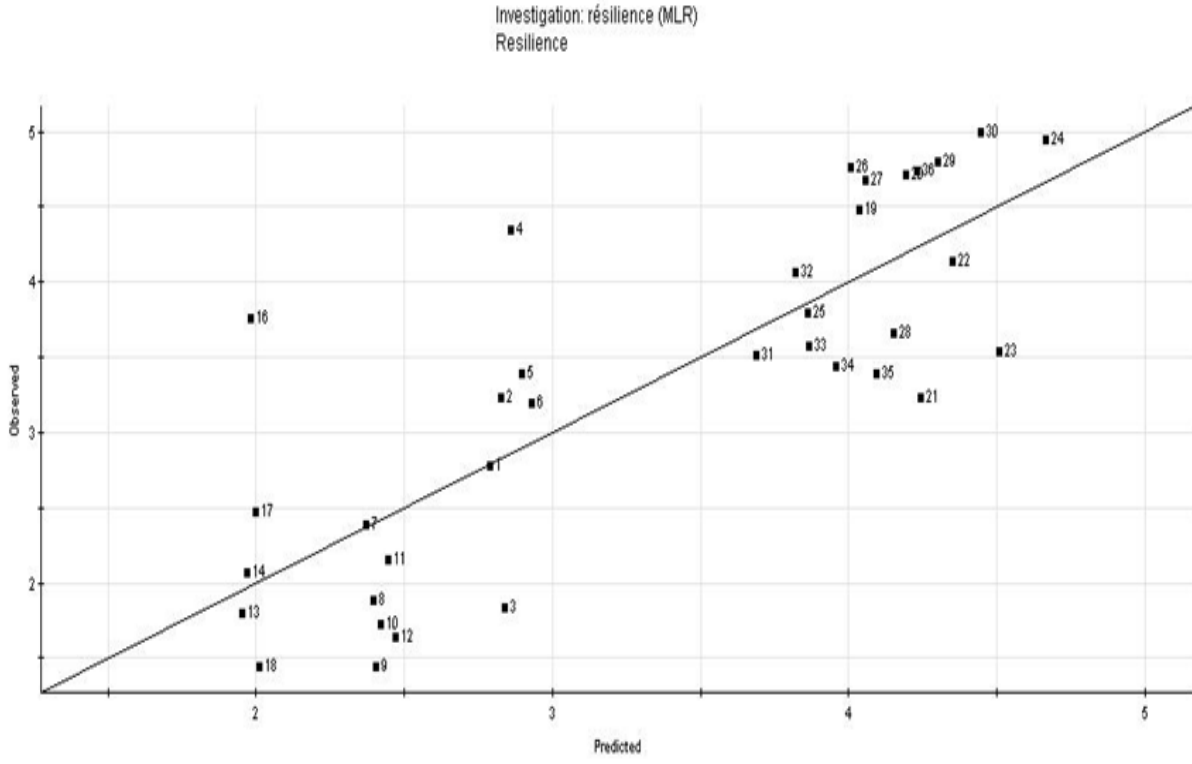


Figure 5.9 : Graphe II des écarts des points par rapport au modèle

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

Les 3 cas sont représentés ci-dessous :

