

République Algérienne Démocratique et Populaire.
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de La Recherche Scientifique.
Université SAAD DAHLAB De Blida.
Faculté des sciences et Technique.
Département d'Aéronautique.

PROJET DE FIN D'ÉTUDE
EN VUE DE L'OBTENTION DE DIPLOME MASTER EN
AERONAUTIQUE.

Option : Construction Aéronautique.
Spécialité : Structure.

THEME
ETUDE DE SOUDABILITE TIG ET SIMULATION
D'UN ALLIAGE D'ALUMINIUM
AERONAUTIQUE.- 2024 .T351-

Réalisé Par :

SASSOUI Adel.
BENSADALLAH Djallel.

Encadré par :

Promoteur: Mr. ALLALI Abderrazak.
Copromoteurs : Mme.TAHAR-CHAOUCH
Karima.
Mr.ABADA Mourad.

Dedicaces

*Je dédie ce travail à mes chers parents : ma
mère, mon père pour leur amour,
encouragements, et sacrifices
A mes très chers frères et soeurs,
A toute la famille BENSSADALLAH
A tous mes amis d'Alger(TCHWALEK), Blida
Et du Bloc 02(chialla et P40.....)
A mon binôme Adel que j'apprécie
beaucoup ainsi qu'à toute sa famille
A tous ceux et celles dont les noms ne sont
pas cités*

Djallel.

Dedicaces

Je dédie ce modeste travail à mes parents, mes freres(Hichem...),mes sœurs, ma famille, mes amis de Tolga ,Alger, mon promoteur et mes encadreurs à tous ceux qui m'ont aidé de près ou de loin.

Je dédie ce travail aussi à tous les amis du Bloc02(Djallel²,...)et à tous ceux et celles qui m'ont connus et que j'ai connus.

Adel.

Résumé

Les constructeurs apprécient l'aluminium pour sa légèreté et ces qualités mécaniques. Lors du processus de soudage en TIG d'aluminium, 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 du cordon de soudure. La caractérisation de la microstructure, en raison de la diversité de ses composants, en termes de taille et de nature, nécessite l'utilisation de plusieurs techniques à savoir l'utilisation de la microscopie optique pour des approches locales, l'indexation des phases par diffraction (RX) pour des approches globales. Elle nécessite aussi l'utilisation des essais de traction et de résilience afin d'évaluer la qualité de la soudure, de caractériser l'interaction entre le matériau et le procédé de soudage et de fournir des données quantitatives sur le comportement des assemblages soudés.

Abstract

Constructors appreciate the aluminum for its lightness, its mechanical qualities and its ecological character. The high quality of its surface, once stripped or anodized, gives it a great advantage.

During the process of TIG welding of our material, a temperature gradient is created between the base metal and the melted zone. Thus, changes of the gradient of temperature are going to engender metallographic structures and diverse mechanical characteristics in various different zones forming the cordon of weld.

The characterization of the microstructure, because of the diversity of its components in terms of size and nature, requires the use of multiple techniques of investigations such as the use of optical microscopy for local approaches, and indexing diffraction phases (RX) for global approaches.

It also requires the use of the tensile test and the impact strength test to assess the quality of the weld, to characterize the interaction between the material and the welding process, and to provide quantitative data on the welded joints behavior.

معالجته المصعدية تعطيه ميزة إضافية. يقدرن الألمنيوم لخصته لمزاياه الميكانيكية ولطبعه البيئي . العالية لسطحه كسطه

عملية	TIG	ينشأ	المنصهرة
تغيرات		تركيبات ميتالوجرافية ومزايا ميكانيكية	
لشريط		التركيبية المجهرية، حيث والطبيعة	تحديد مزاياها يتطلب
تقنيات للتحقيق		المجهر	فهرسة .
		ه يتطلب أيضا	لتقييم
		وتوفير معطيات كمّية	التجميعات
			(RX) تحديد مزايا

Remerciements

*Nous tenons à adresser nos sincères remerciements à notre promoteur **Mr ALLALI Abderrazak** et Copromoteurs **Mr. ABADA Mourad ,Madame TAHAR-Chaouch Karima** qui a su nous conseiller par ses critiques constructives et nous guider dans notre modeste travail*

Nous remercions également les membres du département d'Aéronautique qui nous ont assuré l'environnement adéquat afin de réaliser notre travail.

*Nos remerciements vont aussi à tout ceux et celles qui ont participé de près ou de loin à l'élaboration du présent travail : **MIMOUNI Oussama, SASSOUI Hichem.***

Nos sentiments de profonde gratitude vont à nos professeurs qui tout au long des cinq années d'étude nous ont transmis leur savoir sans réserve.

Enfin, nous tenons à remercier tous nos amis et collègues pour leur soutien moral tout au long de la préparation de ce projet.

Le binôme Adel & Djallel .

SOMMAIRE

Résumé	
Dédicaces	
Remerciements	
Sommaire	
Liste des tableaux	
Liste des figures	

Introduction générale..... Erreur ! Signet non défini.

Chapitre I : Etude bibliographique.....	3
I .1.Généralité sur l'Aluminium	3
I .2.Généralités sur le soudage	14
Chapitre II : Matériaux et procédures expérimentales	27
II .1.Préparation des échantillons pour le soudage.....	27
II .2.Opération de soudage	28
II .3.Opération de la micrographique	34
II .4. Méthodes d'essais mécaniques	36
Chapitre III : Interprétation des résultats	50
III .1.Introduction	50
III .2.Observation micrographique :	50
III .3. L'essai de microdureté	50
III .4.Essais de résilience	53
III .5.L'essai de traction	54
III .6. Essais d'AMD	55
III .7.Diffraction des rayons x	58
Chapitre IV : Simulation numérique	62
IV .1.Introduction.....	62
IV .2.La source de chaleur	63
IV .3 Les composantes d'un logiciel de modélisation et de simulation numérique.	65
IV .4. Le maillage	65

IV .5.Objective de travail	65
IV .6.Hypothèses principales	66
IV .7.Les étapes de la simulation	67
IV .8.Discutions des résultats	77
Conclusion général	80

Liste Des Tableaux :

Chapitre I :

Tableau I.1 : Quelques caractéristiques mécaniques de l'aluminium	5
Tableau I.2 : Désignation des alliages de corroyage	7
Tableau I.3 : Quelques propriétés mécaniques de l'alliage 2017 et 2024 non recristallisés	9
Tableau I.4 : Composition chimique nominale de l'alliage 2024	9
Tableau I.5 : Désignation américaine	10
Tableau I.6 : Désignation française	11
Tableau I.7 : Désignation des méthodes d'obtention et états de livraison	11

Chapitre II :

Tableau II.1 : Conditions de soudage	31
Tableau II.2 : Paramètre de soudage	32
Tableau II.3 : Paramètre de l'essai de traction	38

Chapitre III :

Tableau III.1 : Résultat de microdurte	51
Tableau III.2 : Résultat de l'essai de résilience	53
Tableau III.3 : Résultat de la manipulation	54
Tableau III.4 : Tableau donné par logiciel d'analyse	60
Tableau III.5 : Indice de Miller et le réseau cristallin de l'Au4G	60

Chapitre IV :

Tableau IV.1 : Propriétés de matériaux utilisés	66
---	----

Liste Des Figures

Chapitre I :

Figure I.1 : Principaux states de fabrication de l'aluminium	Erreur ! Signet non défini.
Figure I.2 : Influence de la chaleur sur les propriétés d'alliages de l'aluminium	12
Figure I.3 : Transfert d'énergie en procédé TIG	16
Figure I.4 : Profil longitudinal et transversal de la flamme TIG	16
Figure I.5 : Principe de l'application de la torche du procédé de soudage TIG	17
Figure I.6 : Forme des électrodes pour soudage TIG	17
Figure I.7 : Procédés de soudage selon les différentes sources d'énergie	18
Figure I.8 : Variété de microstructures dans un cordon de soudure TIG	20
Figure I.9 : Forces et courants de convection dans le bain de fusion de soudage TIG	21
Figure I.10 : Représentation schématique de la vitesse de croissance en fonction de la vitesse de soudage dans un bain de fusion bi elliptique	22
Figure I.11 : Exemple de manques de pénétration	24
Figure I.12 : Exemple de fissure à froid	25

Chapitre II :

Figure II.1 : Guillotine	27
Figure II.2 : Préparation de chanfrein de forme V	28
Figure II.3 : Poste de soudage TIG	28
Figure II.4 : Torche utilise pour le soudage TIG	29
Figure II.5 : Plaque brute d'aluminium 2024 T351 (épaisseur = 2 mm)	30
Figure II.6 : Plaque d'aluminium 2024 T351 prête pour le soudage (épaisseur = 2mm).....	30
Figure II.7 : Premières étapes du procédé de soudage TIG	30
Figure II.8 : fixation de deux tôles entre eux avec des points de soudure	31
Figure II.9 : plaque soudée	32
Figure II.10 : la penetration de la soudure sur la plaque	32
Figure II.11 : Enrobeuse	34
Figure II.12 : Talons de soudure enrobe par la résine ep2 mm	34
Figure II.13 : Polisseuse	35
Figure II.14 : 1 ^{er} Etape de Polissage	35
Figure II.15 : 2 ^{eme} Etape de Polissage (finition)	35
Figure II.16 : Après polissage cordant de soudure enrobe par la résine ep2 mm	36
Figure II.17 : microscope optique	36
Figure II.18 : Machine de traction de marque Instron	37
Figure II.19 : Eprouvettes pour Essai de Traction ep (20/10) mm	37

Figure II.20 : Eprouvette au cours l'essai de Traction ep 2 mm	38
Figure II.21 : Eprouvette normalisée avec une entaille de forme V	39
Figure II.22 : Pendule mouton Charpy PSW	39
Figure II.23 : Caractéristiques de l'essai de microdureté	Erreur ! Signet non défini. 0
Figure II.24 : L'appareil de microdureté	41
Figure II.25 : Empreinte de pénétrateur	41
Figure II.26 : L'analyseur mécanique dynamique (AMD) 242 C de la société NETZSCH ..	42
Figure II.27 : Les composantes d'un AMD	43
Figure II.28 : Déphasage / entre contrainte et déformation d'un matériau viscoélastique.	43
Figure II.29 : Organisation tri périodique d'un cristal	46
Figure II.30 : Démonstration de la loi de Bragg	47
Figure II.31 : Schéma de l'installation de l'appareillage de diffraction des rayonsX	48
Figure II.32 : Le diffractomètre SIEFERTXRD3003TT du laboratoire	48

Chapitre III :

Figure III.1 : Résultat d'observation micrographique	50
Figure III.2 : Microdureté de l'échantillon soudé	51
Figure III.3 : Evolution de la dureté de l'échantillon soudé	52
Figure III.4 : 1 ^{er} courbe de traction	54
Figure III.5 : 2 ^{eme} courbe de traction	54
Figure III.6 : Echantillon soudée après l'essai d'AMD	55
Figure III.7 : Résultat de l'échantillon soudé	55
Figure III.8 : Module conservatif en fonction de la température à différentes fréquences de sollicitations	56
Figure III.9 : Module de perte en fonction de la température à différentes fréquences de sollicitations.	56
Figure III.10 : Déphasage (facteur de perte ou amortissement) à différentes fréquences de sollicitations en fonction de la température	56
Figure III.11 : Flèche de la flexion en fonction de la température	57
Figure III.12 : Spectre de diffraction des rayons X de l'échantillon Al 2024(1)	59
Figure III.13 : Spectre de diffraction des rayons X de l'échantillon Al 2024(2).....	59

Chapitre IV

Figure VI.1 : Exemple de modèles de source volumiques	Erreur ! Signet non défini.
Figure VI.2 : Ouverture d'une nouvelle fenêtre.....	67
Figure VI.3 : Etape de manipulation	67
Figure VI.4 : Avant le choix de fichier texte	68

Figure VI.5 : Le choix de fichier texte	68
Figure VI.6 : Le résultat de la manipulation	69
Figure VI.7 : Maillage de la plaque sur le plan (x y)	69
Figure VI.8 : Vue de profile sur le maillage	69
Figure VI.9 : Déplacement de température entre les nouds	70
Figure VI.10 : Choix de solution nodal	70
Figure VI.11 : Choix de température nodal	71
Figure VI.12 : Le nombre des nouds max et min	71
Figure VI.13 : L'exécution de la solution	71
Figure VI.14 : 1 ^{er} étape déplacement de température	72
Figure VI.15 : Déplacement de température (étape de transition)	72
Figure VI.16 : Dernière étape de déplacement de température	72
Figure VI.17 : Déplacement de température sur le cordon de soudure	73
Figure VI.18 : Déplacement de température en 2D	73
Figure VI.19 : Gradient de température suivant l'axe x :(1 ^{er} etape)	74
Figure VI.20 : Gradient de température suivant l'axe x (étape de transition)	74
Figure VI.21 : Gradient de température suivant l'axe x :(dernière étape)	74
Figure VI.22 : Gradient de température	75
Figure VI.23 : Flux de températur suivant l'axex(1 ^{er} etape)	75
Figure VI.24 : Flux de temperatur suivant l'axe x(étape de transition)	76
Figure VI.25 : Flux de temperatur suivant l'axe x(darnière étape)	76
Figure VI.26 : Flux de temperatur suivant l'axe x(darnière étape)	77
Figure VI.27 : Représentation de déplacement de la source de chaleur à T=0.080001.....	78
Figure VI.28 : Représentation de déplacement de la source de chaleur à T=0.280001.....	78
Figure VI.29 : Représentation de déplacement de la source de chaleur à T=0.580001.....	78
Figure VI.30 : Représentation de déplacement de la source de chaleur à T=0.780001.....	79

Liste des symboles et des abréviations :

MB : Métal de base.

ZFP : Zone de fusion partielle.

ZAT : Zone affectée thermiquement.

ZF : Zone fondue.

Al : Aluminium.

Zn : Zinc.

Mg : Magnésium.

Cu : Cuivre.

Ep. : Epaisseur.

 : Conductivité thermique.

T : Température.

t : Temps.

V_s : Vitesse de la soudure.

 : Angle entre la direction de soudage et la direction de croissance des cristaux.

d : Distance réticulaire.

 : Angle d'incidence des rayons X.

n : Ordre de la diffraction.

A_v : énergie absorbée.

A_{VK} : énergie absorbée de compensation.

H : La dureté.

HV : Dureté Vickers.

E : module élastique.

E : module de perte.

 : facteur de perte.

d : distance entre deux plans réticulaires consécutifs.

λ : longueur d'onde.

U: Tension de soudage (V).

I : Courant de soudage (A).

 : Rendement thermique de l'arc.

C_p : Chaleur massique à pression constante [J/kg K°].

K : Conductivité thermique [W/m K°].

ρ : Masse volumique [Kg/m³].

q : source de chaleur.

σ : L'écart type de la gaussienne.

Introduction générale :

Dans le cadre de cette étude, une analyse d'un alliage d'aluminium 2024 sera élaborée. Ce alliage, qui contient Cu et Mg comme principaux éléments d'addition, possède de bonnes caractéristiques mécaniques et bénéficie d'un bon durcissement structural, via une décomposition complexe faisant intervenir aussi bien des phases stables que métastables. son utilisation dans le domaine de l'industrie aéronautique est de plus en plus fréquents.

Les constructeurs apprécient ce alliage pour sa légèreté, sa qualité mécanique.

La haute qualité de surface, une fois décapée ou anodisé, donne un atout supplémentaire. En effectuant une étude approfondie des transformations de phase et son comportement mécanique.

Lors du processus de soudage en TIG du 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 du cordon de soudure. La caractérisation de la microstructure, en raison de la diversité de ses composants en termes de taille et de nature, nécessite l'utilisation de plusieurs techniques à savoir l'utilisation de la microscopie optique et l'indexation des phases par diffraction (RX) pour des approches globales. Elle nécessite aussi l'utilisation des essais de traction et de résilience afin d'évaluer la qualité de la soudure, de caractériser l'interaction entre le matériau et le procédé de soudage, et de fournir des données quantitatives sur le comportement des assemblages soudés.

Bien que les microstructures du matériau, résultant du procédé du soudage en TIG, soient maintenant maîtrisables, le détail des mécanismes aboutissant à leur formation, ainsi que la relation entre elles et les propriétés mécaniques du cordon de soudure ne sont pas encore maîtrisés. D'où la constatation que ce matériau est difficilement soudable et que le principal moyen d'assemblage, comme par exemple dans les différentes structures du transport aérien, reste toujours le rivetage. Par conséquent, le but de notre étude est de bien comprendre ces différentes microstructures caractérisées et le comportement mécanique du cordon de soudure.

Introduction générale.

Cette étude comporte 4 chapitres, qui sont :

- Introduction générale.
- **Chapitre I :** Dans ce chapitre une recherche bibliographique sur l'aluminium et les différents alliages et leur utilisation dans le domaine aéronautique avec une approche générale sur le procédé du soudage en TIG est élaborée.
- **Chapitre II :** Dans ce chapitre on étudie le comportement expérimental du procédé de soudage en TIG et le comportement d'alliage d'aluminium.
- **Chapitre III :** Dans ce chapitre une interprétation des résultats des essais mécanique est élaborée.
- **Chapitre IV :** Ce chapitre englobe une simulation numérique de déplacement de température sur les surfaces de les plaques soudée.

- Une conclusion générale.

Chapitre I :

Etude bibliographique.

Chapitre II:

Matériaux et procédures
expérimentales.

Chapitre III :

Interprétation des résultats.

Chapitre IV :

Simulation numérique.

Introduction Générale.

Conclusion Générale.

I.1.Généralités sur l'Aluminium :

I.1.1.Historique d'Aluminium [1] :

L'aluminium est le métal industriel le plus récemment découvert puisqu'il n'est utilisé que depuis la fin du XIX^e siècle. En 1825 Hans Christian Oersted obtient l'aluminium à l'état de corps simple, sous forme de poudre grise avec une très grande quantité d'impuretés. En 1827, Friedrich Woehler obtient cette même poudre grise d'aluminium contenant cependant moins d'impuretés.

Ce n'est qu'en 1854 qu'Henri Sainte-Claire Deville présente le premier lingot d'aluminium obtenu, à l'état fondu, par un procédé mis en application en 1859. L'aluminium a connu en un peu plus de cent ans une croissance prodigieuse, le mettant au premier rang des métaux non ferreux et au deuxième de tous les métaux, derrière le fer. On en a consommé, dans le monde, 13 tonnes en 1886 et 30 millions de tonne en 2005. C'est l'élément métallique le plus abondant sur la terre, avec son pourcentage massique entre 8 et 10 %, alors que le fer ne représente que 5 %, le magnésium 2.1 %, le titane 0.4 % et le cuivre 0.01 %.

Le premier alliage d'aluminium fut inventé par Alfred Wilm, chimiste allemand, en 1908. Cet alliage d'aluminium contenant du cuivre et du magnésium fut exploité par les usines de Düren et fut baptisé l'aluminium de Düren, le «Duralumin ». C'est un alliage à « durcissement structural » par traitement thermique, phénomène découvert par Conrad Claessen en 1905. C'est aujourd'hui le 2017 A, autrefois appelé en France l'A-U4G.

Le second alliage d'aluminium fut découvert en 1920 par le hongrois Aladar Pacz, émigré aux Etats-Unis ; c'est un alliage d'aluminium avec 13 % de silicium affiné au sodium, baptisé l'« Alpax », alliage dévolu au moulage et autrefois appelé en France l'A-S13. [1]

I.1.2.Obtention de l'aluminium [2] :

I.1.2.1.La Bauxite :

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

I.1.2.2.L'alumine :

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

I.1.2.3. L'aluminium :

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

I.1.2.4. Principaux stades et flux dans la fabrication de l'aluminium :

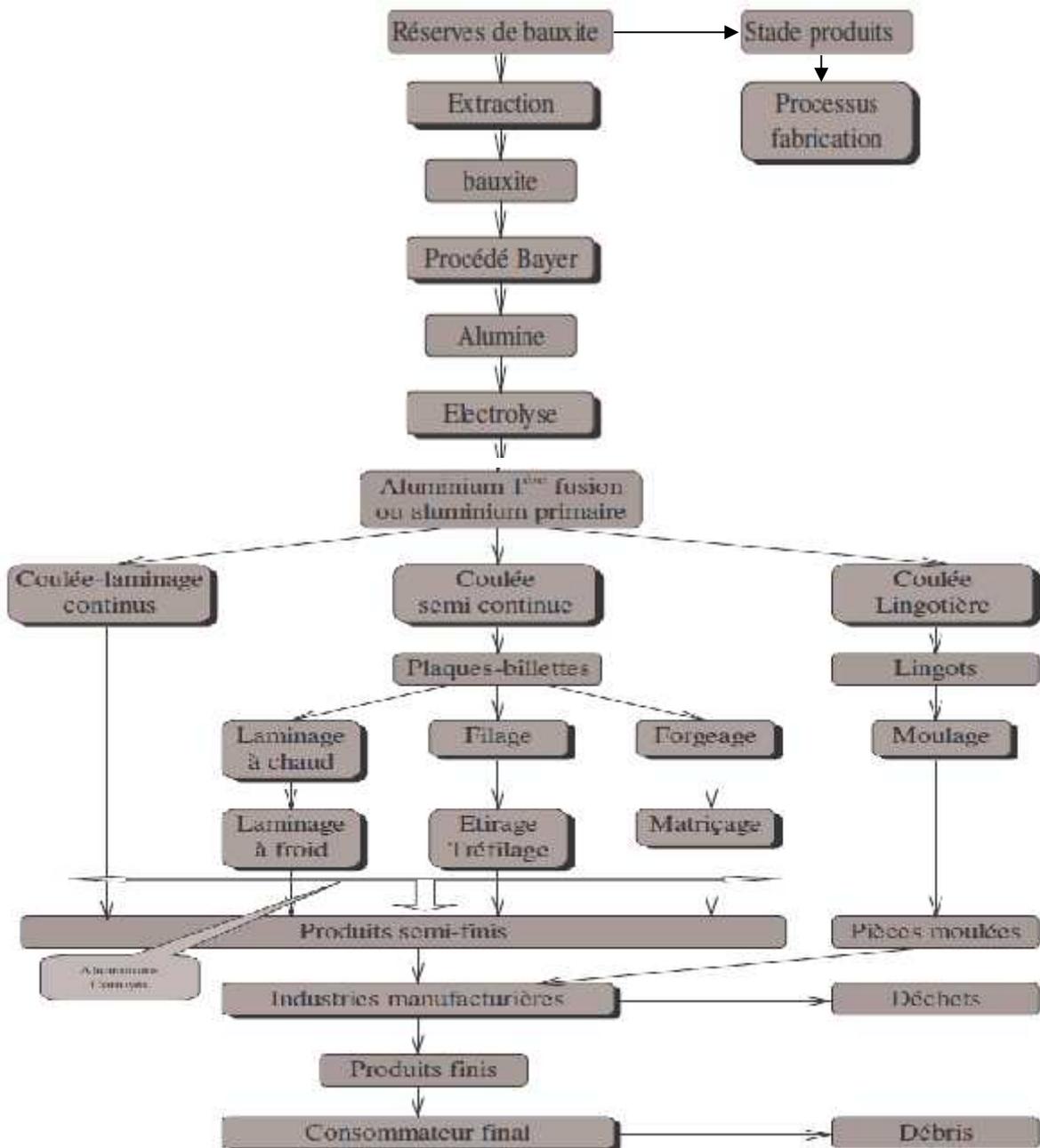


Figure I.1 : Principaux étapes de fabrication de l'aluminium.