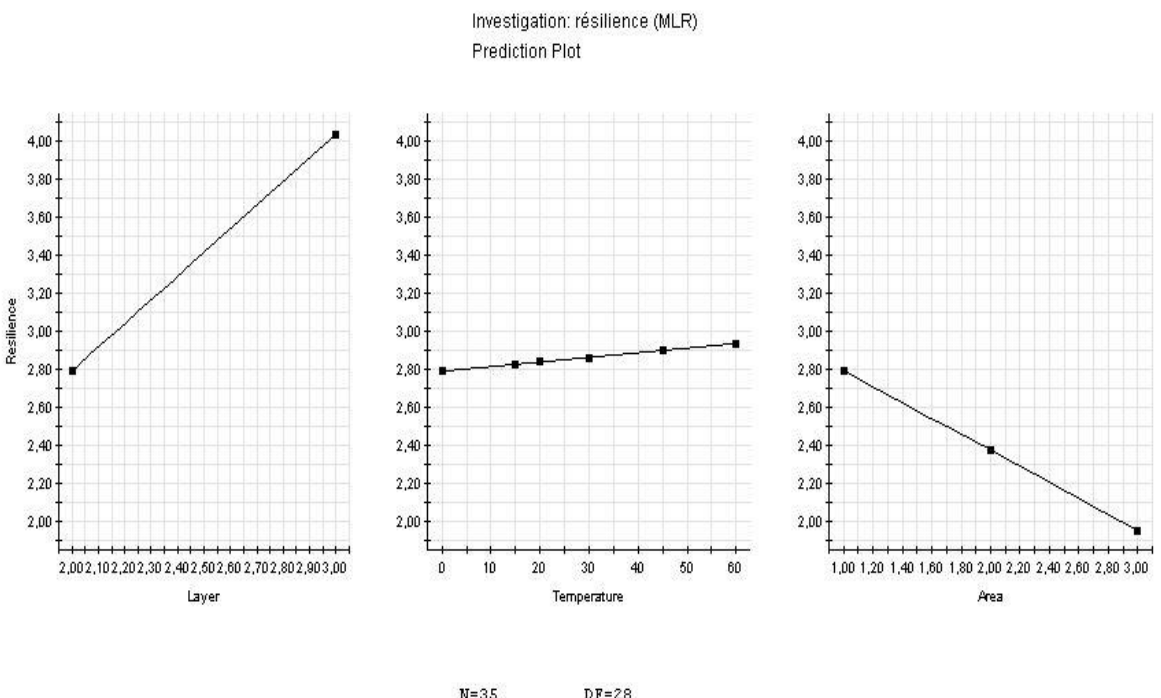


Figure 5.10 : Cas minimal (low Value)

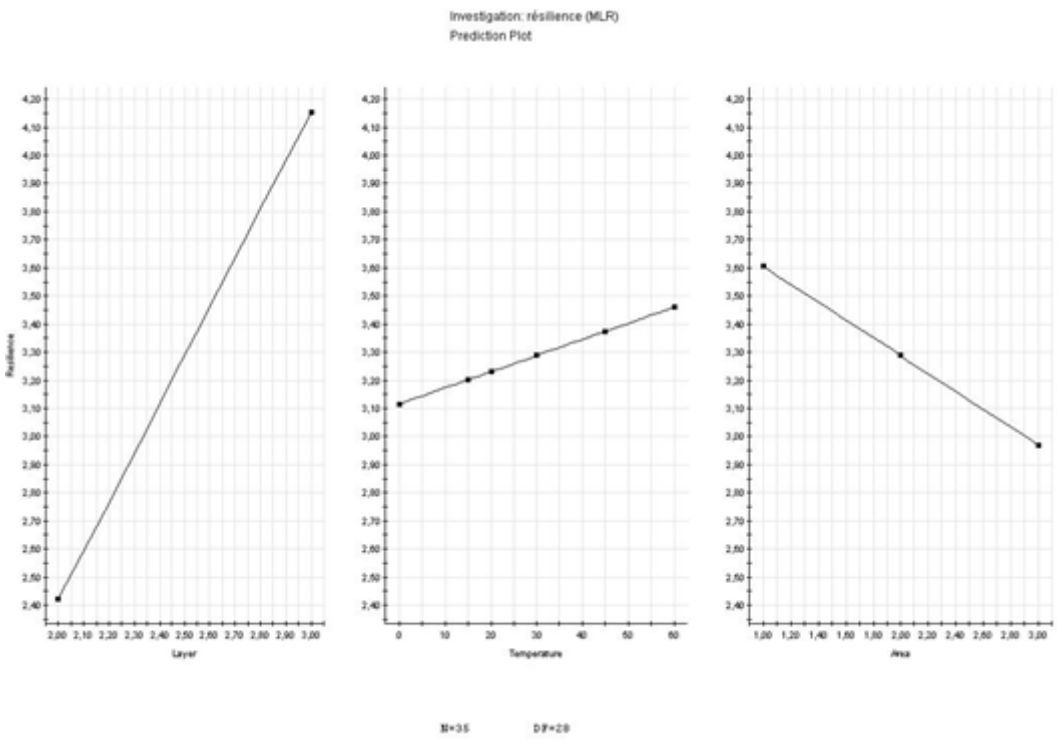


Figure 5.11 : Cas moyen (Center Value)

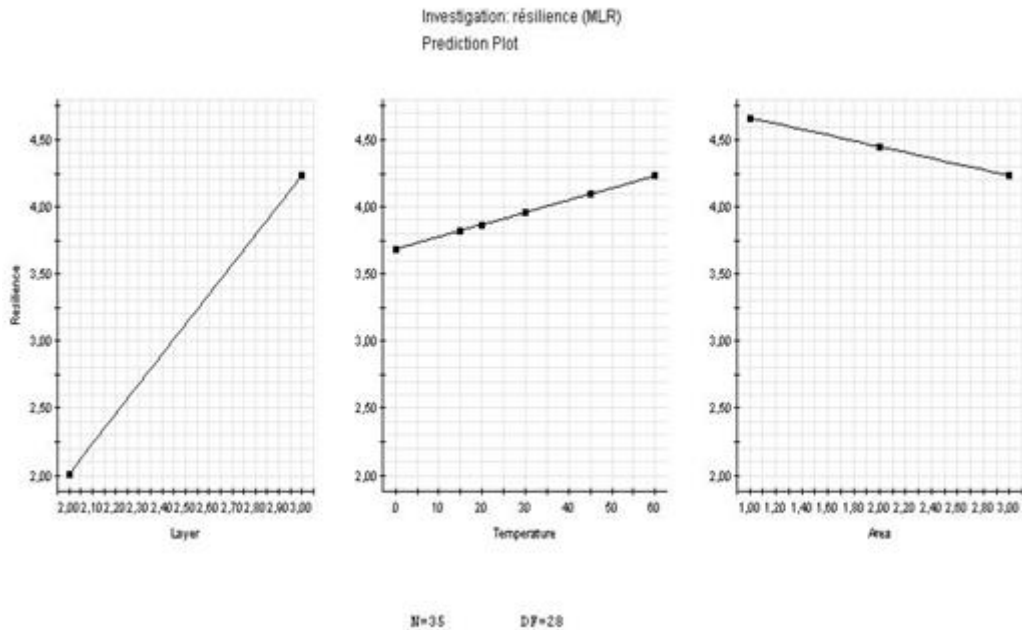


Figure 5.12 :Cas maximal (High Value)

Les graphes précédents montrent l'action de chaque paramètre sur la résilience lorsque les 2 autres sont maintenus constants (3 premiers : valeurs minimales, 3 seconds : valeurs moyennes, 3 derniers : valeurs maximales).

En comparant les graphes, on constate que l'allure et la forme des graphes qui restent identiques ; donc en passant de la valeur minimale à la valeur maximale, une épaisseur plus importante augmente la résilience et une température plus élevée augmente également la résilience, mais les changements de la zone d'impact de 1 vers 2 puis 3 diminuent quant à eux la résilience.

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

La comparaison des 3 graphes de l'action de l'épaisseur sur la résilience permet un constat aisé : si l'en prend les valeurs moyennes des 2 paramètres (températures et zones), l'action sur l'augmentation de la résilience est plus évidente, suivie par celle des valeurs maximales et enfin des valeurs minimales. Il en de même pour l'action de la température ou le même ordre régressif est suivi.

De même, le maintien de la température et de l'épaisseur à leurs valeurs moyennes permet une diminution de la résilience avec un changement de la zone 1 à 3 plus prépondérant qu'avec leurs valeurs minimales puis leurs valeurs maximales.