I.1.2.5. Quelques Chiffres :

- Pour obtenir un tonne d'aluminium, il faut :
- 1900 kg d'alumine.
- 380 kg de coke.
- 100 kg de brai.
- 15 kg de produits cryolithiques.
- 13000 kWh sous forme électrique.

I .1.3.L'aluminium [2] :

Structure : C'est un métal de type cubique à faces centrées très malléable.

I .1.3.1.Principales Propriétés :

- Bon conducteur de la chaleur et de l'électricité.
- Faible masse volumique : $2,7 \text{ kg/dm}^3$.
- Point de fusion : 658° C .
- Faible module d'Young : 70000 MPa .
- Le coefficient de rigidité par unité de masse est sensiblement égal à celui de l'acier.
- Faible limite élastique.
- Fort allongement à la rupture (tôles minces, feuilles, papier)

La résistance à la corrosion est bonne à condition que la couche d'alumine soit formée car ensuite elle empêche la corrosion de pénétrer dans l'aluminium.

Par contre l'association avec un métal plus électropositif (acier, alliages de cuivre) détruit la couche d'alumine qui ne peut donc plus protéger l'aluminium.

I .1.3.2.Emploi :

L'emploi de l'aluminium est surtout motivé par sa **faible masse volumique** (le tiers de celle de l'acier et du cuivre).

C'est un matériau qui se moule bien. Il est aussi utilisé dans l'industrie électrique grâce à sa bonne conductibilité (677 % de celle du cuivre).

L'aluminium est employé aussi comme isolant thermique.

I .1.3.3.Caractéristiques Mécaniques :

Tableau I.1 : quelque caractéristique mécanique de l'aluminium.

Caractéristiques mécaniques	Coulé	laminé recuit
Résistance traction. (N/mm)	270 à 100	70 à 90
Limite app d'elast.(N/mm)	230 à 40	30 à 40
Allongement(%)	15 à 25	40 à 30
Dureté Brinell.	15 à 25	15 à 25
Module d'élasticité. (N/mm)	2 67500	67500

L'allongement à l'état recuit (amélioré à chaud) permet d'utiliser les procédés de laminage, forgeage.

La pureté du métal joue un rôle essentiel car plus le métal est pur, plus la dureté, la charge à la rupture diminuent alors que l'allongement augmente.

D'où l'emploi d'éléments alliés dans l'aluminium.

Cette pureté améliore considérablement la résistance chimique du matériau.

I.1.3.4. Influence des éléments d'addition :

L'aluminium non allié ayant des propriétés très réduites, il est possible d'améliorer ses propriétés en ajoutant des éléments qui modifient plus ou moins profondément la microstructure.

Les atomes des éléments d'addition peuvent :

- Etre en solution solide de substitution : Ils prennent la place des atomes d'aluminium dans le réseau. Leur taille est plus petite ou plus grande que l'atome d'aluminium ce qui perturbe le réseau qui devient plus difficile à déformer.
- Former des précipités hors solution solide : Cohérents, semi-cohérents, ou incohérents avec la matrice d'aluminium. L'effet provoqué est le même sur la difficulté de déformation du réseau.

Le durcissement de l'aluminium sera ainsi d'autant plus conséquent que le nombre et l'importance de ces perturbations seront plus grands : La nature, la teneur, la répartition de ces éléments d'addition sont primordiales à cet égard.

Les éléments d'addition sont peu nombreux : Cuivre, silicium, magnésium, manganèse, titane et des associations magnésium + silicium, zinc + magnésium, zinc+ magnésium + cuivre.

I.1.4. Alliage, produits et procédés nouveaux [3] :

L'industrie des alliages d'aluminium contribue activement à ces réalisations et produit, dès 1928, des bandes de duralumin à épaisseurs variables obtenues par laminage. Trois ans plus tard, viennent les profilés ouverts : Cornières ou tés à section décroissante, complétés ultérieurement par des tubes à section variable. Entre-temps, les différentes catégories d'alliages à 3%,5% ou 7% de magnésium ont fait leur apparition et leur emploi se généralise dans les réservoirs, les capotages et les carénages.

I.1.4.1. Alliages léger d'aluminium :

Les alliages légers d'aluminium sont principalement utilisés dans l'industrie aéronautique, ils constituent environ 70 % des matériaux utilisés pour la fabrication des avions civils. L'aluminium peut être utilisé à différents degrés de pureté ou sous forme d'alliage, avec la plupart des métaux (cuivre, manganèse, magnésium, silicium, zinc, etc.).

Suivant le mode de transformation de ces alliages, nous pouvons distinguer :

a. Les alliages de fonderie (ou de moulage) que l'on choisit pour la fabrication de pièces à partir de l'état liquide par les procédés de coulée en sable, coulée en coquille ou coulée en cire perdue.

b. Les alliages de forge (ou de corroyage) qui sont destinés à la fabrication de pièces ou de demi-produits, par des procédés de déformation mécanique à partir de l'état solide (forgeage, matricage, laminage, tréfilage, filage, etc.).

-Parmi les alliages de forge et suivant le processus utilisé pour l'obtention des niveaux de caractéristiques mécanique, nous pouvons différencier deux familles:

***Les alliages à durcissement par écrouissage :** Le durcissement est obtenu par déformations importantes à température ambiante.

***Les alliages à durcissement par précipitation:** Des traitements thermiques (principalement trempe et revenu) provoquent des modifications de microstructure et permettent ainsi d'augmenter la limite d'élasticité.

Les alliages d'aluminium à durcissement par précipitation sont de loin les plus employés dans l'industrie aéronautique. En effet, ils possédant des caractéristique mécanique beaucoup plus élevées que les alliages à durcissement par écrouissage et conservent une ductilité importante.

I.1.5. Les alliages d'aluminium de la série 2000 [4] :

I.1.5.1. Généralités :

L'aluminium est présent en grande quantité dans la croûte terrestre, avec une masse de minerai représentant 8% de la masse de cette dernière. Cependant, il a fallu attendre la généralisation de l'électricité pour voir la production d'aluminium se développer réellement.

En effet, les procédés d'électrolyse de l'alumine, issue de la bauxite, sont relativement coûteux en énergie. A l'heure actuelle, l'aluminium est utilisé dans de nombreux secteurs comme les transports, l'emballage, la construction ou encore les biens de consommation.

Sa masse volumique est de 2700 kg/m^3 , il est 3 fois plus léger que l'acier.

Il possède une bonne conductivité électrique (environ deux tiers de celle du cuivre), et peut donc être utilisé comme câblage électrique aérien. L'aluminium et ses alliages, suivant leur composition, ont une bonne conductivité thermique (60% de celle du cuivre).

Il existe huit systèmes d'alliages dits de corroyage par opposition aux alliages de moulage en raison des produits ou demi-produits (tôle, barre...) obtenus par déformation.

Ils sont désignés de 1000 à 8000, le premier chiffre étant associé à un élément d'alliage.

Tableau I.2 : Désignation des alliages de corroyage.

Famille	Durcissement par écrouissage				Durcissement structural			
	1000	3000	5000	8000	2000	4000	6000	7000
Elément d'alliage	Aucun	Mn	Mg	Autre (Si+Fe)	Cu	Si	Mg+Si	Zn+Mg
Etendue de la tenure (%masse)		0.5-1.5	0.5-5	Si : 0.3-1 Fe : 0.6-2	2-6	0.8-1.7	Mg : 0.5-1.5 Si : 0.5-1.5	Zn :5-7 Mg :1-2
Elément d'addition	Cu	Mg, Cu	Mn, Cu	Divers	Mg		Cu, Cr	Cu
Résistance mécanique Rm(MPa)	50-160	100-240	100-340	130-190	300-480	150-400	200-320	310-600

Les alliages aluminium-cuivre (de la série 2000) sont des alliages à durcissement structural par opposition aux alliages à durcissement par écrouissage. Le cuivre donne de manière générale une bonne résistance mécanique.

Ces propriétés mécaniques viennent d'une microstructure particulière, obtenue par traitements thermomécaniques. Ces traitements thermomécaniques définissent donc les propriétés mécaniques, de ces alliages.

I.1.5.2. Microstructure et durcissement structural [5] :

Le principe du durcissement structural est basé sur la précipitation (diminution de la solubilité d'éléments d'alliage avec la température). L'élément d'un alliage de cuivre est ajouté d'une teneur de 2 à 6% de la masse. Il permet, la précipitation de phases appelées phases durcissantes, cela à l'origine des bonnes propriétés mécaniques de cette série des alliages. Le phénomène de « durcissement structural », a été découvert en 1906 par Wilm. (Exemple : le *Duralumin* en 1916 (l'alliage 2017 A)).

Il existe de nombreux protocoles de traitement thermique, désigné par la lettre T dans la nomenclature des alliages (T1 à T8).

Ce n'est donc pas un protocole particulier qui sera décrit ici mais certaines grandes étapes pouvant être suivies lors d'un traitement thermique [6] :

A /Etape de mise en solution : les pièces sont portées à une température déterminée en fonction de la nuance d'alliage d'aluminium (environ 540°C). Comme son nom l'indique, cette étape permet de mettre en solution les différents constituants solubles dans la solution solide.

B/Etape de refroidissement(ou trempe) : les pièces sont plongées rapidement dans un bac d'eau thermo régulé. Le temps de transfert et la température de l'eau sont des éléments importants pour une bonne maîtrise du processus : le refroidissement doit être suffisamment rapide pour maintenir la solution solide en sursaturation.

Il est possible d'incorporer un polymère dans l'eau afin de réduire la vitesse de refroidissement et ainsi, diminuer le risque de fissuration ou de déformation.

C/Etape de maturation et/ou de revenu : la maturation permet une évolution de la structure métallurgique à température relativement basse (souvent température ambiante). Le revenu s'opère à une température supérieure à celle de la maturation.

Le durcissement est effectif pendant cette étape.

Les traitements thermomécaniques aboutissent à une microstructure complexe composée de nombreux intermétalliques. Il est possible de les classer en trois catégories :

-e. Les précipités durcissant : Ils ont une taille allant du nanomètre jusqu'à plusieurs centaines de nanomètres. Ils sont formés lors de la trempe ou de manière contrôlée lors de la maturation ou du revenu. Il s'agit des amas d'atomes décrits précédemment ou de phases métastables issues de leur précipitation. Les mécanismes de durcissement structural sont complexes mais il est possible de retenir que ces précipités jouent le rôle de frein dans le mouvement des dislocations, en partie responsables de la déformation plastique. Ces phases doivent donc être cohérentes ou semi-cohérentes avec la matrice.

-f. Les dispersoïdes : Ils sont d'une taille variante de vingt à quelques centaines de nanomètres, et se forment par précipitation à l'état solide. Ils ne peuvent pas être complètement dissous après leur formation. Ils ne sont pas cohérents avec la matrice et ne participent donc pas directement au durcissement structural.

-g. Les particules intermétalliques sont dites « grossières » : Lorsque leur taille dépasse des dimensions de l'ordre du micromètre. Elles peuvent atteindre des tailles de l'ordre de la vingtaine de micromètres et ne participent donc pas au durcissement de l'alliage. Elles jouent en revanche un rôle important dans la sensibilité à la corrosion localisée.

I.1.5.3.L'alliage d'aluminium 2024 [5] :

L'alliage 2024 est un alliage d'aluminium, de cuivre et de magnésium. On peut noter la présence d'impuretés telles que le fer. Il fait partie des alliages de la série 2000 à haute teneur en cuivre, de l'ordre de 4% en masse, utilisés pour leurs bonnes propriétés mécaniques. Il a remplacé le 2017 ou « Duralumin » pour les applications aéronautiques, pour lesquelles il a été l'un des premiers matériaux de structure.

I.1.5.3.1.Microstructure et propriétés mécaniques de l'alliage 2024 :

Le **Tableau (I.3)** présente quelques propriétés mécaniques des alliages 2017 et 2024.

L'alliage 2024 possède de meilleures caractéristiques mécaniques que le 2017 voir (Tableau I-4). Il est intéressant de noter qu'il est le premier alliage du groupe des 2x24, avec x=1-5 représentant des teneurs en impuretés Fe et Si décroissantes.

Tableau I.3 : Propriétés mécaniques de l'alliage 2017 et 2024 non recristallisés.

Caractéristique. L'alliage.	Résistance à la rupture Rp (MPa).	Résistance mécanique. Rm (MPa).	L'allongement. A(%).
2017-T4	360	530	16
2024-T4	410	570	15

La composition nominale de l'alliage 2024 est présentée dans le Tableau I.4 :

Tableau I.4 : Composition chimique nominale de l'alliage 2024.

<i>Elément</i>	<i>Al</i>	<i>Cu</i>	<i>Mg</i>	<i>Mn</i>	<i>Fe</i>	<i>Si</i>
<i>% en mass</i>	<i>Base</i>	3.8-4.9	1.2-1.8	0.3-0.9	<_0.5	<_0.5

I .1.6.Désignation de l'aluminium et de ses alliages [7] :**I .1.6.1.Désignation Américaine: (code ALCOA)****Tableau I.5 :** Désignation Américaine.

2024		
2	0	24
Indique le groupe de l'alliage défini par le ou les constituants principaux: 1- Aluminium non allié 2- Cuivre 3- Manganèse 4- Silicium 5- Magnésium 6- Magnésium + silicium 7- Zinc	Indique une modification éventuelle de composition chimique par rapport à l'alliage d'origine: Exemple: A-U4G 0 A-U2G 1 A-U2GN 6	Correspond à la désignation commerciale de l'alliage (désignation ALCOA)

I .1.6.2.Désignation Française:

- Aluminium pur, exemple: A5 (Ancienne symbolisation NF A02-004)

A = métal de base (aluminium). 5 = indice de pureté, aluminium à 99,5% de pureté

Ou encore:

- A2 Aluminium à base titre.
- A7 Aluminium à 99.7% de pureté.
- A8 Aluminium à 99.8% de pureté.
- A9 Aluminium a 99.9% de pureté.
- A99 Aluminium a 99.99% de pureté.

- Alliage, exemple: A-U4G1:

Tableau I.6 : Désignation Française.

A	U4	G1
Métal de base. (aluminium).	Elément additif principal suivi du pourcentage réel. (4% de cuivre).	Eléments additifs secondaires, suivi du pourcentage réel. (1% de magnésium).

I .1.6.3.Désignation des méthodes d'obtention et états de livraison :

Tableau I.7 : Désignation des méthodes d'obtention et états de livraison.

Symbolisation des états de base	
<p>F: Etat tel que fabriqué.</p> <p>0: Etat recuit ou recristallisé.</p> <p>H: Etat écroui par une opération de travail à froid.</p> <ul style="list-style-type: none"> - H1: Ecrouissage seul par travail à froid. - H2: Ecrouissage suivi d'un recuit d'instauration. - H3: Ecrouissage suivi d'une stabilisation. <p>2^{eme} chiffre nuance de dureté:</p> <ul style="list-style-type: none"> - 2 nuance $\frac{1}{4}$ dur d'où H12- H22- H32 - 4 nuance $\frac{1}{2}$ dur H14- H24- H34 - 6 nuance % dur H16- H26- H36 - 8 nuance $\frac{3}{4}$ dur H18- H28 - 9 nuance ressort H19 	<p>T:Traité par traitement thermique.</p> <ul style="list-style-type: none"> - T3: Mise en solution (trempe), travail à froid, vieillissement naturel. - T4: Mise en solution (trempe), vieillissement naturel. - T5: Revenu seul. - T6: Mise en solution (trempe) + revenu. - T8: Mise en solution (trempe), écrouissage et revenu. - T10: Revenu + écrouissage.

I .1.7.Autres propriétés des alliages d'aluminium [2] :

I .1.7.1.Propriétés physiques :

Grâce à sa masse volumique $\rho=2\ 700\ \text{Kg/m}^3$, impose son utilisation dans les domaines de la construction aéronautique et du transport.

Sa conductivité thermique, $= 222\ \text{W/m.K}$.

I.1.7.2. Propriétés mécaniques :

L'aluminium, commercialement pur et ayant une faible résistance à la rupture, possède à l'état recuit des propriétés mécaniques faibles. On peut toutefois améliorer considérablement ces propriétés par l'érouissage, l'addition d'éléments d'alliage ou les traitements thermiques, selon les cas.

L'aluminium et ses alliages ont une structure cristalline cubique à faces centrées. Ils font donc preuve, à l'état recuit, d'une excellente ductilité à toute température.

I.1.7.3. Propriétés à chaud :

Les propriétés mécaniques à chaud des alliages d'aluminium diminuent lorsque la température augmente. La nature de l'alliage, la durée du maintien à chaud et la température de maintien sont les paramètres les plus sensibles.

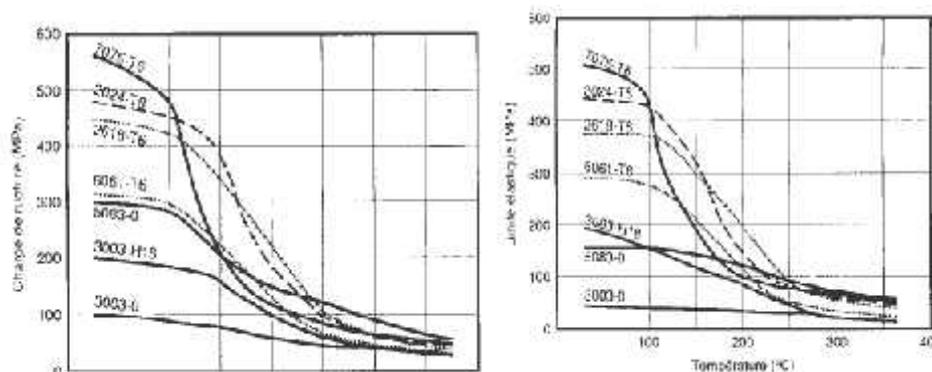


Figure I.2 : Influence de la chaleur sur les propriétés d'alliages de l'aluminium.

Selon la figure (I-2) ci-dessus on constate :

- Les alliages de la série 7000 ne conservent leur propriétés élevées que jusqu'à 100-110°C, au-delà de cette intervalle la chute est très rapide.
- Les alliages de la série 2000 présentent le meilleur comportement à chaud dans le domaine des températures qui varient entre 100 et 250°C
- Les alliages de la série 5000 à l'état recuit ont des caractéristiques relativement stables.

I.1.7.4. Propriétés chimiques :

Grâce à la couche d'oxyde qui se forme en surface, les alliages d'aluminium résistent à la corrosion. Cette couche protectrice d'oxyde est rendue plus épaisse par anodisation. Ainsi, les alliages d'aluminium peuvent alors être utilisés sans protection supplémentaire comme revêtements extérieurs de bâtiments.

Par contre, dans les milieux corrosifs, les alliages d'aluminium peuvent subir des effets négatifs. Des piqûres, de la corrosion sous contrainte, de la fatigue-corrosion, et même de la corrosion généralisée peuvent se développer. Pour des conditions données, la sévérité de l'attaque dépend de l'alliage utilisé et de son état.

I.1.7.5. Propriétés optiques :

Le pouvoir réflecteur de l'aluminium poli est excellent et varie avec la longueur d'onde. Dans le spectre visible il est de l'ordre de 85% à 90%, seul l'argent peut faire mieux. Cette propriété peut être améliorée par des traitements de surfaces comme le polissage et le brillantage, ainsi que par un titre plus élevé.

Le pouvoir émissif de l'aluminium revêtu de sa couche naturelle d'oxyde est très faible, de l'ordre de 5% du corps noir à l'état poli. Cette propriété est utilisée en isolation.

I.7.6. Propriétés électriques :

L'aluminium conduit très bien l'électricité puisqu'il se place immédiatement après le cuivre dans les métaux communs. Les impuretés et les éléments d'addition ont une influence plus ou moins importante sur la résistivité. La forme sous laquelle ces éléments sont intégrés dans la matrice d'aluminium modifie ces propriétés.

La résistivité augmente avec la température. L'aluminium devient **supraconducteur** (sa résistivité devient pratiquement nulle) près du zéro absolu.

I.7.7. Module d'élasticité :

Le module d'élasticité est égale à 66,6 GPa pour l'aluminium pur et augmente en présence d'impuretés et d'addition. D'un point de vue commercial il est admis pour 69 GPa.

Dans le cas des alliages ce module est compris entre 69 et 72 GPa. La teneur en silicium l'augmente sensiblement : de 70 à 82 GPa lorsque la teneur en silicium augmente de 2 à 18%.