L'action simultanée de l'épaisseur de l'éprouvette et de la température sur la résilience du métal de base est représentée dans les figures 5.13 et 5.14 :

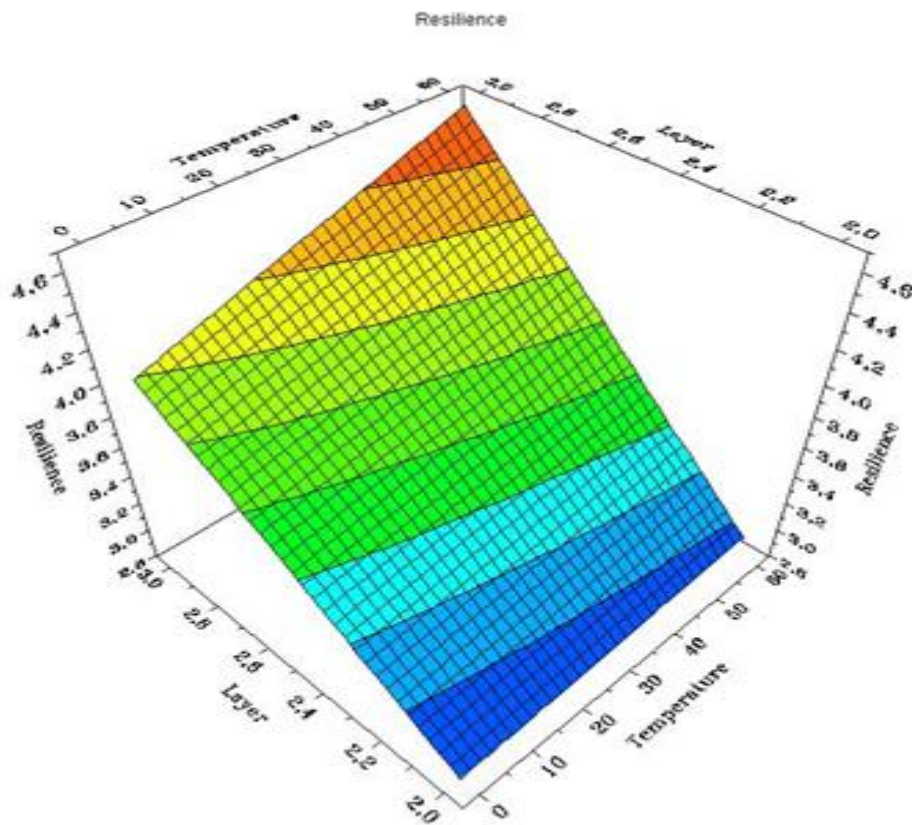


Figure 5.13 : Surface de réponses

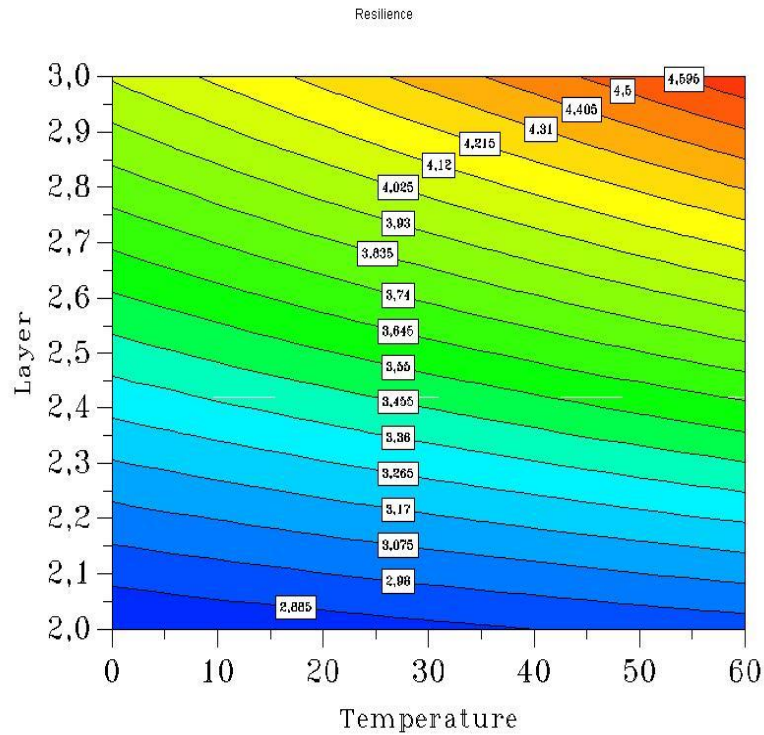


Figure 5.14 : Contours de réponses

En analysant la surface de réponses (figure 5.13) et les contours de réponses (figure 5.14), on s'aperçoit qu'en augmentant l'épaisseur de 2 à 3, la résilience augmente rapidement car plusieurs zones et contours sont traversés. Le passage de 0 °C à 60 °C entraîne une augmentation minimale de la résilience (contours couchés presque horizontaux) surtout au dessous d'une épaisseur de 2,5 mm de l'éprouvette. Ceci montre la prépondérance du