Le module de torsion est de 25 GPa pour l'aluminium pur est de 26 GPa pour l'aluminium

I.1.8. Tableau de Comparaison des propriétés de ces divers alliages :

Désignations	Masse volumique (g- cm ³)	Module de Yuong (Gpa)	Limite d'élasticité (Mpa)
Aluminium	2.7	71	25 – 125
Série 2000	2.8	71	200 – 500
Série 7000	2.8	71	500- 670
Titane	4.4	120	170
Ti -6 Al 4V	4.5	115	800 - 900

Désignations	Résistance à la traction (Mpa)	Ductilité	Ténacité (Mpa n 1 /2)
Aluminium	70 – 135	0.1 – 0.5	45
Série 2000	300 – 600	0.1 – 0.25	10 – 50
Série 7000	500 – 670	0.1 – 0.17	20 – 70
Titane	240	0.25	50 – 80
Ti – 6Al 4v	900 - 1000	0.1 – 0.2	50 – 80

Désignations	Température de fusion (K)	Conductivité thermique (W – n- t,k – 1)	Coefficient de dilatation thermique (Mk – 1)
Aluminium	933	240	24
Série 2000	860	180	24
Série 7000	890	150	24
Titane	1940	22	9
Ti – 6Al 4v	1920	6	8

I.2.1.Généralités sur le soudage [8] :

Les pièces mécaniques (appareils, machines,...) sont réalisées par différents procédés : moulage, **assemblage**, formage (laminage, forgeage, estampage, ...) ou usinage (coupe des métaux). L'usinage se fait avec ou sans enlèvement de matière. L'usinage ou coupe des métaux est une opération de mise en forme d'une pièce par enlèvement de matière. Il consiste aussi à utiliser certains procédés qui ont chacun un champ d'application bien déterminé.

I.2.2.Le soudage :

La réalisation d'assemblages indémontables, en fabrication mécanique, utilise couramment les procédés de soudage. Ces techniques assurent la continuité des pièces à assembler contrairement au rivetage, sertissage, collage ou boulonnage qui présentent des discontinuités physiques ou chimiques. Au fur et à mesure de la diversification et de l'évolution des procédés, on a peu à peu utilisé le terme de soudage, désignant l'ensemble des techniques mises en œuvre pour la réalisation de soudures, plutôt que celui de soudure, désignant alors le joint par lui-même.

Le champ d'application du soudage ne se limite pas aux matériaux métalliques puisque l'on soude du verre, des céramiques ou des matières plastiques. Dans le cas particulièrement important des matériaux métalliques, on distingue le soudage autogène du brasage, ainsi que le métal de base (matériau constituant les pièces à assembler) du métal d'apport (matériau étranger qui intervient dans l'opération d'assemblage). On distingue ainsi le soudage dont « les pièces à assembler participent à la construction du joint » du brasage dont « la constitution du joint est réalisé par l'intervention du seul métal d'apport ». Trois techniques d'assemblages peuvent être ainsi clairement définies :

Le soudage : Une opération qui consiste à provoquer la fusion de proche en proche des bords des pièces à assembler. L'emploi d'un métal d'apport peut être utilisé.

Le brasage : Une opération qui consiste à assembler deux pièces métalliques de natures identiques ou différentes par capillarité d'un métal d'apport dans un joint à recouvrement. Ce dernier a un point de fusion toujours inférieur à ceux des métaux de base qui ne fondent pas durant l'opération.

Le soudobrasage : Une technique qui se rapproche du soudage par son mode opératoire (joint réalisé de proche en proche) et du brasage (utilisation de métal d'apport dont le point de fusion est inférieur à ceux des deux métaux de base).

Le brasage et le soudobrasage cherchent à bénéficier des effets de mouillage du métal d'apport sur les pièces. Tels effets existent en soudage mais sont préjudiciables à la morphologie optimale des joints soudés et ne sont pas systématiquement recherchés.

- Les différentes techniques de soudage, par le biais des sources thermiques, en détaillant particulièrement le procédé TIG (Tungsten Inert Gas) qui fait l'objet de cette étude.

I .2.3.Le Procédé Tungsten Inert Gas (TIG):

I .2.3.1.Principe du soudage (TIG) [9] :

Le soudage TIG (Tungsten Inert Gas), également appelé GTAW (Gas Tungsten Arc Welding) aux Etats-Unis, est un procédé de soudage dit « par fusion ». Le principe du TIG est de créer un arc électrique entre une électrode réfractaire (c'est à dire non fusible) en tungstène et la pièce à souder.

L'électrode et le bain fondu sont protégés contre l'oxydation de l'air par un bouclier de gaz inerte, généralement de l'argon pur. Parfois un mélange Argon-Hélium est utilisé pour augmenter la pénétration du bain de fusion, l'ajout d'Hélium permettant d'augmenter la tension d'arc en raison du potentiel d'ionisation plus élevé de celui-ci. L'Hydrogène, parfois présent dans le mélange gazeux, joue un rôle similaire à l'Hélium.

Contrairement à d'autres procédés de soudage comme le laser ou le faisceau d'électrons, qui mettent en jeu de fortes densités d'énergie ($> 10^6$ W/cm²) et provoquent la vaporisation d'une partie du métal, le TIG ne provoque que la fusion du métal, avec dans certain cas une vaporisation très localisée.

Le soudage TIG n'apporte que des calories à la pièce à souder, et s'effectue sans métal d'apport, contrairement à d'autres procédés à l'arc (électrode enrobée, MIG, MAG...). Néanmoins, un supplément de matière peut être apporté, sous forme de fil ou baguette. Le métal d'apport peut être de même constitution que le métal de base (soudage homogène), ou de constitution différente (soudage hétérogène).

Le TIG est un procédé facilement mécanisable. Il est très utilisé, entre autre, dans l'industrie nucléaire pour la réalisation des tuyauteries de circuit primaire des centrales nucléaires de type REP. Le TIG est en effet bien adapté pour la fabrication de tubes roulés soudés en acier inoxydable austénitique. Dans ce cas on utilise le courant continu avec pôle positif relié à la pièce à souder (polarité directe), qui permet de localiser le plus grand apport de chaleur sur le métal à fondre.

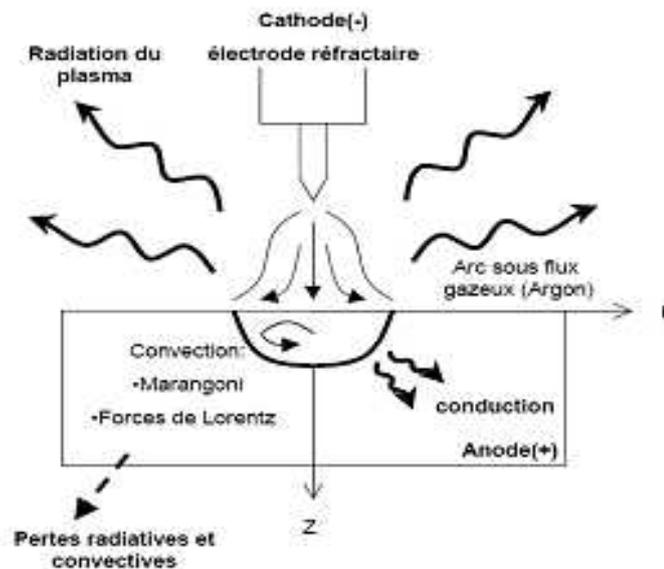


Figure I.3 : Transfert d'énergie en procédé TIG.

La figure I.4 représente un exemple de profil longitudinal et transversal d'une flamme obtenue par ce procédé.

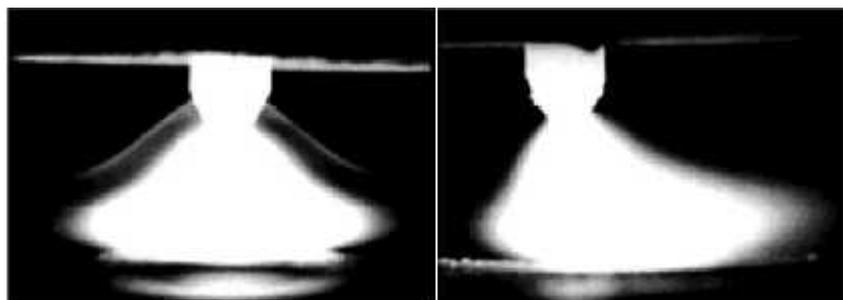


Figure I.4 : Profil longitudinal et transversal de la flamme TIG.

Le soudage s'effectue en polarité directe (pôle du générateur relié à l'électrode) pour la majorité des métaux et alliages (aciers, inox, cuivreux, titane, nickel,...) sauf dans les alliages légers d'aluminium ou de magnésium où l'on soude en polarité alternée (pendant un temps court, l'électrode est reliée au pôle + du générateur). Il est important de noter que souder de façon continue en polarité inverse (pôle + relié à l'électrode) entraîne une destruction de l'électrode, en la faisant fondre.

Le principe de l'application de la torche du procédé de soudage TIG est représenté dans la **figure (I.5)**.

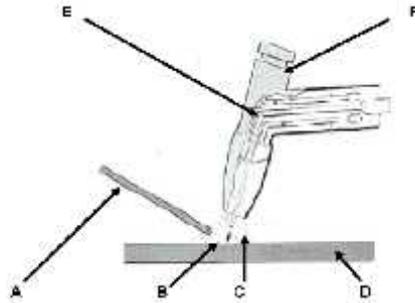


Figure I.5 : Principe de l'application de la torche du procédé de soudage TIG.

Avec :

A = Métal d'apport.

B = Arc électrique.

C = Métal en fusion.

D = Métal de base.

E = Electrode de tungstène.

F = Torche.

Les formes des électrodes pour ce procédé de soudage TIG dépendent du type de courant utilisé, à savoir le courant continu électrode positive, le courant continu électrode négative et le courant alternatif.

Figure(I.6) représente la forme des électrodes utilisées :

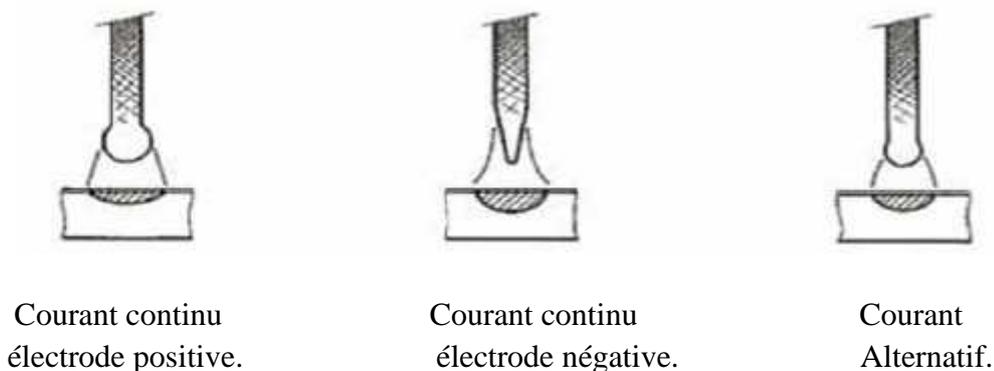


Figure I.6: Forme des électrodes pour soudage TIG [10].

I.2.3.2. Procédés de soudage :

La grande variété des procédés de soudage existants peut être classée en fonction de la nature des énergies mise en œuvre (**figure I.7**).

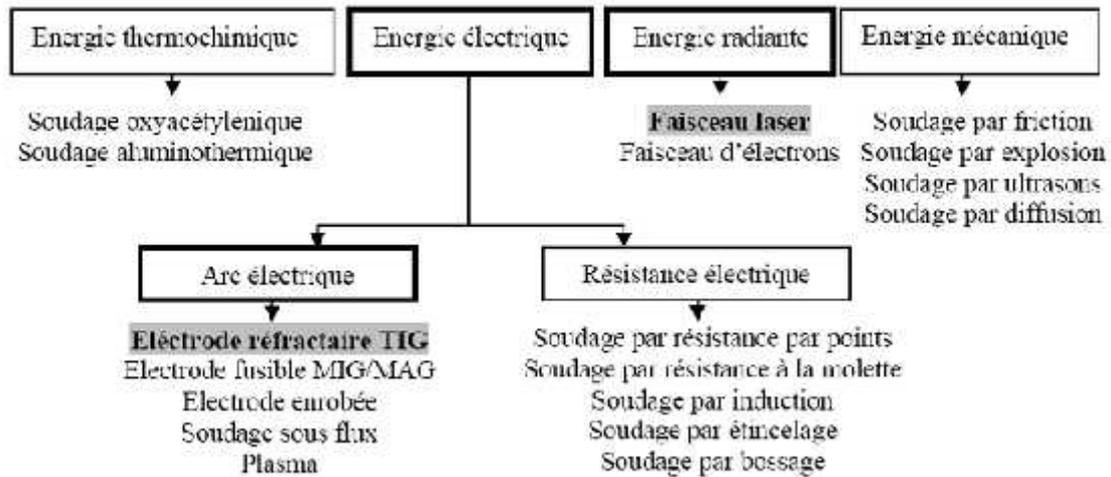


Figure I.7: Procédés de soudage selon les différentes sources d'énergie.

Ce sont les procédés de soudage à l'arc qui sont les plus répandus dans l'industrie et tout particulièrement dans la construction métallique. Le choix du procédé le plus adapté dépend de très nombreux paramètres, à la fois techniques et économiques.

I.2.4. Soudage des alliages d'aluminium [11]:

La notion de soudabilité des alliages d'aluminium n'est pas liée, comme sur les aciers au carbone, au problème de transformation de phase. Cette dernière, qui couplée avec l'hydrogène dissout et prend contact avec les contraintes mécaniques, peut conduire à une fragilité de la soudure. Les alliages d'aluminium de la série 2000 sont sensibles à l'énergie de soudage.

Celle-ci doit être très réduite afin de minimiser la refusion de la phase intergranulaire (phénomène de brulure).

Leurs critères de soudabilité dépendent, comme pour les aciers inoxydables austénitiques, de la tendance à la fissuration à chaud. Le soudage des alliages 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.

L'amplitude et la durée de ce trajet thermique sont fonction de la distance à la source de chaleur, et des conséquences sur le comportement en décolent.

I.2.4.1. Technique de soudage [12] :

Les alliages à durcissement par écrouissage, les alliages traitables thermiquement et les alliages de fonderie ne réagissent pas de la même façon au soudage. La technique de soudage varie d'un alliage à un autre. Aussi, les alliages d'aluminium ne sont tous pas soudables.

Le soudage des alliages d'aluminium par le procédé TIG exige des préparations de surface très soignées. En comparaison à d'autres procédés tel que le MIG, le procédé TIG permet l'obtention de cordons de soudure de bonne qualité. Pour cela, une préparation de la surface est exigée. La première opération est toujours un dégraissage avec un solvant, suivie d'un décapage de la surface. 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).

La présence d'une couche d'oxyde réfractaire nécessite un soudage en courant alternatif (TIG). Le coefficient de dilatation linéique est très différent de celui de l'acier.

D'autre part, en raison d'une conductibilité thermique très élevée, il faut particulièrement faire attention à la pénétration. L'aluminium est sensible à la porosité due à l'hydrogène.

Ainsi, il faut veiller à ce que les métaux d'apport soient stockés de manière appropriée, que le chanfrein de soudure reste propre et que l'alimentation en gaz de protection soit sécurisée.

La propreté est d'une importance primordiale pour le soudage de l'aluminium. Il est préférable d'opter pour le fraisage lors de la préparation des chanfreins de soudure. [13].

L'oxydation superficielle de l'aluminium et de ses alliages produit une couche d'alumine Al₂O₃ qui présente les propriétés suivantes :

- Point de fusion élevé 2050°C (Al 658°C),
- Epaisseur de la couche variant de 0,01 mm à 0,1,
- Formation spontanée à l'air libre même après grattage
- Stabilité même à haute température
- Adhérence et insolubilité dans le métal liquide

Cette couche constitue un barrage entre les éléments à assembler. Le soudage des alliages d'aluminium exige donc :

- Un décapage des pièces à assembler,
- Une protection du bain de fusion pour éviter une réoxydation du métal fondu.

I.2.5. Les différents procédés de soudage :

Se divise en deux groupes selon la source d'énergie utilisée :

1. Le soudage utilisant une source d'énergie interne (ou endogène) aux pièces.

- Soudage électrique par résistance ;
- Soudage par friction ;
- Soudage par diffusion ;
- Soudage par explosion ;
- Soudage par ultrason.

2. Le soudage utilisant une source d'énergie extérieure à la pièce : flamme, arc électrique, faisceau d'électrons, faisceau Laser, jet de plasma...

Ce second groupe est le plus répandu dans l'industrie (hormis dans l'automobile où on soude par résistance), et plus particulièrement le soudage à l'arc, technique de très loin la plus utilisée pour le soudage d'aluminium et des autres métaux et alliages.

I.2.6.Soudage Tungsten Inert Gas (TIG):

I.2.6.1.Caractéristiques de la soudure :

Le soudage TIG 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. Quelle que soit le procédé de soudage par fusion, la structure d'une soudure typique d'un alliage est composée de 6 zones principales (figure I.8).

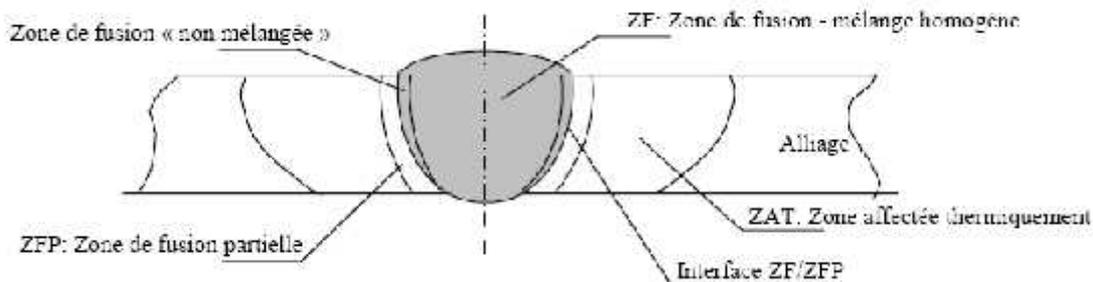


Figure I.8: Variété de microstructures dans un cordon de soudure TIG.

a. La zone fondue : (nommée **ZF**) Zone où l'état liquide a été atteint et dans laquelle a été élaborée la composition chimique. La structure métallurgique obtenue après solidification, dépend du cycle de refroidissement.

On distingue, au sein de cette zone, des gradients de concentration de la partie la plus fondue vers la moins fondue. Il est donc possible d'examiner la composition d'une soudure ainsi que les variations de dureté.

b. La zone affectée thermiquement: (nommée **ZAT**) Zone se trouvant en bordure de la zone fondue sur une largeur plus ou moins large ayant été soumise à l'élévation de température sans être portée à la fusion. Le chauffage, la composition chimique et la vitesse de refroidissement de cette zone génèrent des modifications plus ou moins importantes de la structure métallurgique.

c. La zone de liaison: Cette zone, située à la frontière entre la zone fondue et la zone affectée thermiquement, correspond à la surface sur laquelle la solidification du métal fondu a commencé.

d. Le métal de base: Au-delà de la zone affectée thermiquement, l'élévation de température est insuffisante pour engendrer une quelconque transformation structurale. Cette zone est aussi dite non affectée thermiquement.

e. zone de fusion partielle (nommée **ZFP**) le cycle thermique de soudage s'opère dans cette zone à des températures comprises entre le liquidus et le solidus de l'alliage.

I.2.6.2.formation du bain de fusion :

La forme et la constitution du bain de fusion dépendent de multiples facteurs tels que la nature du matériau à souder, les caractéristiques de l'arc permettant la fusion du métal qui sont liées aux paramètres technologiques du procédé, et les mouvements du bain de fusion.

Ces mouvements de convection du métal liquide ou gazeux influencent de façon importante sur la forme du cordon et les transferts de chaleur pouvant induire des hétérogénéités (ségrégations) ou la présence de défauts tels que les inclusions ou porosités. D'une façon globale le bain de fusion est en équilibre sous l'action de forces aux effets variables. Ces forces d'origine différentes sont :

- Les forces de gravité (ou flottabilité),
- Les tensions superficielles (forces de Marangoni),
- La pression de l'arc en surface,
- Les forces électromagnétiques (forces de Lorentz) pour les procédés de soudage à l'arc.

2 La figure (I.9) présente les forces agissant sur la forme du bain de fusion par procédé de soudage TIG. Une partie seulement de l'énergie calorifique produite par l'arc sert au soudage, le reste étant perdu par rayonnement, convection et conduction dans le métal adjacent.

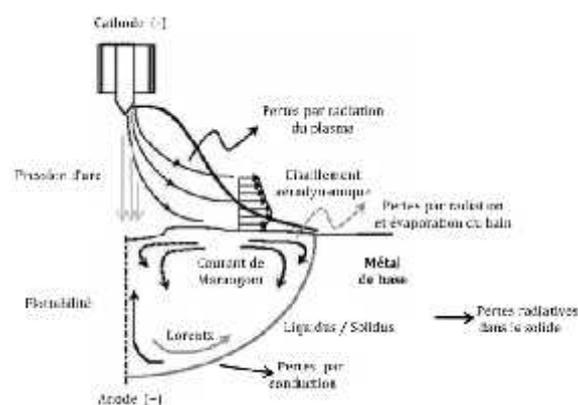


Figure I.9: Forces et courants de convection dans le bain de fusion de soudage TIG.

La forme du bain de fusion dépend principalement de la vitesse de soudage qui influence la cinétique de solidification par le contrôle de la vitesse de croissance du front de solidification.

Cette vitesse s'exprime par la relation suivante :

$$P = R \cdot \cos \alpha \quad \dots\dots\dots(I.1)$$

R : vitesse de croissance linéaire en tout point du front de solidification (cm/min)

Vs : vitesse de soudage (cm/min)

α : angle entre la direction de soudage et la direction de croissance des cristaux

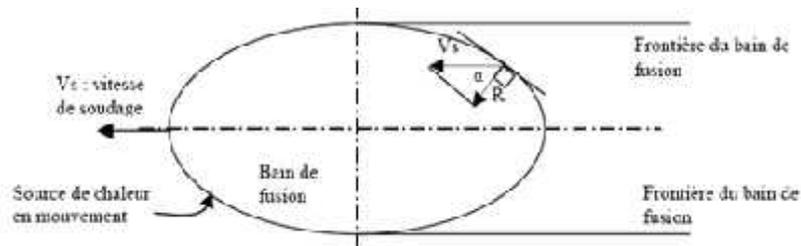


Figure I.10 : Représentation schématique de la vitesse de croissance en fonction de la vitesse de soudage dans un bain de fusion bi elliptique.

I.2.7.Gaz de soudage:

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

Pour l'Aluminium, l'utilisation de mélanges binaires argon + hydrogène améliore la productivité en augmentant la pénétration et les vitesses de soudage.

Défauts rencontrés :

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

I.2.7.1.L'argon : C'est le gaz le plus couramment utilisé en soudage TIG. Totalement inerte et relativement lourd, il assure une excellente protection du bain et de l'électrode. Par contre, la présence d'un film d'oxydes ou de dépôts de surface réduit son efficacité. Enfin, son faible potentiel d'ionisation facilite l'amorçage de l'arc et se traduit par une colonne d'arc plutôt conique.

I.2.7.2.L'hélium : Comme l'argon, l'hélium est chimiquement inerte mais a une densité très faible. Il faut donc débiter trois fois plus d'hélium pour obtenir une protection équivalente à celle de l'argon, or son coût est supérieur. La facture gazeuse finale est quatre fois plus coûteuse qu'une soudure sous argon, ce qui explique sa faible utilisation en soudage TIG. De plus, son potentiel d'ionisation élevé conduit à un amorçage d'arc qui se révèle difficile mais les énergies incidentes sont plus importantes comparativement à l'argon et permettent d'éviter les défauts de fusion. Par conséquent, les vitesses de soudage associées sont plus élevées et peuvent compenser le surcoût d'utilisation de l'hélium.

- ❖ Voici des exemples de mélanges de gaz de protection employés communément pour le soudage au gaz à l'arc de tungstène:
 - 50% d'argon et 50% d'hélium pour des épaisseurs moyennes.
 - 25% d'argon et 75% d'hélium pour les épaisseurs lourdes d'éléments de grande conductibilité thermique tels que l'aluminium et le cuivre.

I.2.7.3.Les gaz actifs :

L'oxygène, l'hydrogène ou l'azote sont parfois utilisés, en faible proportion, en combinaison avec l'argon ou l'hélium. L'oxygène est choisi pour répondre à deux fonctions qui sont de stabiliser l'arc mais surtout de modifier les tensions de surface du métal fondu et ainsi éviter les défauts surfaciques comme les caniveaux initiateurs de concentrations de contraintes.

L'hydrogène, quant à lui, grâce à sa conductivité thermique élevée, donne une tension d'arc plus élevée, favorable à une meilleure pénétration (gain de 50% avec 5% d'H₂) et à une section fondue plus importante. Cependant, le ratio géométrique pénétration sur largeur de bain diminue très nettement par cet ajout. Par ailleurs, l'hydrogène, très réducteur, est utilisé pour éliminer la couche d'oxydes en surface du bain.

Pour ce qui est de l'azote, il sert, entre autre, à maîtriser les structures formées au cours de la solidification. Par exemple, l'ajout d'azote favorise la présence de ferrite dans le cas de soudure d'aciers duplex austéno-ferritiques. Le taux d'azote permet également d'affiner la taille de grains austénitiques des aciers austénitiques à haute limite élastique.

Cependant, il faut être extrêmement vigilant quant à l'utilisation de ces gaz à cause des phénomènes de pollution et de fragilisation. Une étude complète sur la sensibilité du matériau soudé est nécessaire avant tout ajout dans le gaz d'assistance.

I.2.8.Les métaux d'apport :

Le métal d'apport doit être d'une pureté élevée, et les pièces à souder à l'abri de toute contamination. L'électrode étant protégée par un nuage de gaz conducteur, l'énergie émise sera distribuée dans le volume du nuage et devient responsable de la faible pénétration du bain fondu. L'argon et l'hélium sont les gaz inertes les plus couramment employés dans le procédé TIG. Cependant, on recommande particulièrement l'argon car il convient à une grande variété de métaux, et le débit nécessaire est très inférieur à celui de l'hélium pour un travail donné.

L'argon est un gaz inerte qui ne s'allume pas, ne nourrit pas la combustion et ne réagit chimiquement à aucun autre élément. Il est sans couleur, sans odeur et est présent à 0.93% dans l'atmosphère. Bien que la plupart des alliages soient soudables sans métal d'apport,

celui-ci est pratiquement toujours nécessaire pour avoir une section soudée suffisante, pouvoir combler les retraits, les effondrements et les jeux et prévenir la fissuration à chaud.

D'une manière générale, le soudage de tous les alliages d'aluminium est possible avec un apport Al-Si. En effet, la sensibilité maximale à la fissuration à chaud se situant entre 0.5 et 1% de silicium, les risques sont écartés par les taux de dilution obtenus habituellement en soudage. Le taux de dilution est défini par le volume de fil d'apport déposé sur le volume total de la zone fondue. Cet avantage est couplé à un faible retrait de solidification qui limite les contraintes dans le cordon et réduit les déformations.

Le type de métal d'apport recommandé pour souder en TIG est sélectionné en fonction de trois critères :

- Les propriétés mécaniques maximales de la zone fondue,
- La résistance à la corrosion,
- La soudabilité opératoire incluant la fissuration à chaud.

I.2.9. Les principaux défauts de soudage :

En utilisant le procédé de soudage, on peut rencontrer plusieurs défauts.

La norme NF EN 26520, correspondant à la classification des défauts dans les soudures par fusion des métaux, permet d'énumérer et de classer les défauts en fonction de leur géométrie, de leur position dans la soudure et de leur origine. Ces défauts peuvent être classés en deux catégories. La première d'origine purement opératoire regroupe :

- Les caniveaux (internes ou externes),
- Le manque et l'excès de pénétration,
- Le manque de fusion (collage),
- Le défaut d'alignement,
- La déformation angulaire,
- etc...

La figure (I.11) représente un exemple de manque de pénétration :

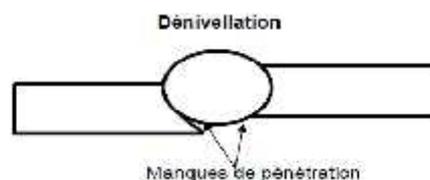


Figure I.11 : Exemple de manques de pénétration.

La seconde regroupe les défauts internes :

- Les différentes fissures (à chaud, à froid, au réchauffage),
- les porosités.

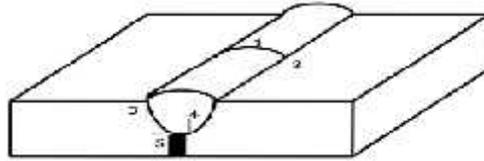


Figure I.12 : Exemple de fissure à froid.

Avec :

- 1 = Fissures transversales dans la zone fondue.
- 2 = Fissures transversales dans la zone affectée thermiquement.
- 3 = Fissures dans la zone de liaison.
- 4 = Fissures dans la zone fondue.
- 5 = Fissures à la racine.

I.2.10. Actif TIG :

Le soudage ATIG est une technique qui émerge en construction mécano-soudée de produits chaudronnés depuis le milieu des années 1990. Le matériel nécessaire est identique qu'en soudage TIG. Il utilise un dépôt alcalin de flux actif qui joue un double rôle au passage de l'arc :

- Il modifie le comportement et l'équilibre électrochimique de la zone ionisée, conduisant à une constriction de l'arc électrique, réduisant ainsi la tache anodique ; les densités de courant et d'énergie sont donc augmentées au sein de la source thermique ;
- Il inverse les courants de convection thermo-capillaires au sein du bain métallique, initiant alors des courants centrifuges qui sont favorables au transfert des calories dans la pièce ainsi qu'à la formation de profils de bains pénétrants plutôt que mouillants.

Il en résulte une forte modification de la morphologie des cordons soudés, doublant la gamme des épaisseurs soudables d'une seule passe.

Les flux alcalins sont des composés classiques dans la gamme des éléments rentrant dans la composition des flux de brasage, des enrobages d'électrodes ou de flux solides pour le soudage en arc submergé.

I.2.11. Méthodes et critères de validation des paramètres d'assemblages contrôlés non destructifs (CND) [14] :

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.

I.2.11.1. Contrôles visuels : L'état extérieur d'une pièce peut donner des informations essentielles sur l'état de celle-ci : des défauts évidents (comme des pliures, des cassures, de l'usure, de la corrosion ou fissures ouvertes). Des défauts cachés sous-jacents présentant une irrégularité sur la surface extérieure peut être une indication de défaut plus grave à l'intérieur.

I .2 .11.2.Ressuage : C'est une méthode destinée à révéler la présence de discontinuités ouvertes en surface de pièces métalliques, essentiellement, mais aussi en céramique. Elle consiste à badigeonner (par immersion ou par pulvérisation électrostatique, parfois mais rarement, au pinceau) la cible avec un liquide fluorescent ou coloré en rouge, qui pénètre dans les discontinuités. Après nettoyage de la cible, un révélateur est appliqué et, en faisant « ressuer » le liquide resté dans les fissures, va les révéler.

I .2.11.3.Radiographie x: Cette technique fournit des informations directement exploitables sur l'intérieur des objets ou des matériaux. L'étape d'inversion peut être assez réduite et la résolution spatiale suffisamment bonne. Toutefois, l'interprétation des images demande de l'expertise ainsi la réalisation des clichés nécessite des conditions de sécurité pour l'opérateur et l'environnement.

Dans l'industrie lourde, le contrôle à l'aide des rayons X est utilisé notamment pour les soudures dans les centrales nucléaires et les chantiers navals et pétroliers.

. I .2.11.4.Ultrasons : Le contrôle par ultrasons est basé sur la transmission, la réflexion et l'absorption d'une onde ultrasonore se propageant dans la pièce à contrôler. Le train d'onde émis se réfléchit sur les défauts puis revient vers le traducteur (qui joue souvent le rôle d'émetteur et de récepteur). L'interprétation des signaux permet de positionner le défaut et de définir ses dimensions relatives.

II. Introduction :

Dans ce chapitre, une étude sur l'alliage d'aluminium 2024 est présentée, en plus une étude expérimentale sur le procédé de soudage TIG et le comportement mécanique d'alliage d'aluminium seront expliqués.

II.1. Préparation des échantillons pour le soudage:

II.1.1. Choix de matériaux :

Le choix de matériaux était précisé pour obtenir des résultats fiables :

- Utilisation de l'alliage 2024 dans le domaine aéronautique.
- Le manque d'expérience de soudage d'aluminium dans les ateliers commerciaux.
- Amélioration de ce genre de soudage à partir de choix de cet alliage.

II.1.2. Préparation des éprouvettes :

II.1.2.1. Etape de coupe d'une tôle :

La préparation des éprouvettes se fait en découpant la tôle de l'aluminium par un appareil industriel (**Guillotine**) en deux plaques de forme rectangulaires de dimension (15x 20) cm de chaque épaisseur (20/10) mm et (30/10) mm.



Figure II.1 : Machine de Guillotine.

II.1.2.2. Etape de nettoyage :

- Le nettoyage se fait à la main avec un papier à vert pour enlever la pellicule d'oxyde recouvrant les tôles avant le soudage.
- Pençage de la tôle au niveau du cordon de soudure.

II.1.2.3. Etape de chanfrein :

- On utilise dans cette étape la meule ;
- On trace un angle de 45° sur la longueur de la tôle pour créer un chanfrein en V.



Figure II.2 : Préparation de chanfrein de forme V.

II.2. Opération de soudage :

II.2.1. Matériel utilisé :

a) Générateur de courant :



Figure II.3 : Poste de soudage TIG.

Les générateurs de courant utilisés en soudage TIG sont les mêmes que ceux utilisés en soudage à l'arc avec électrodes enrobées et leur rôle est identique mais ces derniers ne sont utilisables en soudage TIG qu'à condition de leur adjoindre un certain nombre d'organe de commande et de stabilisation de l'arc. Ces générateurs doivent, comme en soudage électrique à l'arc avec électrode enrobées, posséder une caractéristique plongeante.

Il faut noter que les tensions à l'arc sous argon (15 à 20V) sont beaucoup plus faibles que celles utilisées en soudage à l'arc avec électrodes enrobées (20 à 40V). En conséquence, dans le cas d'un appareil conçu pour le soudage à l'arc avec électrodes enrobées, les graduations ou repères du réglage de l'intensité ne sont absolument plus valables pour le soudage en TIG.

b) Coffret de commande :

Il regroupe des organes ayant pour rôle :

- D'établir et couper le courant de soudage ;
- D'admettre et d'interrompre la circulation du gaz inerte ;
- De stabiliser l'arc par l'intermédiaire d'une platine stabilisatrice en courant continu.

C) Gaz utilise :

On utilise des gaz inertes en soudage pour protéger le métal en fusion contre les agents oxydants de l'atmosphère ambiante ; Ainsi, on emploie l'argon pour la protection de l'endroit du bain de fusion et de l'électrode.

On peut également utiliser un mélange argon hydrogène, bénéficiant ainsi des propriétés réductrices de ce dernier.

d) Torche :

Selon l'importance des courants utilisés, on peut employer des torches à refroidissement naturel ou à refroidissement par eau. Elles peuvent supporter des intensités de 200 à 300 Ampères.

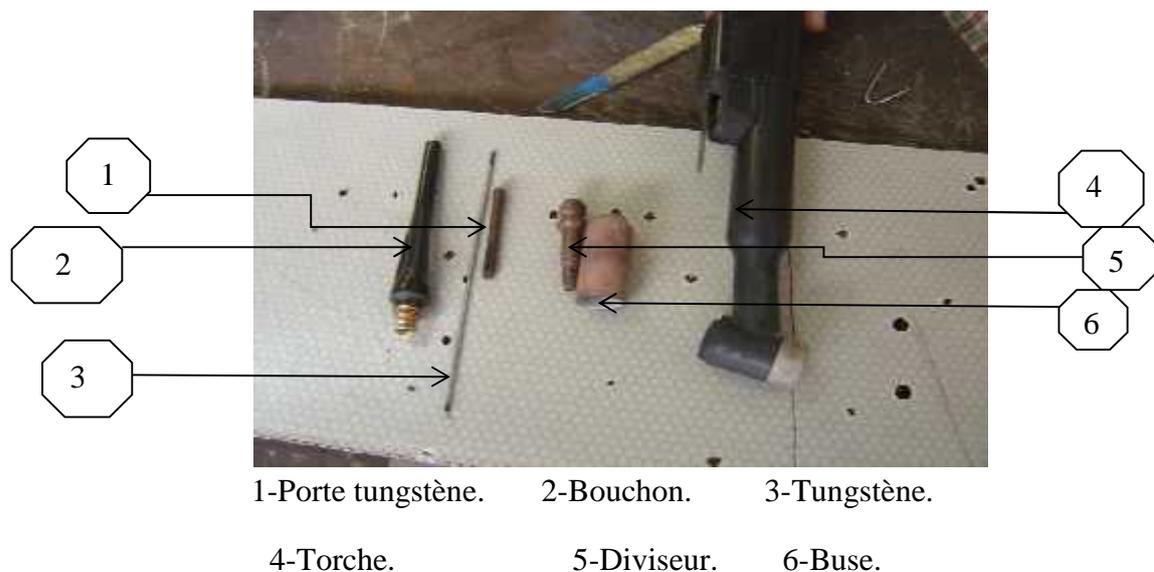


Figure II.4 : Torche utilisée pour le soudage TIG.

II.2.2. Présentation du matériau utilisé :

Dans le cadre de cette étude, on choisit l'alliage d'aluminium 2024. Il nous a été remis, **par la base technique d'Air Algérie**, sous forme de tôles (200 x 150 mm) à l'état T351 et sous différentes épaisseurs (respectivement 1 et 2 mm).

Une plaque brute d'aluminium 2024 T351 d'épaisseur égale à 2 mm est représentée dans la figure (III .5) :



Figure II.5 : Plaque d'aluminium 2024 T351 (Epaisseur = 2 mm).



Figure II.6 : Plaque d'aluminium 2024 T351 prête pour le soudage (Epaisseur = 2 mm).

On peut noter la présence quasi inéluctable d'impuretés telles que le fer. Il fait partie des alliages de la série 2000 à haute teneur en cuivre, de l'ordre de 4% en masse, utilisés pour leurs bonnes propriétés mécaniques.

II.2.3. Technique de soudage en 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 en 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.



Figure II.7 : Premières étapes du procédé de soudage TIG.

II.2.4. Principe et paramètres du soudage TIG :

II.2.4.1. Principe de l'application du procédé de soudage TIG [13] :

On fait jaillir de l'argon (arc électrique) entre une électrode infusible de tungstène et la pièce à souder opposée. 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 ragrénées sous une forme conique.

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.

Tableau II.1 : Caractéristiques techniques (Pièce + Equipement) .

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



Figure II.8 : Fixation de deux tôles entre eux avec des points de soudure.



Figure II.9 : Plaques soudeés.



Figure II.10 : La penetration de la soudure sur la plaque.

II.2.4.2. Parametres de soudage :

Soudage en TIG sous l'argon Cu-Al avec électrode de tungstene thorie.

Courant altematif .

Tableau II.2 : Parametres de soudage.

Epaisseur de metal de base (mm).	Diametre de metal d'apport (mm).	Diametre de tungstene (mm).	Diametre de la buse (mm).	Debit d'Argon pour soudage (I/mn).	Courant (A).	Volt (v) .	Temps de soudage (Mn).	Longueur de cordan de soudure (cm)
20/10	1	1	5	8	70	16	2 :41	18.9
20/10	1.6	1.6	5	8	68	14	2 :58	19.5

II.2.5. Contrôle des soudures [14] :

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 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 [15].

II.2.5.1. Contrôle avant le soudage :

Dans le but de minimiser 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.

II.2.5.2. 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.

II.2.5.3. 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.

a) 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.

b) 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.

II.3. Opération de la micrographique :

II.3.1. Enrobage :

- Avant de faire l'enrobage on prépare les échantillons de cordon de soudure ;
- Découpé deux morceaux de cordon de soudure se forme rectangulaire de dimension de (20x10) cm à la main avec une Scie. 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 dans un moule récupérable pour permettre la fixation dans un porte-échantillon ou de faciliter sa prise en main lors du polissage manuel.

- L'enrobage se fait avec une machine **ENROBEUSE**.

L'expérience s'est déroulée au niveau de Département de Génie Mécanique à l'Université « SAAD DAHLAB » de BLIDA.



Figure II.11 : Machine enrobeuse.



Figure II.12 : Talons de soudure enrobée par la résine d'une épaisseur 2 mm.

II.3.2. Polissage :

Après l'enrobage, les échantillons ont subi un polissage mécanique avec une **POLISSEUSE**. Cette étape permet d'obtenir une surface très lisse (la plus lisse possible et sans rayure).

Le polissage comportant trois stades :



Figure II.13 : Polisseuse.

Un polissage grossier à l'aide des disques de papiers abrasifs en carbure de silicium (SiC). Ce polissage se fait selon une granulométrie décroissante des grains de SiC qui varie de 120P à 1200P.



Figure II.14 : 1^{ère} Etape de Polissage.

Un polissage de finition très fin avec une poudre d'alumine Al_2O_3 ayant une granulométrie de $0.05\mu m$, en suspension sur un tissu en soie imbibée d'eau distillée.



Figure II.15 : 2^{ème} Etape de Polissage (Finition).



Figure II.16 : Après polissage le cordon de soudure enrobé par la résine d'une épaisseur de 2 (mm).

II.3.3. Attaque chimique :

Après le polissage, l'échantillon subit une attaque chimique avec un produit (**KILER**).

Le rôle de l'attaque chimique est de donner une bonne visibilité à l'échantillon pendant l'analyse microscopique.

II.3.4. Analyse micrographique :

-L'examen micrographique a pour but principal la mise en évidence de la structure de l'échantillon et des inclusions qui s'y trouvent lors de l'observation au microscope optique.

L'expérience s'est déroulée toujours au niveau de notre Département de Génie Mécanique (U.S.D.B).



Figure II.17 : Microscope optique.

II.4. Méthodes d'essais mécaniques :

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.

II.4.1. Essai de traction :

II.4.1.1. Généralités sur la Traction :

Parmi tous les essais mécaniques, l'essai de traction est certainement le plus important. Il sert à déterminer les principales caractéristiques mécaniques suivantes : le module d'élasticité, le coefficient de Poisson, la limite d'élasticité, la résistance à la rupture, l'allongement après rupture et le coefficient de striction. Son principe consiste à exercer sur une éprouvette normalisée deux

forces égales et opposées qui vont entrainer sa déformation progressive suivant son allongement puis sa rupture.

II.4.1.2 Essai de traction :

a) Introduction :

-L'essai de traction à exercer sur une éprouvette de forme cylindrique ou parallélépipédique (plate) des forces croissantes, qui vont la déformé progressivement puis la rompre.

L'essai s'est déroulé au niveau de Centre de Soudage et de Contrôle (C.S.C) de Cheraga, Alger.



Figure II.18 : Machine de traction de marque Instron.

b) Préparations des éprouvettes :

-En découpe selon la largeur les éprouvettes précédente (Eprouvettes soudées) deux échantillons de chaque épaisseur (20/10) mm de forme rectangulaire de dimension (15x3) cm.



Figure II.19: Eprouvettes pour un essai de Traction épaisseur (20/10) mm.

c) La manipulation :



Figure II.20 : Eprouvette au cours d'un essai de Traction.

-On positionne l'éprouvette dans la machine et on la fixe par les deux mandrins (mandrin fixe et mandrin mobile).

Paramètre d'essai de traction :

Tableau II.3 : Parametres de l'essai de traction.

Numéro de la manipulation.	Epaisseur de l'éprouvette (mm).	Longueur de l'éprouvette (mm).	Longueur de l'éprouvette (mm).	Vitesse appliquée sur l'éprouvette (mm/min)
1	2	225	25	3
2	2	208	20	3

II.4.2. Opération d'essai de résilience :

II.4.2.1 Introduction :

L'un des moyens pour caractériser la fragilisation d'un matériau est fourni par l'essai de résilience sur des éprouvettes entaillées, décrit dans la norme NF EN 10045. Le principe consiste à rompre, d'un seul coup à l'aide d'un mouton CHARPY, une éprouvette entaillée en son milieu et reposant sur deux appuis. On détermine alors l'énergie absorbée dont on déduit la résilience.

II.4.2.2 Définition :

La résilience est l'énergie en (Joule/Cm²) nécessaire pour produire la rupture d'une éprouvette placée sur deux appuis.

$$Q_K = A_v / S. \text{ (J/Cm}^2\text{)}. \dots\dots\dots\text{(II.1).}$$

Q_K : La résilience.

A_v : Energie d'impact absorbée.