paramètre épaisseur sur le paramètre température (vérifié par le modèle mathématique). L'augmentation simultanée de l'épaisseur et de la température augmente visiblement la résilience et cela dépend uniquement de l'action d'un des 2 paramètres par rapport au 2ème.

L'action simultanée de l'épaisseur de l'éprouvette et de la température sur la résilience de la ZAT est représentée dans les figures 5.15 et 5.16 :

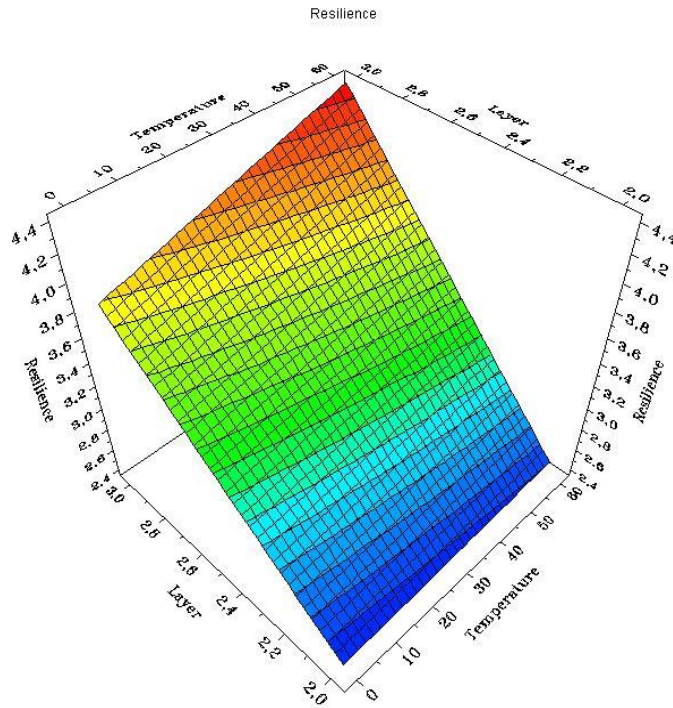


Figure 5.15 : Surface de réponses

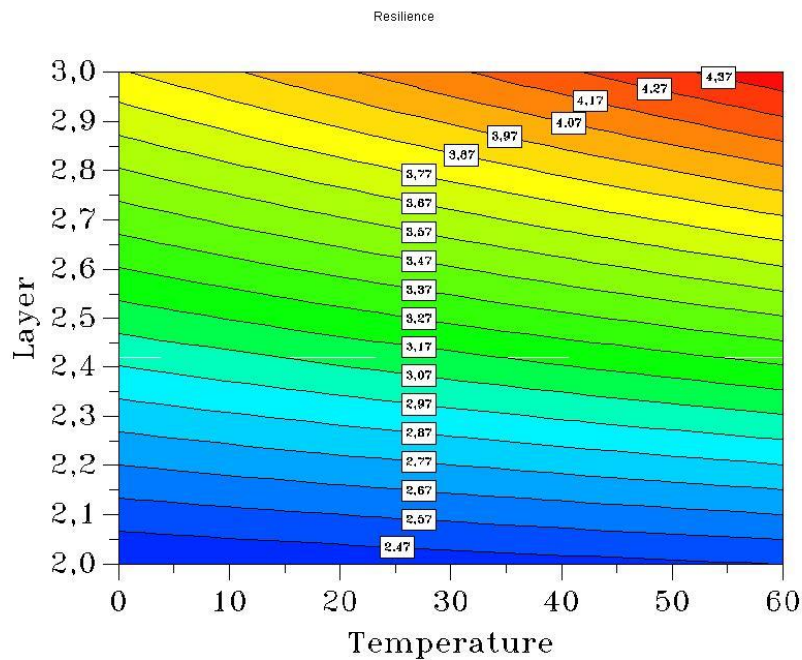


Figure 5.16 : Contours de réponses

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

beaucoup plus couchés que le métal de base : on en conclut que l'influence de l'épaisseur est moindre que dans le 1^{er} cas.