S : Section à l'entaille de l'éprouvette.

II.4.2.3 Essais de résilience :

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

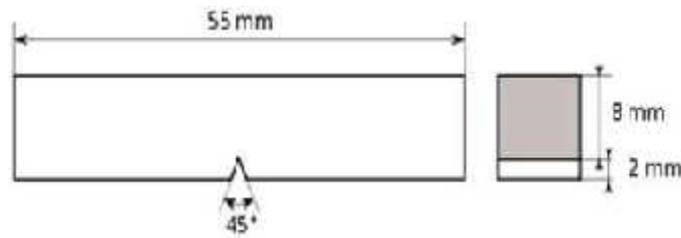


Figure II.21 : Epreuve normalisée avec une entaille de forme V.



Figure II.22 : Pendule mouton Charpy PSW.

Pour cet essai on a pris trois éprouvettes avec une entaille de forme V :

- Deux éprouvettes avec une entaille de forme V soudées. (Avec un chanfrein de forme V de 45^0).
- Epreuve avec une entaille de forme V non soudée. (Normalisée).

L'énergie d'impact consommée par l'éprouvette est lue directement sur un cadran gradué (Appareil d'indication digitale) en joule. Cette énergie est ensuite divisée par la section rompue ($1, 0.5 \text{ cm}^2$) pour enregistrer la valeur de la résilience en J/cm^2 .

L'appareil d'indication digitale indique :

A_v : Energie absorbée.

A_{VK} : Energie absorbée de compensation.

-L'essai s'est déroulé au niveau de l'unité de recherche et de développement mécanique aéronautique (URD-MA) de Dar El Beida à Alger.

II.4.3. Essai de la microdureté :

II.4.3.1. Introduction :

Les essais de dureté représentent une grande utilité pour notre étude en raison de leur simplicité et de leur caractère peu destructif. La dureté caractérise la résistance à la déformation et les valeurs obtenues permettent certains classements. Cependant, le processus opératoire doit être très précis pour assurer la productibilité et la fidélité des résultats. Ceci explique le grand nombre

de normes dans ce domaine, pour les essais proprement dits, les machines d'essais et les étalons. Les essais les plus courants se font par pénétration.

Dans l'essai de la micro dureté, la mesure de la dureté nécessite des essais sous très faible charge, dont la profondeur ne dépasse pas 1/10 de l'épaisseur de l'échantillon. Le principe des essais de dureté consiste à enfoncer un pénétrateur dans le métal à évaluer. A charge constante, on mesure la dimension de l'empreinte. Celle-ci est d'autant plus grande que le métal est moins dur. La dureté H s'exprime par le rapport de la force (F) sur la surface de l'empreinte (S).

II.4.3.2. Essais de la microdureté :

On aurait tendance à exprimer H en mégapascals, mais, pour insister sur le caractère conventionnel de l'essai de dureté, celle-ci est exprimée sans dimension. L'essai de dureté utilisé pour notre cas est l'essai Vickers. Il consiste dans un laps de temps bien déterminé à imprimer dans la pièce à évaluer un pénétrateur en forme de pyramide droite, à base carrée, sous une charge F, et à mesurer la diagonale d de l'empreinte laissée sur la surface après enlèvement de la charge.

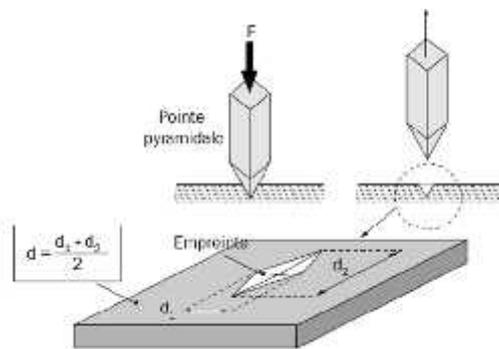


Figure II.23 : Caractéristiques de l'essai.

L'essai s'est déroulé au centre de structure et de maintenance de l'Ecole Polytechnique Militaire de Bordj El Bahri à Alger.

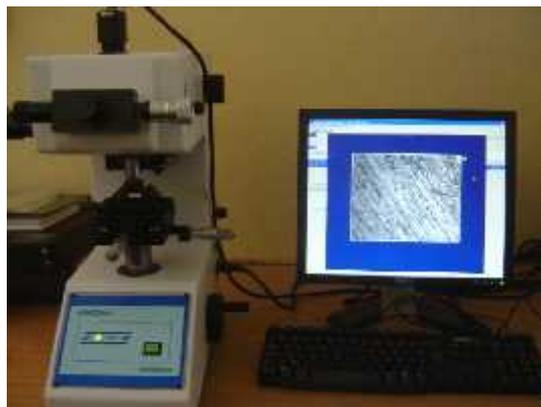


Figure II.24 : L'appareil de microdureté.



Figure II.25 : Empreinte de pénétrateur.

Nous avons effectué un essai de microdureté sur les éprouvettes soudées. la procédure s'est effectuée tout en balayant la zone affectée thermiquement et la zone fondue. cet essai a permis d'observer la variation de la microdureté pour chaque zone.

II.4.4. Opération d'essai de L'analyseur mécanique dynamique (AMD) :

II.4.4.1. Introduction [17, 18,19] :

L'identification du comportement mécanique global d'un matériau par des techniques d'analyse dynamique est un enjeu majeur. Généralement, les méthodes expérimentales employées rendent compte à la fois de la rigidité de la structure et du comportement amortissant du matériau, permettant ainsi d'accéder à la connaissance des propriétés viscoélastiques. Dans cette étude, on porte un grand intérêt à l'analyse mécanique dynamique (AMD) mettant en jeu des essais sous sollicitations harmoniques. La méthode du viscoanalyseur est une technique d'analyse expérimentale, couramment utilisée dans l'étude des métaux et polymères, permettant d'extraire les propriétés thermiques et mécaniques d'un matériau viscoélastique.

Elle met en jeu des essais mécaniques de flexion, torsion ou traction compression et rend compte de l'évolution de la réponse du matériau sous sollicitations harmoniques « hors résonances ». Elle est généralement utilisée dans l'identification de la température de transition vitreuse des matériaux composés d'une matrice polymère.

En effet, l'ensemble des études montre une forte dépendance du comportement viscoélastique de certains paramètres, principalement la température et la fréquence des sollicitations. Le comportement viscoélastique est généralement décrit par un module complexe ($E^* = E + iE''$) dont la partie réelle E' , appelée module élastique, traduit le comportement élastique conservatif du matériau. La partie imaginaire E'' , appelée module de perte, caractérise le comportement visqueux du matériau. Le rapport $E''/E' = \tan(\delta) = \tan(\delta)$ est appelé facteur de perte. Dans cette étude, on s'intéresse plus particulièrement à un matériau aéronautique en alliage d'Aluminium : 2024 pour la mesure, à l'aide d'un viscoanalyseur, des modules élastique E' et celui de perte E'' en fonction de la température et pour différentes fréquences de sollicitations.

II.4.4.2. Description du viscoanalyseur [20]:

L'analyseur mécanique dynamique (AMD) 242 C de la société NETZSCH a été utilisé pour étudier le comportement mécanique de l'alliage d'aluminium. Il permet de réaliser des mesures en mode statique ou en mode dynamique. En mode statique, l'AMD est un système semblable à un appareil de traction de haute précision tandis que le mode dynamique permet la mesure de la friction interne d'un matériau. La force appliquée par le moteur à bobines magnétiques est d'une précision de 0,1 mN près. La fournaise est utilisée pour chauffer l'échantillon et faire des mesures de comportement thermomécanique jusqu'à 600 °C. La précision des mesures des thermocouples est de 0,1 °C. Le capteur de déplacement mesure le déplacement de la tige de transmission avec une précision de 0,1µm. Les différentes fixations d'échantillons permettent de faire des tests en tension, en compression, en cisaillement et en flexion. Il est ainsi possible de mesurer la résistance mécanique, l'expansion thermique et le comportement en fluage pour différents matériaux.



Figure II.26 : L'analyseur mécanique dynamique (AMD) 242 C de la société NETZSCH.

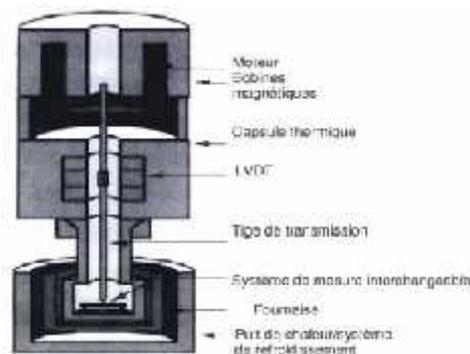


Figure II.27 : Les composantes d'un AMD.

II.4.4.3. Principe général [21]:

Le terme général AMD (ou DMTA) est relatif aux appareils à vibration libre et à ceux à vibration forcée. La méthode de vibration forcée hors résonance (ISO 6721-5) utilisant un signal

sinusoïdal en cisaillement ou en compression est généralement préférée pour l'obtention de données en ingénierie. Equipé de capteurs, l'analyseur viscoélastique dynamique (AMD) mesure principalement deux grandeurs dynamiques : le déplacement et la force. Le déphasage entre les signaux d'entrée sinusoïdaux d'excitation et les signaux de sortie (eux aussi sinusoïdaux et de même fréquence dans le domaine linéaire, mais d'amplitude différente) est donné par l'angle de phase δ . Le déphasage est lié aux propriétés viscoélastiques du matériau. L'angle δ est calculé à partir du traitement de ces signaux selon une transformée de Fourier rapide (notée FFT : Fast Fourier Transform). Lors d'une mesure mécanique dynamique, une contrainte sinusoïdale est appliquée à une fréquence f . Le signal de contrainte peut s'écrire :

$$\sigma(t) = \sigma_0 \sin(\omega t) \dots \dots \dots (II.2).$$

Avec : σ_0 : Amplitude du cycle de contrainte ;
 $\omega = 2\pi f$: Pulsation en rad/s et T : le temps.

Le signal de réponse en déformation d'un matériau viscoélastique est déphasé (car ce dernier dissipe une partie de l'énergie en se déformant), soit :

$$\epsilon(t) = \epsilon_0 \sin(\omega t + \delta) \dots \dots \dots (II.3).$$

Avec : ϵ_0 : l'amplitude du cycle de déformation.

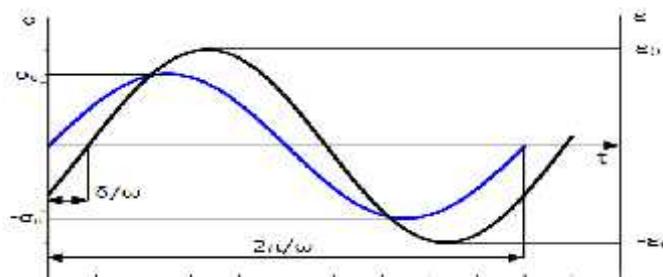


Figure II.28 : Déphasage δ entre contrainte et déformation d'un matériau viscoélastique.

Les modes de déformation sont imposés par la géométrie des porte-échantillons. Le choix d'un mode de déformation dépend notamment de la nature (solide, pâte ou liquide) et de l'état (état vitreux, transition vitreuse, état caoutchouteux, durcissement, fluidification, fusion, etc.) du matériau attendu lors de l'essai. Globalement, trois cas peuvent se présenter à l'expérimentateur, selon la valeur du module :

- les matériaux à haut module de Young ($E > 10$ GPa) comme certains matériaux composites ou les céramiques sont analysés en traction-compression ou en flexion;
- les matériaux solides de module inférieur peuvent être caractérisés en flexion, traction-compression ou en cisaillement ;
- les matériaux pâteux sont généralement analysés en cisaillement. Les liquides (exemples : huiles, peintures) ne sont testés qu'en cisaillement. Lors d'un essai de flexion, un matériau est soumis à un ensemble de forces combinant la traction, la compression et le cisaillement.

Il existe des porte-échantillons adaptés à chaque mode de déformation ou à la spécificité du matériau.

Tableau II.4: Modes de déformation d'un AMD.

	Flexion en 3 points.
	Flexion en 3 points avec encastrement.
	Compression.
	Cisaillement.
	Traction.

II.4.4.4. Propriétés mécaniques étudiées en AMD [22]:

Les propriétés des matériaux viscoélastiques dépendent du temps, de la température et de la vitesse de déformation. Les diverses propriétés correspondant aux modes de déformation en traction, en flexion ou en cisaillement sont représentées par des symboles portant l'indice t, f ou s, respectivement, par exemple M_f est un module en flexion. Pour l'essai de traction-compression uniaxiale, la mesure de la rigidité et le calcul de l'angle de phase permettent, connaissant uniquement les dimensions de l'éprouvette, de calculer les propriétés viscoélastiques suivantes: facteur d'amortissement, le module conservatif, le module de perte et le module de Young respectivement $\tan \delta$, E' , E'' et E .

II.4.4.5. Essais d'AMD :

L'alliage étudié est l'aluminium 2024, des échantillons de dimensions $50 \times 10 \times 2$ (mm³) sont préparés pour la flexion en trois-points simplement supportés est sollicité par une force de flexion

dans un intervalle de température allant de 25 °C à 500 °C avec une vitesse de chauffage égale à 3 °C/min. Les fréquences utilisées sont 1 Hz, 2 Hz, 5 Hz, 10 Hz et 20 Hz, l'amplitude de déformation 0.02 mm soit 1 % de la hauteur de l'échantillon. Les mesures sont faites sur une machine AMD de marque NETCHZ C242. L'exécution du test sur AMD sert à déterminer principalement le module de rigidité en fonction de la température. Le test AMD donne en même temps la température à laquelle le matériau perd sa rigidité avec une grande précision.

L'essai s'est déroulé au laboratoire de structure de l'unité de recherche et de développement mécanique aéronautique (URD-MA) de Dar El Beida Alger.

II.5. Opération de la diffraction des rayons x :

II.5.1. Introduction :

L'utilisation des méthodes de rayons X est un outil très performant et universel pour déterminer la structure des cristaux. Pratiquement tous les domaines de la physique du solide ont recours à l'une ou l'autre des méthodes de caractérisation par rayons X.

Les rayons X sont indissociables de quelques grands noms de la physique tels Röntgen le découvreur de ce rayonnement électromagnétique en 1895, Bragg, Laue, Debye, Scherrer, Miller et tant d'autres noms qui évoquent, une loi physique découverte ou une méthode expérimentale. L'outil principal d'analyse des structures cristallines est la diffraction de rayonnements électromagnétiques (rayons X) ou d'ondes associées à des particules élémentaires (principalement électrons et neutrons). Ces méthodes de diffraction ne donnent pas une image de la structure cristalline mais elles permettent de la reconstituer.

La diffraction des rayons X (ou radiocristallographie), est la technique la plus utilisée dans les laboratoires de métallurgie mais la diffraction des électrons et des neutrons est une technique dont l'utilisation est en plein développement.

II.5.2. Diffraction des rayons x :

II.5.1. Principe :

Les corps cristallins peuvent être considérés comme des assemblages de plans réticulaires plus ou moins denses. Les plans contiennent les atomes : Certains plans contiennent bien plus d'atomes que d'autres en fonction de la formule chimique du minéral.

Ces plans réticulaires sont séparés par des distances caractéristiques (d) selon la nature du cristal ou du minéral considéré. Trois ou quatre distances réticulaires bien choisies permettent une reconstitution du réseau cristallin du minéral.

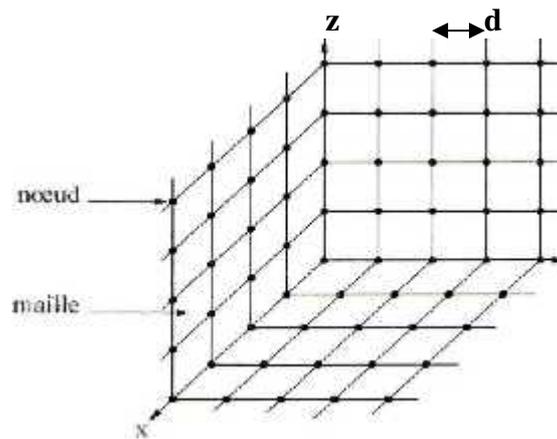


Figure II.29 : Organisation tri périodique d'un cristal.

Avec un rayonnement de longueur d'onde suffisamment petit on peut obtenir des diffractions par les plans réticulaires (de la même manière que les rayons lumineux sont diffractés par les petites fentes d'un réseau en optique). Cette réfraction est d'autant plus intense que le plan est « dense » c'est-à-dire riche en atomes.

La théorie a été élaborée concomitamment par **W.L. Bragg** et **G.Wulff** : on l'appelle la relation de **Wulff-Bragg**. Un faisceau de rayons X incident de longueur d'onde λ ne sera réfléchi par une famille de plan (h, k, l) que dans la mesure où il rencontre ces plans sous un certain angle θ dit angle de Bragg.

II.5.2.2. Loi de Bragg :

Lorsqu'un faisceau de rayons X monochromatiques (de longueur d'onde λ) tombe sur un matériau métallique, une partie du faisceau est diffusée par les atomes du cristal, c'est-à-dire réémise sous forme d'un rayonnement X de même longueur d'onde. Pour que l'intensité du rayonnement X réémis soit observable, il faut que les rayonnements diffusés par les différents atomes du cristal soient en phase et forment ainsi un faisceau diffracté.

Cette condition de diffraction est illustrée sur la figure (II.30) et connue sous le nom de loi de Bragg qui s'exprime sous la forme :

$$\boxed{2d_{hkl} \sin \theta_{hkl} = n \lambda} \dots\dots\dots(\text{II.4}).$$

Avec :

d : Distance entre deux plans réticulaires consécutifs.

θ : Angle des rayons X incidents ou diffractés avec le plan réticulaire ;

n : Nombre entier appelé ordre de la réflexion ;

λ : Longueur d'onde.

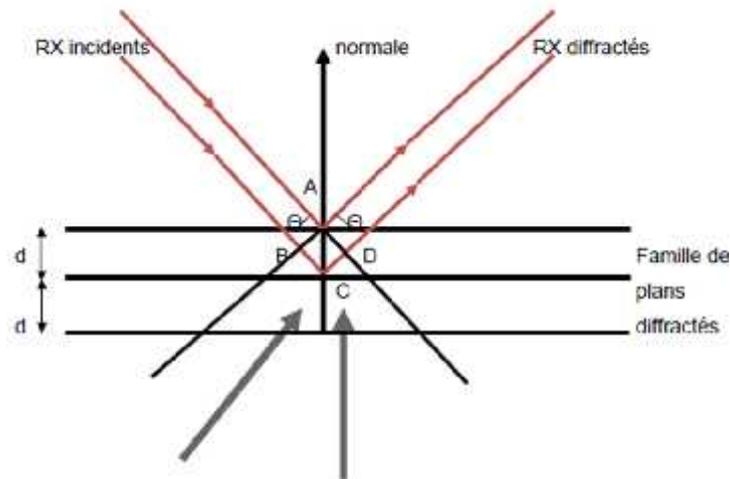


Figure II.30 : Démonstration de la loi de Bragg.

Cette loi montre que, pour un matériau donné et un faisceau de rayons X monochromatiques, il n'y aura diffraction des rayons X que pour des angles d'incidence zéro bien déterminés. Ces angles sont en relation avec les distances entre les plans réticulaires produisant les réflexions.

II.5.3. Diffractomètre :

Le **diffractomètre** est un appareil permettant de mesurer la diffraction d'une onde sur une cible. Au sein du laboratoire matériaux de URD-MA Dar El Baida Alger, on a utilisé un diffractomètre SEIFERT(XRD3003TT).

Il est composé d'une source de rayons-x (tube RX à une anticathode en cuivre), ce tube est caractérisé par un angle Ω , d'un support plat où les échantillons seront déposés et d'un détecteur qui enregistre l'intensité lumineuse diffractée en fonction de l'angle de diffraction ce détecteur est caractérisé par un angle θ .

L'acquisition de données se fera sur ordinateur via un logiciel d'acquisition (RAYFLEX).

La figure suivante est un schéma de l'installation de l'appareillage de diffraction des rayons X :

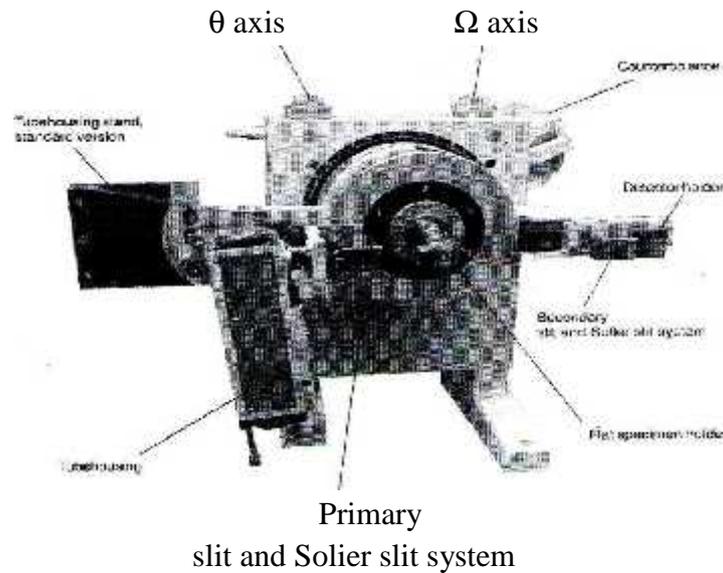


Figure II.31 : Schéma de l'installation de l'appareillage de diffraction des rayons X.



Figure II.32: Le diffractomètre SIEFERTXRD3003TT du laboratoire (URD-MA).

II.5.4. Réglage de l'appareil :

Après mise sous tension du diffractomètre, il faut procéder au préchauffage de tube. Les paramètres à régler sont la tension et le courant du tube à rayons X. La puissance de travail U_i est généralement prise entre **0.5** et **0.75** fois la puissance maximale du tube.

Il est à noter que la puissance maximale du tube dont dispose le laboratoire est de **2200 W**.

Il est préférable de tester différentes tensions pour choisir le point de fonctionnement.

Pour cela les paramètres choisis lors de l'essai sont :

Une tension $U = 30 \text{ KV}$;

Un courant $I = 40 \text{ mA}$.