L'action simultanée de l'épaisseur de l'éprouvette et de la température sur la résilience de la zone fondue est représentée dans les figures 5.17 et 5.18 :

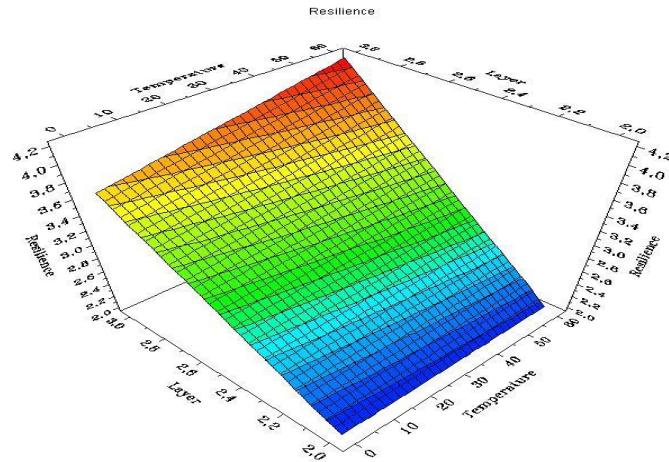


Figure 5.17 : Surface de réponses

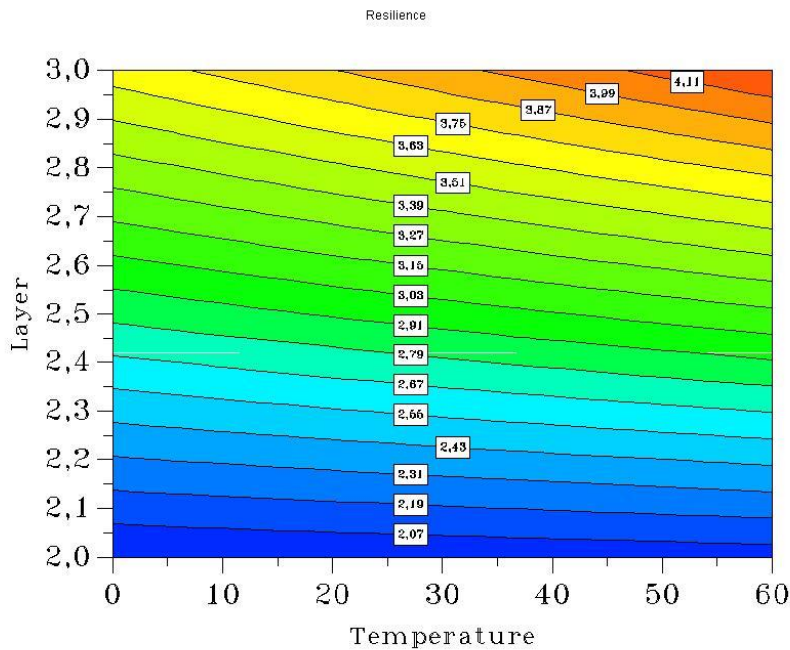


Figure 5.18 : Contours de réponses

Pareillement, la même forme et la même allure de la surface et des contours est obtenue. On constate également que la résilience suit la même régression que dans les cas précédents. Donc la zone fondue résiste moins aux chocs que le métal de base et la ZAT. Le pseudo horizontalité des contours au dessous de 2,5 mm d'épaisseur montre qu'à faibles épaisseurs l'effet de la température est minime.

De cette étude, on conclut que :

- L'effet simultané des 3 paramètres ne peut pas être montré et illustré par un graphique, seule l'équation polynomiale (modèle) donnant un résultat,
- La prédiction de toute valeur de la résilience peut se faire dans le domaine d'expérience même en cas de non réalisation des expériences.