Il est à souligner qu'avant d'entamer les essais il faut toujours mettre le Goniomètre aux valeurs de références suivantes:

$\Omega_0 = -4,092^\circ$; pour le tube

$\theta = -14,450$; pour le détecteur.

N.B

Avant d'effectuer n'importe quelle analyse il faut s'assurer que : La raie caractéristique $K\alpha$ de l'anticathode ne doit pas avoir une longueur d'anode plus courte que celle de la discontinuité K du matériau à étudier.

L'échantillon qu'on a analysé est utilisé comme étalon.

Pour lancer l'analyse il faut augmenter la tension de détecteur (Détecteur à scintillation SW 20/SE) jusqu'à **950V**, et définir un domaine de balayage.

En premier, on effectuera un balayage grossier pour $2\theta = 5^\circ$ jusqu'à **140°** (avec un pas de $0,5^\circ$) pour voir l'allure du diffractogramme afin de déterminer la position des pics caractéristiques. Après on procède à un balayage fin (avec un pas de $0,1^\circ$) pour avoir une meilleure résolution.

Pour l'échantillon analysé on a pris: $10^\circ < 2\theta < 120^\circ$ avec un pas de **0.1°/S**.

III .1.Introduction :

Ce chapitre comprend la présentation, l'interprétation, la discussion des résultats expérimentaux obtenus dans les différentes expériences. Ces microstructures concernent les différentes zones obtenues après le procédé de soudage en TIG.

Ainsi, le comportement de notre matériau lors du procédé de soudage TIG sera mieux connu, et de même pour le comportement mécanique de ce matériau.

III .2.Observation micrographique :

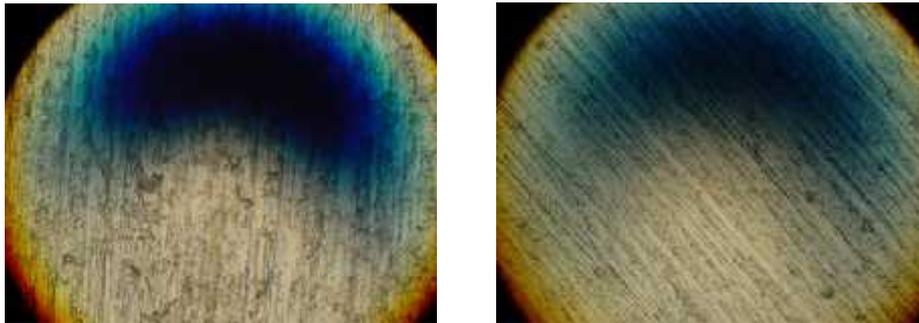


Figure III.1 : Résultat d'observation micrographique.

La multitude d'attaques chimiques que nous avons préparée et essayée ne nous a pas permis d'observer la structure microscopique.

L'alliage étudié étant à propriétés et utilisation spécifiques, il aurait fallu persévérer dans la recherche de l'optimisation des conditions de préparation et d'application de l'attaque chimique.

III .3.L'essai de microdureté :

Nous avons effectué un essai de microdureté sur les éprouvettes soudées. La procédure s'est effectuée tout en balayant le métal de base, la zone affectée thermiquement et la zone fondue. Cet essai a permis d'observer la variation de la microdureté pour chaque zone.

On a pris comme paramètres :

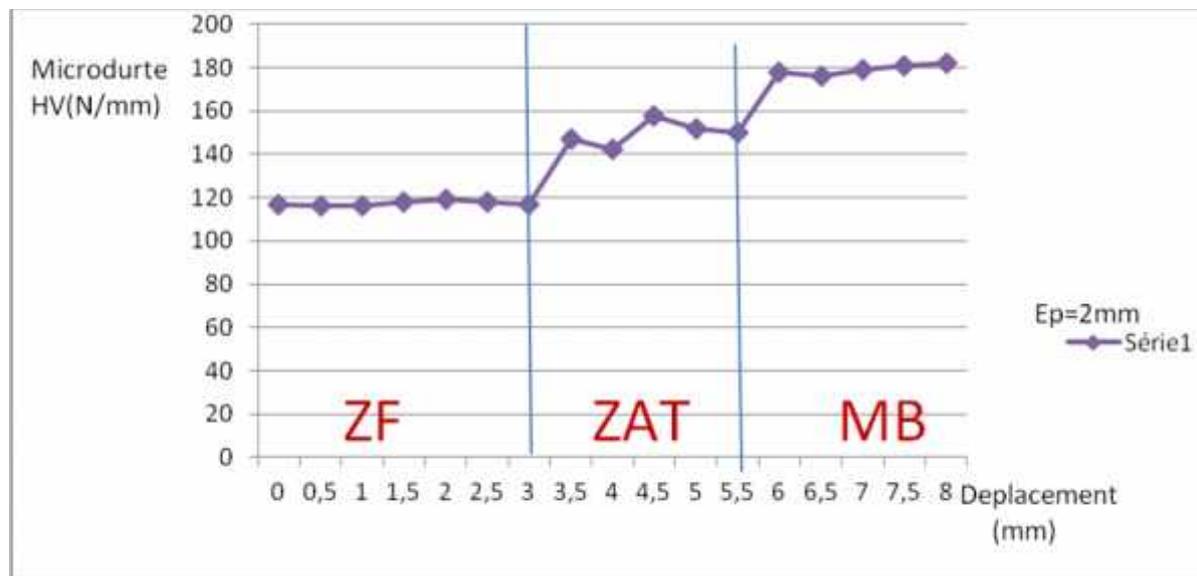
- La charge : 300g.
- Le temps (t) =15s.
- Le pas (p)=0.5 mm.

Les résultats obtenus sont présentés sous forme de tableau (III.1).

Tableau III.1 : Paramètres et résultats de l'essai Vickers.

Position par rapport au centre en (mm).	Dureté Vickers HV (N/mm ²).	La moyenne de HV en (N/mm ²)
0	117	117.285
0.5	116	
1	116	
1.5	118	
2	119	
2.5	118	
3	117	
3.5	147	149.8
4	142	
4.5	158	
5	152	
5.5	150	
6	178	179.2
6.5	176	
7	179	
7.5	181	
8	182	

-On traduit les résultats du tableau sur un graphe.

**Figure III.2** : Microdureté de l'échantillon soudé.

Les résultats du graphe montrent que la valeur est toujours maximale dans le métal de base tandis que la valeur de la zone affectée thermiquement est supérieure à celle de la zone fondue.

On remarque d'après l'analyse du tableau III.1 que la moyenne de la microdureté varie d'une zone à l'autre.

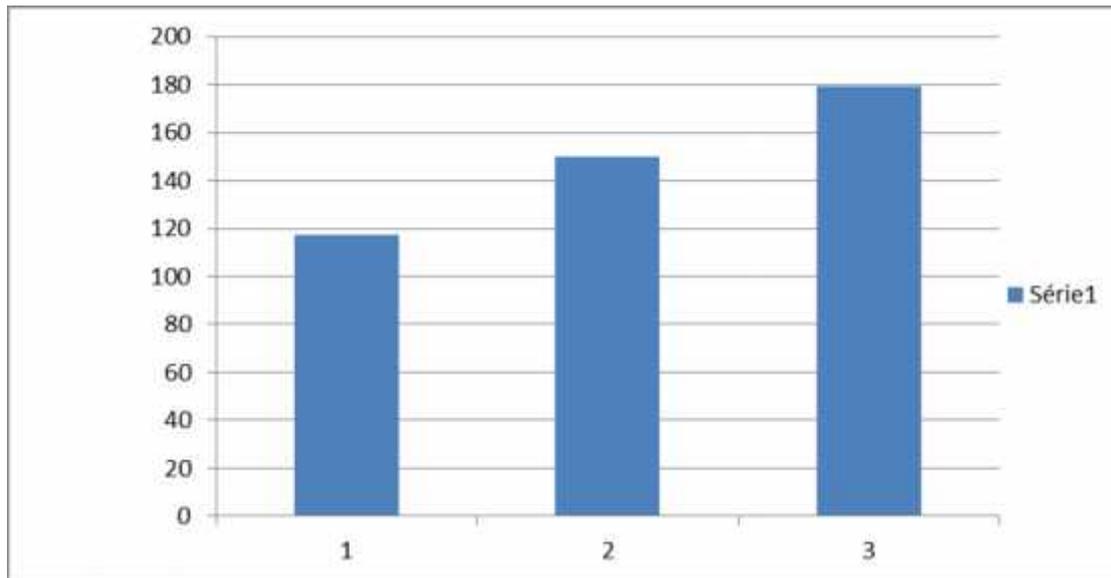


Figure III.3 : Evolution de la dureté de l'échantillon soudé.

Comme il a été mentionné auparavant, l'énergie du soudage fragilise la zone fondue. On peut résumer ces résultats sous la forme suivante :

$$HV_{MB} > HV_{ZAT} > HV_{ZF}$$

La zone fondue présente un réseau dendritique équiaxial. La microstructure fine de la zone fondue est due au refroidissement rapide dans cette zone. Le procédé de soudage est considéré comme un effet négatif sur la zone fondue (fusion et solidification). Aussi, et dans cette zone, la microstructure est principalement dépendante des conditions de solidification à savoir le taux de croissance, le gradient de température et la diffusion. Le phénomène de précipitation est limité par la formation d'un constituant eutectique à la fin de la solidification et où se précipitent la majorité des éléments de notre alliage.

Cependant, et dans la zone affectée thermiquement, la microstructure est principalement dominée par 2 types de réaction à l'état solide :

- Une dissolution du précipité et une coalescence du grain dans la zone soumise à une température très élevée,
- Une dissolution partielle du précipité et une transformation d'une phase métastable à une phase stable dans la zone soumise à une faible température.

Dans la zone de transition formée entre la zone affectée thermiquement et la zone fondue, on remarque la présence des mêmes caractéristiques que l'on trouve généralement dans les alliages d'aluminium. Le changement des dimensions des grains n'est pas important après le soudage.

D'après notre recherche bibliographique, notre alliage est constitué d'éléments d'addition majoritaires et confèrent au matériel l'essentiel de sa résistance mécanique.

Ils proviennent de la décomposition à relativement basse température de la solution solide.

Certains paramètres doivent être pris en considération comme :

- Les conditions de la trempe,
- Le vieillissement,
- D'autres traitements thermiques.

Après la mise en solution et la maturation, des précipitations directes apparaissent.

A des températures comprises entre 25°C et 100°C, la solution solide se décompose pour former des zones GP. Ces zones ont la même structure cristallographique que la matrice. Aussi, la décomposition de la solution solide sursaturée apparaît lors de la formation des zones GP (Guinier Preston). Plusieurs séquences de décomposition de la solution solide sont possibles faisant intervenir des phases métastables et stables.

Le choix de la séquence est fonction de la composition de l'alliage. La séquence T à l'équilibre est favorisée pour une teneur en magnésium supérieure à 2% en masse mais peut ne pas être observée au détriment de celle donnant , notamment lors de traitements à basse température.

III .4.Essais de résilience :

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.

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

- Préparation facile.
- 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.

Tableau III.2 : Résultat de l'essai de résilience.

Désignation	Energie absorbée. A_v (J).	Section. S (cm²).	Résilience. Q_k (J/cm).
1 (éprouvette non soudée).	14.003	1	14.003
2 (éprouvette soudée avec un caniveau).	1.787	0.5	3.574
3 (éprouvette soudée).	2.084	0.5	4.168

D'après les résultats du tableau (III.2) on remarque une grande différence entre l'éprouvette soudée et non soudée et cela due à la fragilisation de matériau lors de soudage cause du changement de la structure primaire en plus la dislocation des cristaux entre eux.

D'autre part, les défauts (dans notre cas un caniveau) aussi ont une influence sur la résilience, on

remarque que : $Q_k(\text{soudée}) > Q_k(\text{soudée avec un caniveau})$

III .5. Essai de traction :

L'objectif de cet essai est de mesurer les courbes de traction sur notre matériau et d'interpréter les résultats comme la détermination de la limite élastique, l'allongement à rupture, etc...,

Nous rappelons que cet essai a été exécuté sur des éprouvettes normalisées pour l'obtention des caractéristiques mécaniques : le module d'élasticité, la limite élastique conventionnelle, la limite apparente d'élasticité supérieure/inférieure, la résistance à la traction et l'allongement à la rupture.

Manipulation : Epaisseur 2 mm ; V=3 mm/min.

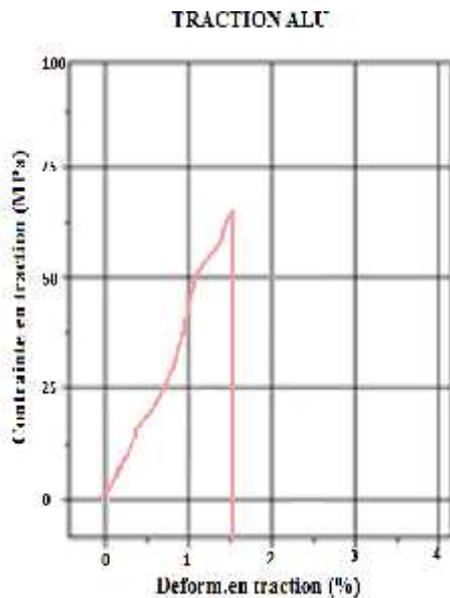


Figure III.4 : 1^{ère} courbe de traction.

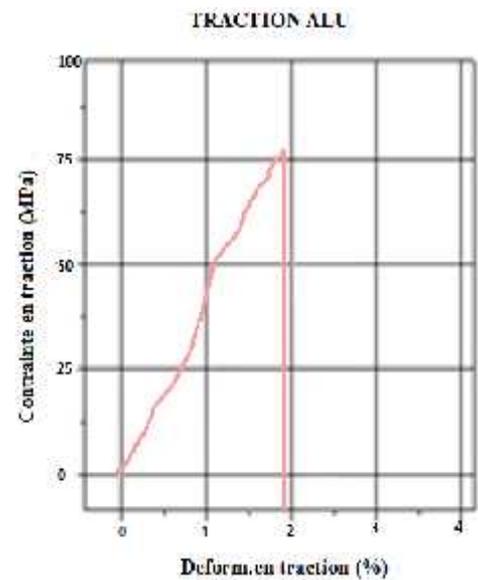


Figure III.5 : 2^{ème} courbe de traction.

Tableau III .3 : Résultat de la manipulation.

Numéro de la Manipulation	Epaisseur de L'éprouvette (mm).	Charge Max (KN).	Contrainte Max (MPa).	Déformation a la rupture (%).
1	2	3.1	62	1.51
2	2	5.11	77.42	1.89

A travers les résultats, on remarque que la limite d'élasticité a une faible valeur. Cela est peut être due aux paramètres suivants :

- Le procédé de soudage s'est mal déroulé (mauvaise pénétration et paramètres de soudage inadéquats),
- Un mauvais chanfrein a été préparé (présence de jeu entre les deux tôles),
- Absence de nettoyage des plaques avant le soudage.

Une autre remarque est la présence de soufflures. Cela est peut être due aux paramètres suivants :

- Les pièces ont été probablement contaminées (surfaces sales ou humides),
- La présence d'un défaut d'étanchéité de la torche de soudage,
- Un arc de soudage trop long.

III .5.Essais d'AMD :

Résultat de l'échantillon soudé :



Figure III.6 : Echantillon soudée après l'essai d'AMD.

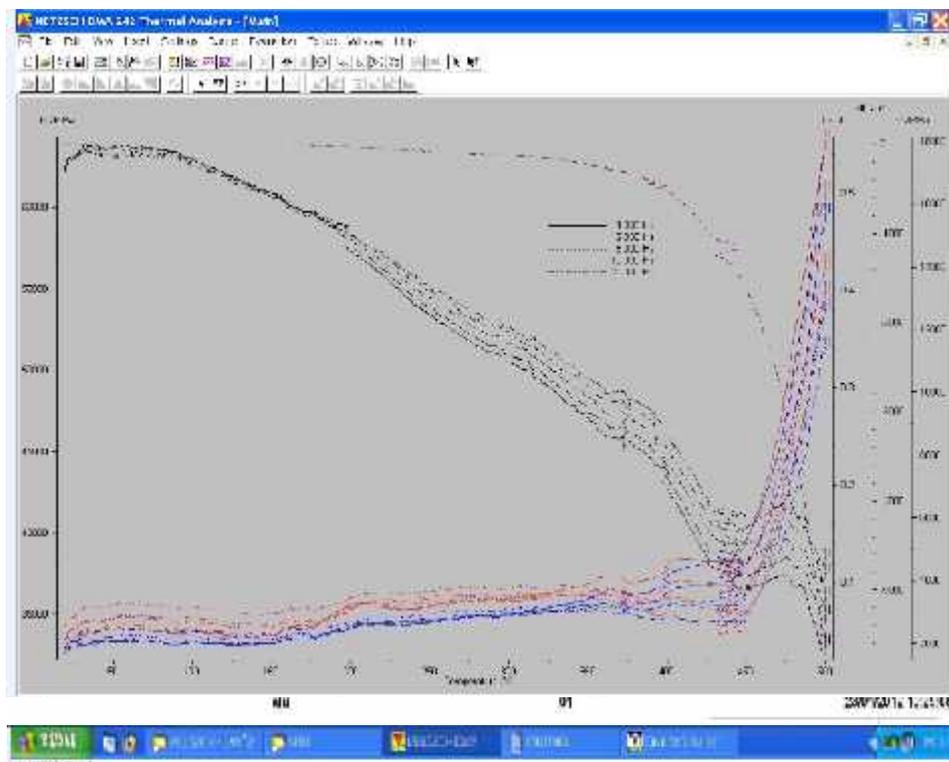


Figure III.7 : Résultat de l'échantillon soudé.

Sur la base des courbes obtenues, on dresse les propriétés mécaniques initiales du matériau :

A 25 °C :

- La déformation : =0 % ;
- Le module de stockage ou (élastique) : $E' \sim 65\text{GPa}$;

- Le module de perte : $E'' = 2.3 \text{ GPa}$;
- L'amortissement (ou déphasage) : $\tan \delta = 0.037$.

Pour une bonne visualisations des résultats on découpe la figure(III.7) selon les courbes suivant :

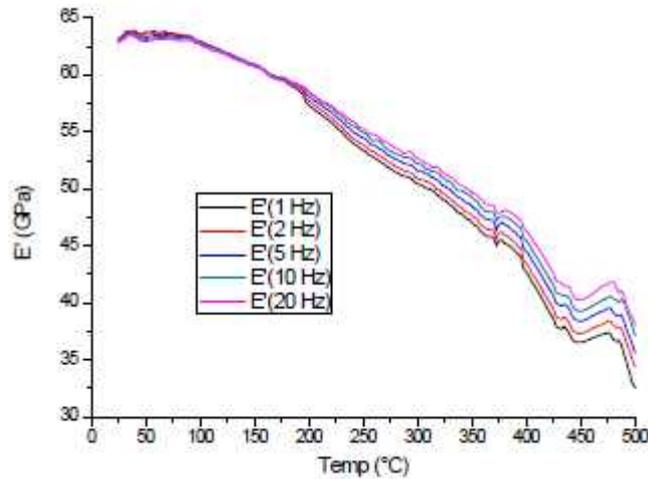


Figure III.8 : Module conservatif en fonction de la température à différentes fréquences de sollicitations.

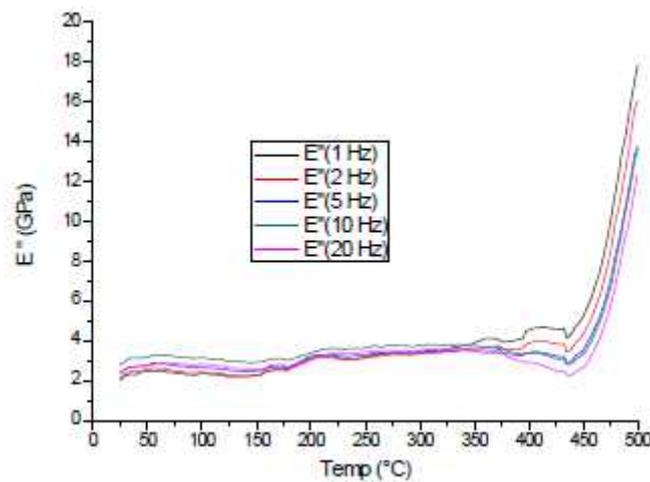


Figure. III.9 : Module de perte en fonction de la température à différentes fréquences de sollicitations.

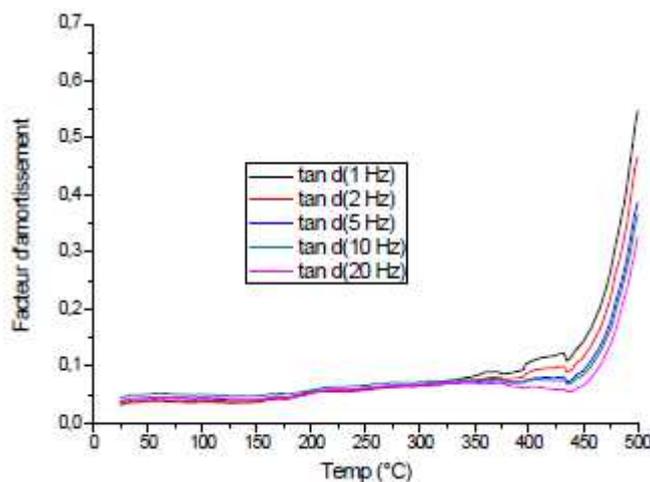


Figure III.10 : Déphasage (facteur de perte ou amortissement) à différentes fréquences de sollicitations en fonction de la température.

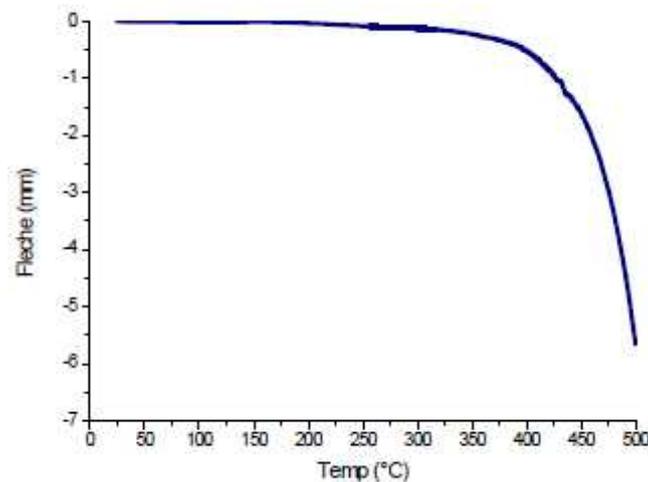


Figure III.11 : Flèche de la flexion en fonction de la température.

Pour le soudage qui implique de chauffer localement le métal, on peut donc le considérer comme un traitement thermique local. Il y a donc une modification locale de la microstructure et de l'état métallurgique de la zone du métal affectée par le chauffage (ZAT : zone affectée thermiquement). En effet, le cycle de température inhérent au soudage perturbe les conditions d'équilibre et les propriétés telles qu'elles existaient à la livraison du matériau. Le chauffage active un certain nombre de mécanismes, dont notamment la diffusion des atomes. Il se produit donc un phénomène appelé "ségrégation" : le métal n'étant pas pur, les atomes étrangers (impuretés, éléments d'alliage) migrent vers les joints de grain. Ceci peut entraîner une fragilisation des joints de grain, pouvant ainsi faciliter la rupture fragile intergranulaire. Ces problématiques concernent aussi bien la zone fondue (qui est passée à l'état liquide au cours de l'opération de soudage) que la zone affectée thermiquement. La zone « ZAT » est le siège de modifications métallurgiques du métal de base qui peuvent induire des fragilités, des baisses de résistance mécanique. Cette baisse de résistance est caractérisée par la chute de rigidité du matériau lors des différents cycles de soudage. L'évolution de cette baisse de rigidité en fonction de la température est montrée sur la courbe (Figure III.7). On distingue sur cette courbe une évolution du module élastique selon trois phases :

Phase 1 (de 25 °C à 100 °C) :

L'évolution du module de conservation en fonction de la température est quasi linéaire (Figure III.8), même chose concernant le module de perte (Figure III.9), on remarque que l'allure est constante et la déformation due à la flexion ne change pas de valeur. On constate aussi que le matériau garde de manière constante cette propriété ce qui traduit par une absence de déformation (Figure III.11) jusqu'au seuil suivant.

Phase 2 (de 100 °C à 400 °C) :

Dans cette partie, on obtient un début de perte de rigidité du matériau en fonction de la température (Figure III.9), définit par une pente, contrairement au module de perte qui augmente de valeur (Figure III.11), la différence de la valeur du module de conservation entre les températures 100 °C à 400 °C est de 20 GPa, le matériau est toujours dans le domaine élastique même si la valeur du module de conservation décroît, car la flèche due à la flexion est caractérisée par une petite déformation de l'ordre de 0.5 mm (Figure III.8).

Phase 3 (de 400 °C à 500 °C) :

Cette phase est synonyme de ruine pour le matériau. En effet, on remarque une baisse très rapide du module de conservation E' (Figure III.8), et une perte de rigidité totale. La déformation représentée, par la flèche due à la flexion, passe de 0.5 à 6 mm (Figure III.11). Ceci explique le passage du matériau dans le domaine plastique défini par une déformation irréversible et l'endommagement. Parallèlement à ces résultats, on peut aussi caractériser l'évolution de l'amortissement en fonction de la température (Figure III.7).

E'' et la déformation due à la flexion (Flèche). Les résultats indiquent que, l'analyseur viscoélastique (AMD) trouve son meilleur potentiel de caractérisation d'alliages à différentes températures. En effet, la connaissance de modules élastiques en fonction de la température est d'une importance primordiale pour le calcul de contraintes sous hautes températures. La précision de la méthode utilisant un AMD est possible grâce à l'uniformité de la température dans l'échantillon, pour mesurer la sensibilité aux petits déplacements et de son contrôle excellent par rapport à la force appliquée.

III .6.Diffraction des rayons x :

La méthode de choix pour l'étude des systèmes de cristallins est la diffraction par les rayons X. Cette méthode permet d'analyser des déformations élastiques du réseau cristallin du matériau. Cependant, et selon les conditions expérimentales et la microstructure de notre matériau, l'information recueillie peut aller d'une déformation très locale au sein d'un réseau cristallin jusqu'à une déformation moyenne d'un ensemble de réseaux cristallins. En pratique, différentes échelles sont définies auxquelles sont associés différents ordres de contraintes internes.

A travers la recherche bibliographique, les alliages métalliques subissent des transformations de phases lors de l'application des traitements thermiques. Ce processus se traduit par une absorption ou par un dégagement de l'énergie. Pour illustrer ce processus, cette analyse peut être un moyen qualitatif et quantitatif rapide pour la caractérisation des précipités de notre matériau. Aussi, son application permettra de mettre en évidence les phases présentes dans notre matériau.

Le spectre de diffraction RX des différents échantillons soudés et traités montrent que les pics de diffraction de la solution solide sursaturée correspondent aux différents traitements thermiques utilisés lors de nos différentes expériences. Les structures des échantillons soudés et traités dans la zone affectée thermiquement sont presque identiques. Dans la zone fondue, des variations de précipitation apparaissent, notamment au niveau des bandes de solutés.

Le spectre de diffraction des rayons X de l'échantillon de l'Au4G est donné par la figure suivante :

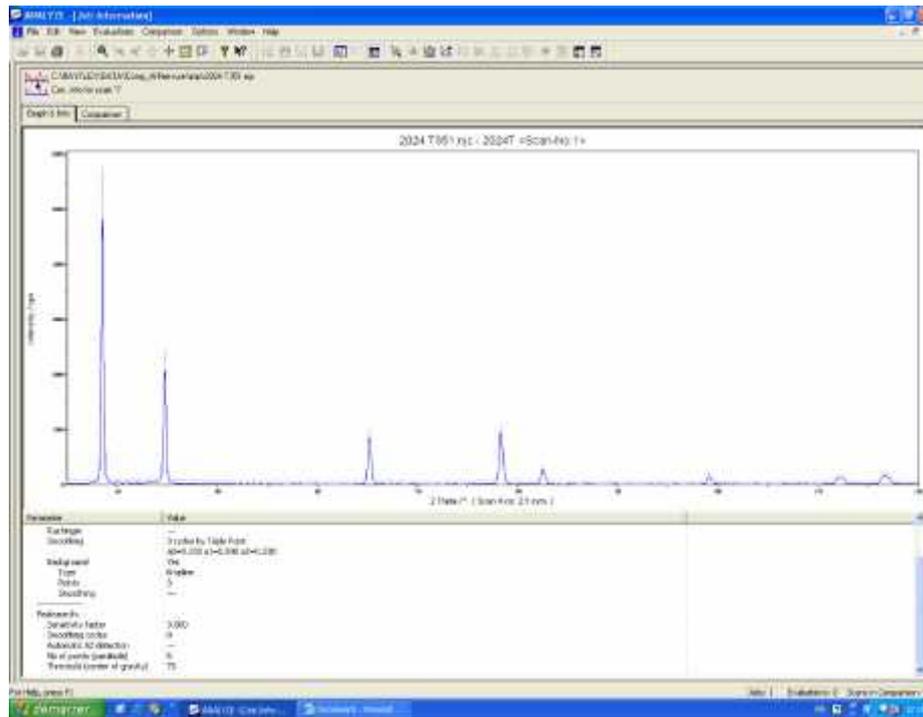


Figure III.13 : Spectre de diffraction des rayons X de l'échantillon Al 2024(1).

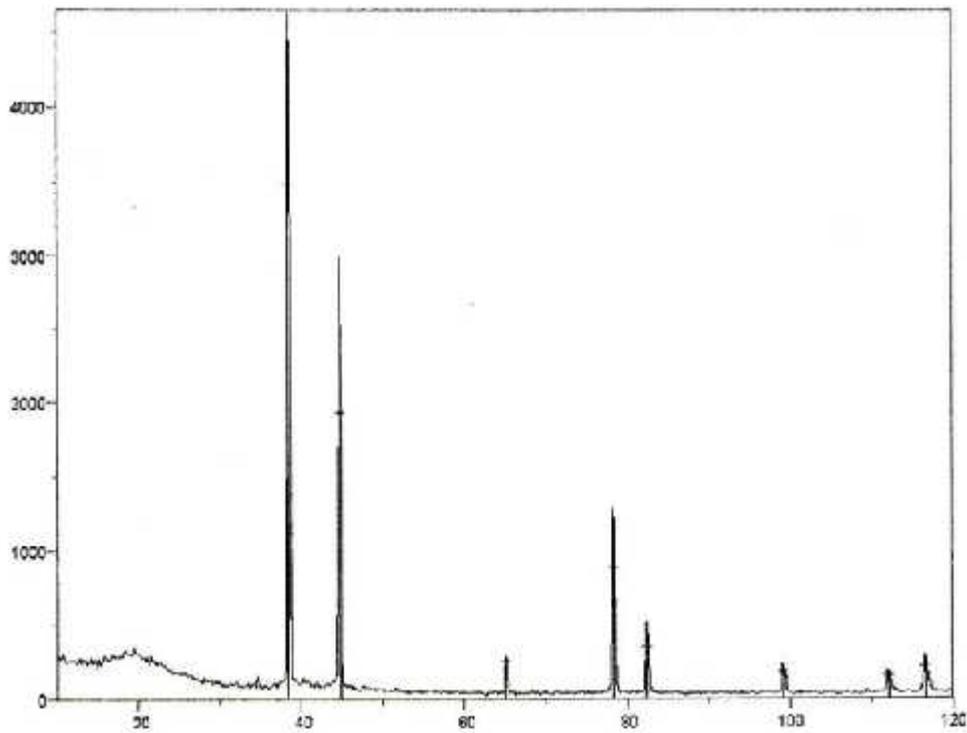


Figure III.14 : Spectre de diffraction des rayons X de l'échantillon Al 2024(2).

Le logiciel d'analyse nous a donné aussi le tableau suivant : (voir Annexe B)

Tableau III.4 : Tableau donné par le logiciel d'analyse.

N°	2_{θ}	d(A°)	I (%)
1	38.4362	2.3402	100
2	44.771	2.0224	55
3	65.1533	1.4306	7
4	78.2357	1.2209	25
5	82.4311	1.1691	10
6	99.1954	0.0115	5
7	112.1507	0.9283	4
8	116.6735	0.9050	6

Et à partir des données de tableau précédent on peut obtenir les indices de Miller et le réseau cristallin de l'Au4G comme suit:

Tableau III.5: indice de Miller et le réseau cristallin de l'Au4G.

Sin^2_{θ}	$\text{Sin}^2_{\theta}/0.108$	$(\text{Sin}^2_{\theta}/0.108)*3$	hkl
0.108	1	3	111
0.145	1.34	4	200
0.289	2.67	8	220
0.398	3.68	11	311
0.434	4.01	12	222
0.579	5.36	16	400
0.688	6.37	19	331
0.724	6.70	20	420

On constate que le réseau cristallin de l'Au4G (2024) est **cubique à faces centrées**.

Remarque : pour AL2024 on n'a pas réussi à trouver le fichier ASTM correspond.

L'analyse par diffraction des rayons X ou diffractométrie X permet de déterminer les distances interatomiques et l'arrangement des atomes dans les réseaux cristallins.

Comme les rayons X sont diffractés de façon différente par les éléments du réseau suivant la construction de ce dernier, l'irradiation de la matière par rayons X permet de connaître sa nature cristallographique.

Le problème de trouver la structure d'une phase cristalline inconnue à partir des diagrammes de diffraction des rayons X est un problème fondamental, mais très complexe. C'est un travail de laboratoire spécialisé, qui fait généralement appel à des moyens de calcul puissants.

Dans notre étude on a fait l'analyse d'échantillon AL2024 et puisque la base de données du logiciel utilisé n'est pas complète on a trouvé un autre moyen pour donner un sens aux résultats obtenus, qui est un logiciel qui regroupe les fichiers ASTM de plusieurs matériaux, donc on a utilisé ce logiciel soit pour confirmer nos interprétations concernant l'échantillon qui a un réseau cristallin cubique simple.

IV .1.Introduction :

L'observation d'un phénomène conduit toujours les scientifiques à une modélisation qui s'accompagne elle-même d'une mise en équation du problème étudié ; très souvent, les modèles obtenus sont constitués par des équations différentielles. Par ailleurs les récents progrès du calcul automatique ont permis la mise en œuvre de méthodes de calcul qu'il n'était pas concevable d'envisager auparavant. Ces méthodes numériques ont permis notamment :

- La possibilité d'effectuer une grande quantité de calculs dans des temps très brefs.
- La prise en compte de non-linéarité dans toutes sortes d'équations.
- Une analyse d'erreur systématique.
- Une analyse de la stabilité des schémas numériques.
- Des procédés de parallélisations efficaces sur machines multiprocesseurs.

IV .1.1.Principe :

Les méthodes de discrétisation les plus connues sont :

- Méthodes des différences finies (MDF).
- Méthodes des éléments finis (MEF).
- Méthodes des volumes finis (MVF).

IV .1.2.Rappel sur la méthode de (MEF) :

IV .1.2.1.Méthode des éléments finis :

La méthode des éléments finis fait partie des outils de mathématiques appliquées. Il s'agit de mettre en place, à l'aide des principes hérités de la formulation variationnelle ou formulation faible, un algorithme discret mathématique permettant de rechercher une solution approchée d'une équation aux dérivées partielles (ou EDP) sur un domaine compact avec des conditions aux bords et/ou dans l'intérieur du compact. On parle couramment de conditions de type Dirichlet (valeurs aux bords) ou Neumann (gradients aux bords) ou de Robin (relation gradient/valeurs sur le bord).

Il s'agit donc avant tout de la résolution approchée d'un problème, grâce à la formulation variationnelle, les solutions du problème vérifient des conditions d'existence les plus faibles que celles des solutions du problème de départ et où une discrétisation permet de trouver une solution approchée. Comme de nombreuses autres méthodes numériques, outre l'algorithme de résolution en soi, se posent les questions de qualité de la discrétisation :

- Existence de solutions,
- Unicité de la solution,
- Stabilité et bien sûr : mesure d'erreur entre une solution discrète et une solution unique du problème initial.

IV .1.3.Avantages :

Le calcul numérique :

- Permet le calcul d'une solution numérique pour presque tous les problèmes pratiques ayant un modèle mathématique ;
- A un coût très faible, ayant une tendance à la baisse ;
- Présente de la rapidité (permet de modifier la géométrie, les conditions aux limites, etc.) ;
- Présente une information complète sur tous les champs, tous les points et à tout instant
- A la possibilité de simuler des conditions réelles exceptionnelles ;
- A la possibilité de simuler des conditions idéales.

IV .1.4.Inconvénients :

- Tout dépend du modèle mathématique initial ;
- Difficulté pour sélectionner la "bonne" solution en cas de solutions multiples au Problème mathématique ;
- Parfois, plus coûteux que l'expérience.

IV .2.La source de chaleur :

Il existe trois modèles de représentation de la source de chaleur :

IV .2.1.Source de chaleur ponctuelle :

L'énergie électrique délivrée par l'arc est assimilée à une source de chaleur ponctuelle mobile avec une vitesse constante v . Cette énergie est définie par :

$$Q = \gamma UI \dots\dots\dots(IV.1).$$

Ou :

γ : Rendement thermique de l'arc ;

U : Tension de soudage (V) ;

I : Courant de soudage (A).

Le modèle de source ponctuelle ne fournit pas de renseignements quantitatifs au sujet de la dimension ou la forme du bain fondu.

IV .2.2.Source de chaleur Gaussienne :

On propose deux formulations de la répartition d'énergie :

- La première formulation est un volume Gaussien de révolution de type :

$$q = q_{\max} e^{\left(\frac{1}{2\uparrow^2} r^2\right)} \dots\dots\dots(IV.2).$$

Lorsque \uparrow tend vers ∞ on retrouve le cas de source point.

- La seconde formulation est basée sur la considération d'une distribution volumique de la source de chaleur dans le joint soudé. Cette source de chaleur s'apparaît à la forme du bain de fusion qui se déplace sous l'électrode et nous considérons qu'il s'agit d'une forme ellipsoïdale.

$$q(x, y, z) = \frac{3\sqrt{3}}{abc\sqrt{f}} e^{-\frac{3x^2}{a^2} - \frac{3y^2}{b^2} - \frac{3z^2}{c^2}} \dots\dots\dots(IV.3).$$

IV .2.3 Source de chaleur en segments de lignes :

Dans ce modèle, la source de chaleur est composée de segments de lignes, chaque segment correspond à la direction du transfert thermique dans le bain de fusion. Par exemple, le transfert thermique dans la direction de pénétration (profondeur) dû au jet de plasma est approximativement exprimé avec un segment de chaleur dans la direction de l'écoulement dans le bain de fusion. Les longueurs des segments de lignes de chaleur sont déterminées en se basant sur les observations expérimentales de la forme géométrique du bain de fusion.

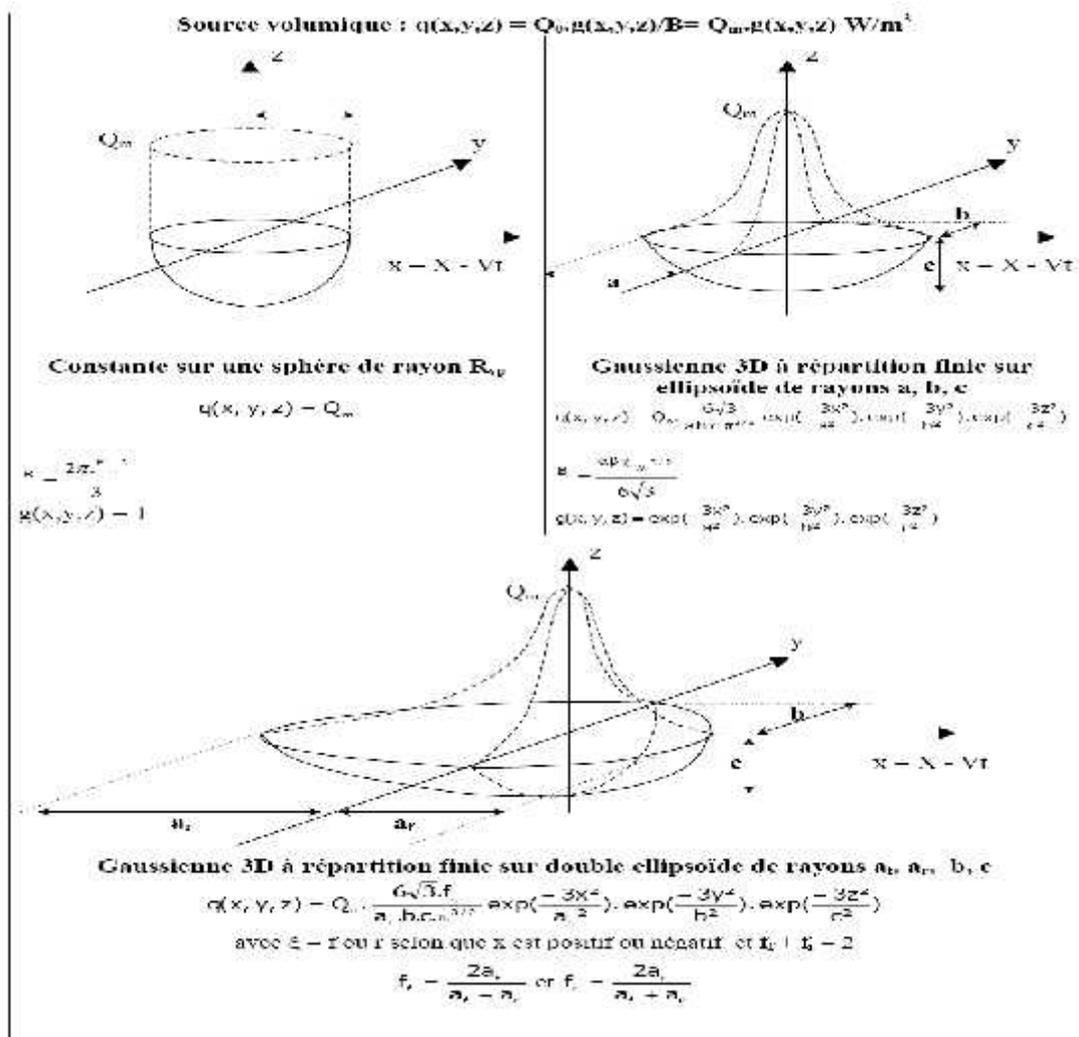


Figure IV.1 : Exemple de modèles de source volumiques.

IV .3.Les composantes d'un logiciel de modélisation et de simulation numérique :

La mise en œuvre d'une méthode numérique de calcul débouche inévitablement sur un logiciel qui lui est associé. Si, lors des premières tentatives de calcul par des méthodes numériques, on écrivait, pour chaque nouveau problème, un programme différent tenant compte de sa géométrie particulière, de ses particularités physiques et de ses conditions aux limites, on s'oriente aujourd'hui vers la réalisation de logiciels généraux dont la structure informatique est adaptée au traitement d'un grand nombre de problème du même type. Ces logiciels ont, pratiquement tous, trois composantes principales : (1) **un préprocesseur**, (2) **un processeur de calcul** (solver = résoudre) et (3) **un post processeur**.

Par la suite, on examine les fonctions de chaque composante dans un contexte général.

IV .4.Le maillage :

Le maillage est une partie importante de la modélisation des problèmes thermique par la méthode des éléments finis. Il existe plusieurs types du domaine selon la forme de sa frontière, ainsi qu'il existe plusieurs techniques de génération de maillage, selon le degré de complexité du même domaine.

Un maillage doit toujours vérifier les conditions suivantes :

- Une adaptation aux frontières, et aux conditions aux limites.
- Une adaptation aux propriétés des différentes régions du domaine physique.

Pour cela, le développement des méthodes de discrétisation rapides et efficaces est l'objectif principal de cette procédure.

IV .5.Objectif de ce travail :

L'utilisation des modèles de simulation du soudage dans un cadre industriel est axée sur la prédiction des contraintes et déformations résiduelles. Pour cela, il est nécessaire d'identifier le chargement thermique imposé à l'assemblage au cours de l'opération de soudage et plus particulièrement d'estimer les dimensions du cordon de soudure.

Notre objectif est de développer une méthode prédictive qui permet d'estimer les dimensions d'un cordon pour des paramètres opératoires de soudage connus.