Cette partie numérique ne fait que confirmer d'une manière globale, les résultats obtenus lors de nos différentes expériences. De la même manière, les profils de dureté suivent approximativement des variations identiques. Aussi, et quelle que soit la vitesse de soudage utilisée, l'augmentation de la dureté est régulière surtout à l'approche de la ligne de fusion.

CONCLUSION GENERALE

Dans le cadre de notre étude, nous nous sommes intéressés aux alliages d'aluminium 7075 T6. Ces alliages contiennent Zn, Mg et Cu comme principaux éléments d'addition.

La première partie de notre recherche bibliographique a montré qu'il est nécessaire de connaître l'évolution de leurs propriétés d'une manière intégrée tout au long du processus d'élaboration. Ces propriétés mécaniques sont en partie liées à la nature et à la proportion des éléments de ces alliages qui les composent, et à leur caractère à favoriser soit la formation et la répartition des phases α et β , soit à précipiter de nouveaux composés souvent durcissant.

La deuxième partie de notre recherche bibliographique a montré que ces alliages sont dans l'ensemble difficilement soudables car d'une part, ils sont sujets aux criques lors de la solidification de la soudure et d'autre part, leurs caractéristiques mécaniques après soudage sont fortement diminuées. Cependant, l'utilisation du procédé de soudage TIG peut améliorer certains de ces résultats.

Le soudage de notre alliage d'aluminium conduit à des changements microstructuraux. Ces derniers sont liés aux cycles thermiques caractérisés par un passage de l'état solide à l'état liquide et inversement, au refroidissement et aux traitements thermiques qui peuvent être réalisés ensuite.

Dans le but de contribuer à l'évaluation de la qualité de notre assemblage soudé, de caractériser l'interaction entre notre alliage et le procédé de soudage TIG, et de fournir des données quantitatives sur le comportement de cet assemblage soudé, nous avons utilisé durant cette thèse les essais mécaniques suivants :

- Résilience,

Dans la dernière partie de notre travail, nous avons procédé à une simulation numérique de nos résultats expérimentaux. On utilise les plans des expériences pour l'essai de résilience.

De cette méthode des plans des expériences, on conclut que :

- La variation de l'épaisseur agit beaucoup plus que la variation de la température dans l'augmentation de la résilience,
- Le maintien de la température et de l'épaisseur à leurs valeurs moyennes permet une diminution de la résilience,
- En augmentant l'épaisseur de l'éprouvette, la résilience augmente rapidement car plusieurs zones et contours sont traversés. Le passage de 0 °C à 60 °C entraîne une augmentation minimale de la résilience,
- La zone fondue résiste moins aux chocs que le métal de base et la ZAT,
- La prédiction de toute valeur de la résilience peut se faire dans le domaine d'expérience même en cas de non réalisation des expériences.

Références

1. A.Deschamps, Thèse de doctorat, Influence de la prédéformation et des traitements thermiques sur la microstructure et les propriétés mécaniques des alliages Al-Zn-Mg-Cu, 1997
2. J.Lanthony, Aluminium et alliages légers, Ed. Presses universitaires de France, Paris, pp 55, 1984
3. J.Barralis et G.Maeder, Métallurgie, élaboration, structures-propriétés, normalisation, Afnor, Edition Nathan, septembre 2004
4. R.Develay, Propriétés de l'aluminium et des alliages d'aluminium corroyés, ENS d'électrochimie et d'électrometallurgie de Grenoble, 1996
5. A.Dhooge, Techniques d'assemblage : le soudage ; Métallerie 65, spécial soudage, avril 2004
6. Rocardier, Cours technologie, Cours de soudure TIG, 2009
7. M.G.Vigier, Pratique des plans d'expérience, les éditions d'organisation, pp 190, 1988
8. Jacques Goupy, Plans d'expériences pour surfaces de réponse, Edition Dunod, 2001
9. American Supplier Institute, Inc, Orthogonal arrays and linear graphs, ASI, 1987