Dans notre problème du soudage, on a deux plaques rectangulaires, comme cité auparavant, on va appliquer la discrétisation géométrique sur les deux plaques. (Le programme de la résolution est sur Annexe A).

Ce travail vise à :

- ✓ Contribuer à la compréhension des phénomènes thermiques induits lors l'opération de soudage en TIG.
- ✓ Modélisation de la source de chaleur par une forme Bi-elliptique avec une distribution surfacique Gaussienne de du flux de chaleur de l'arc.
- ✓ Développement d'un code de calcul en utilisant la méthode EF pour la simulation du soudage.
- ✓ Evaluer les champs dans les assemblages soudés et l'étendu des zones à risque (ZAT et ZF).

IV .6.Hypothèses principales :

L'étude du transfert thermique d'une opération de soudage a pour but d'assurer un joint de qualité. Donc les caractéristiques finales d'un cordon de soudure au point de vue métallurgique et mécanique dépendent de la distribution de la température, cette dernière est basée sur la résolution de l'équation fondamentale régissant l'écoulement du flux de chaleur par conduction. Pour cela il est nécessaire d'évoquer et de noter certaines hypothèses :

- Le régime est transitoire et bidimensionnel (x, y, t) ;
- La direction de soudage s'effectue selon l'axe 'x' ;
- Les propriétés thermiques (K , ... et Cp) du matériau sont fixe ;
- L'écoulement du bain de fusion est négligeable ;
- Convection libre, refroidissement naturel (air ambiant) ;
- La source de chaleur est mobile et répartie selon une distribution surfacique Gaussienne de forme $S(x, y, t)$;
- Soudage à modéliser sans métal d'apport.

Tableau IV.1 : Propriétés de matériaux utilisés.

Propriétés de matériaux.	Conductivité thermique. λ (J kg ⁻¹ K ⁻¹).	Densité du matériau. ... (kg m ⁻³).	Chaleur spécifique. C_p (J kg ⁻¹ K ⁻¹)
Valeur.	221	2790	899

- **Géométrie de la plaque :**

Longueur : 0.04 (m);
 Largeur : 0.04 (m);
 Epaisseur : 0.01 (m). } 4x4x1 (mm).

- **Vitesse d'avance :** $V = 0.05$ (m/s).

- **Le temps :** $T = L/V(s)$. $L = 0.01$ (Longueur d'élément pour le maillage).

IV .7.Les étapes de la simulation :

IV .7.1.Initialisation :

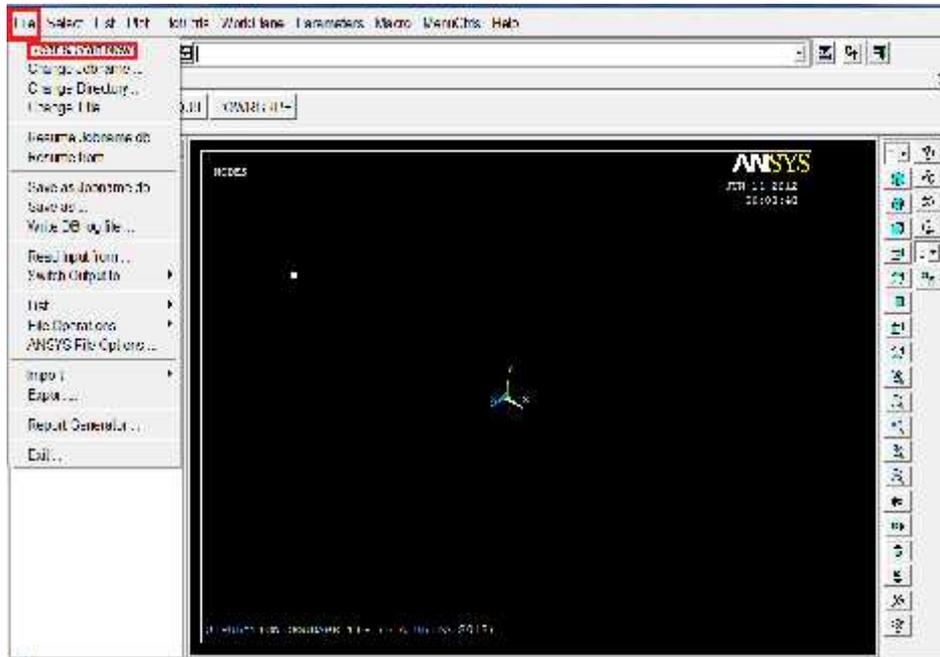


Figure IV.2 : Ouverture d'une nouvelle fenêtre.

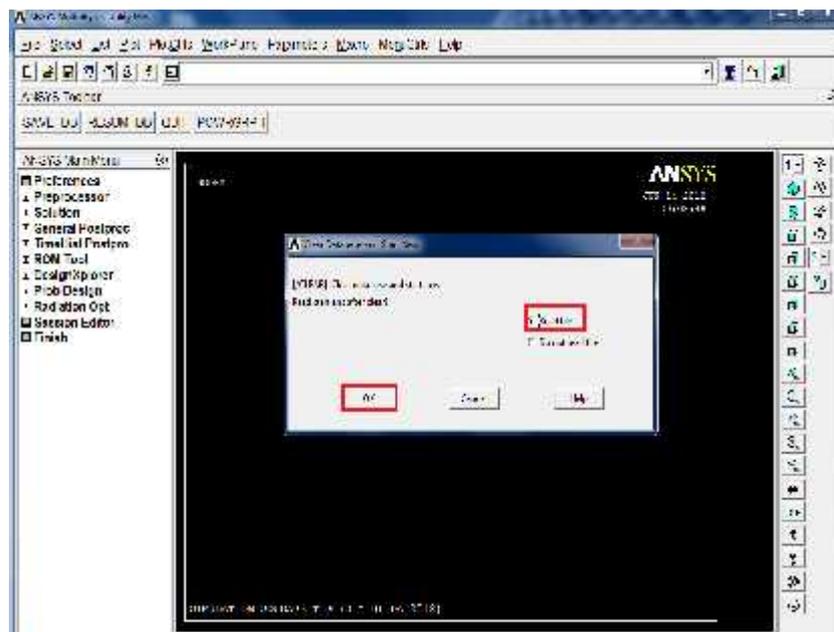


Figure IV.3 : Etape de manipulation.

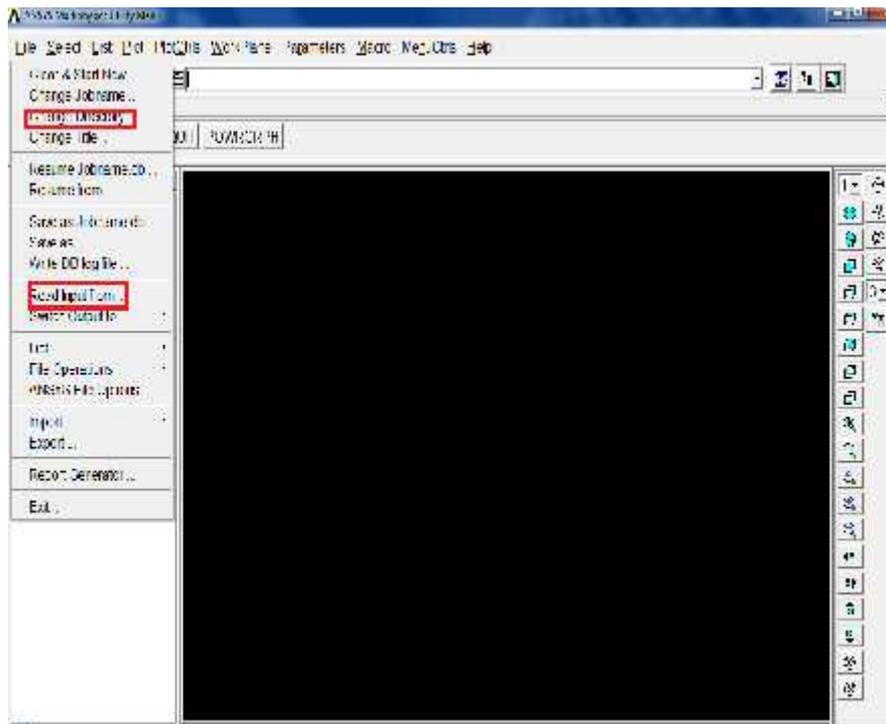


Figure IV.4: Avant le choix de fichier texte.

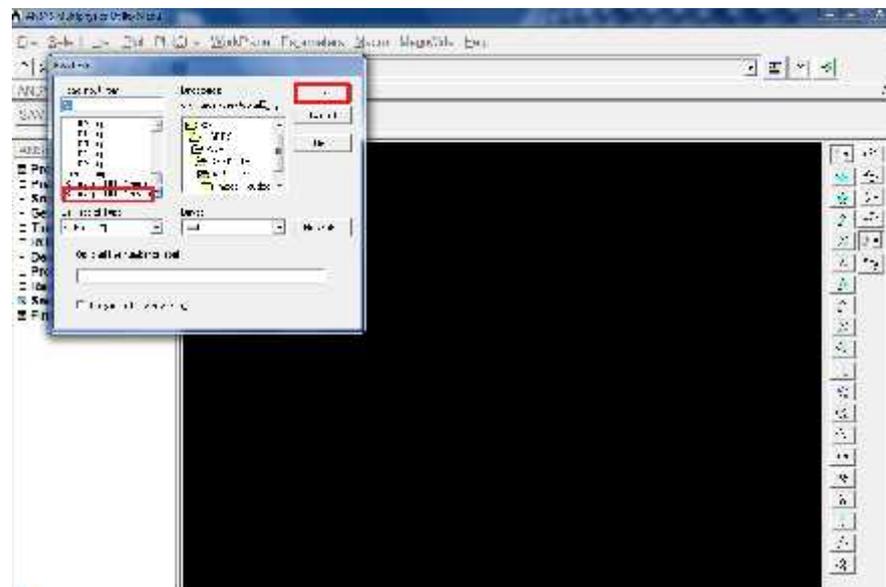


Figure IV.5: Le choix de fichier texte.

IV .7.2.Maillage de la structure :

On a réalisés un maillage quadrilatérale avec 40 subdivisions en longueur ,40 subdivisions en largeur et 4 subdivisions en profondeur.

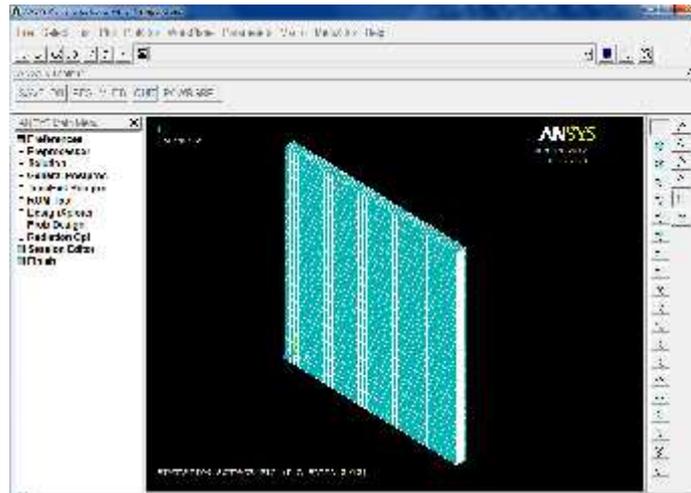


Figure IV.6 : Le résultat de la manipulation.

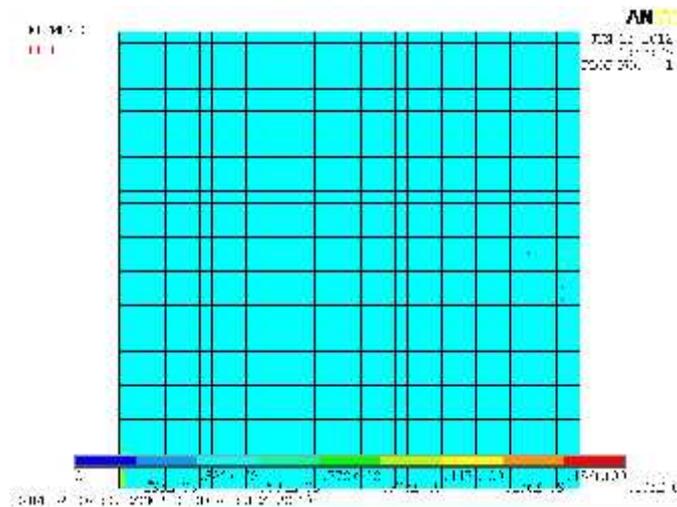


Figure IV.7: Maillage de la plaque sur le plan (x y).

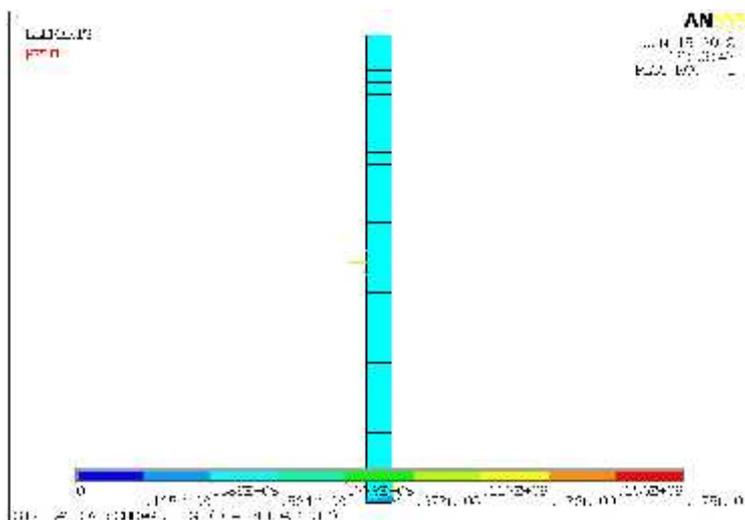


Figure IV.8: Vue du profil sur le maillage.

IV .7.3.Partie calcule : déplacement de la source de chaleur.

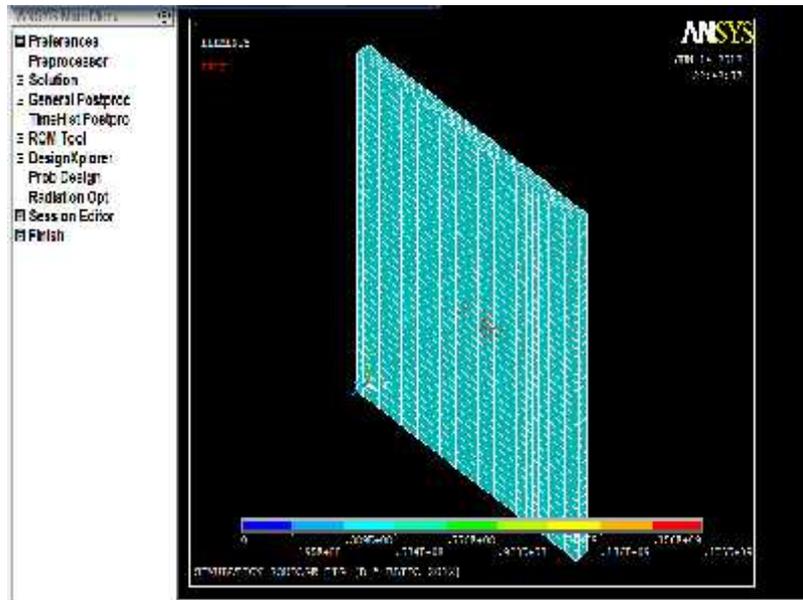


Figure IV.9: Déplacement de température entre les nœuds.

IV .7.4.Visualisation des résultats :

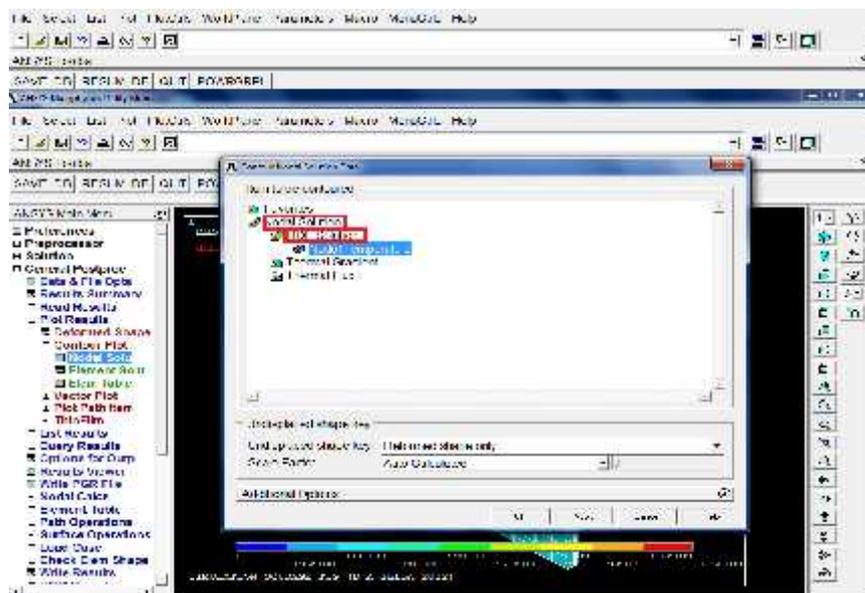


Figure IV.10 : Choix de solution nodal.

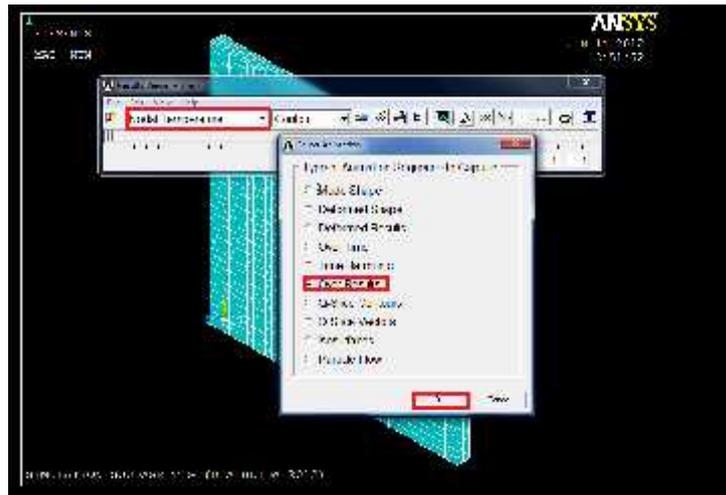


Figure. IV.11: Choix de température nodal.

IV .7.5.Animation de source de chaleur :

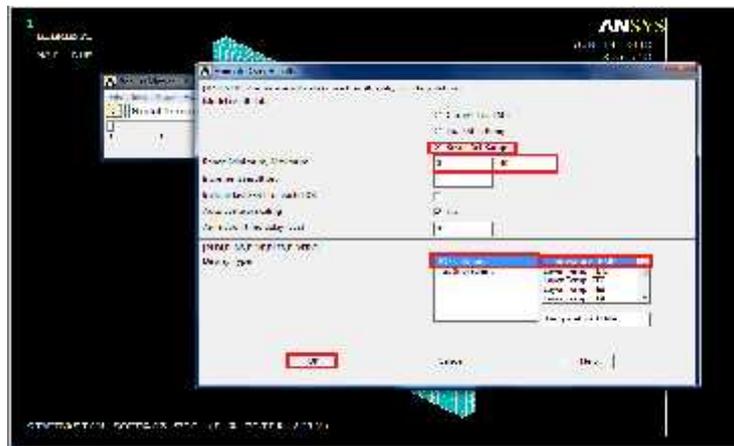


Figure IV.12 : Le nombre des nouds max et min.

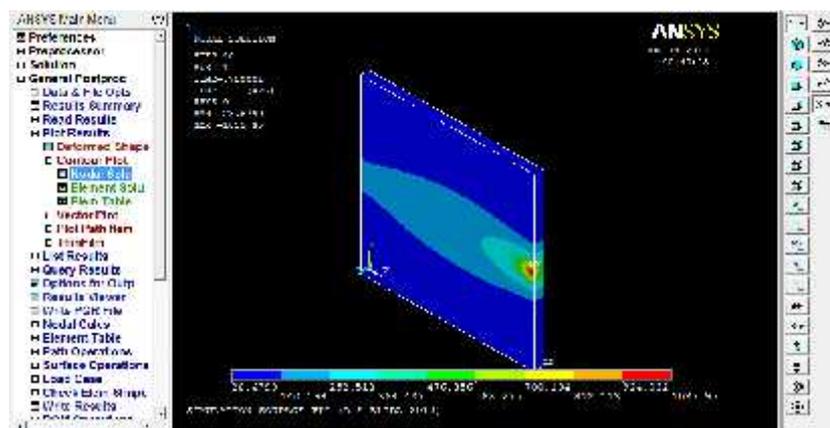


Figure IV.13 : L'exécution de la solution.

IV .7.5.1.Répartition de champs thermique:

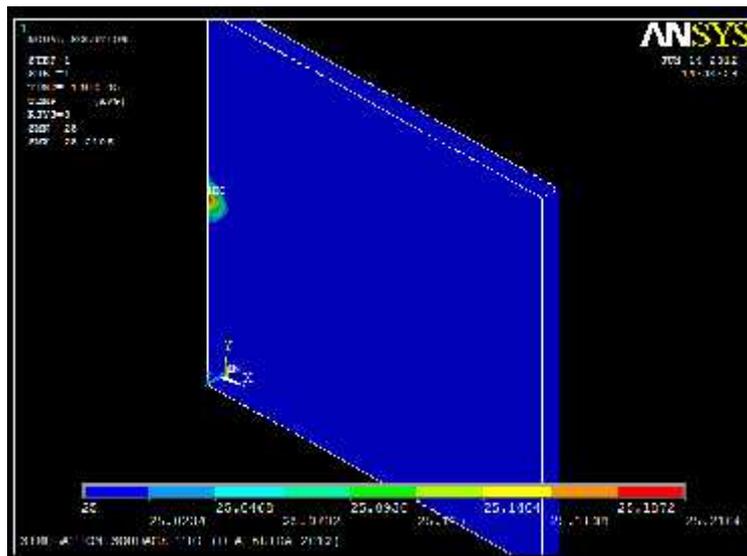


Figure IV.14: 1^{ère} étape du déplacement de température.

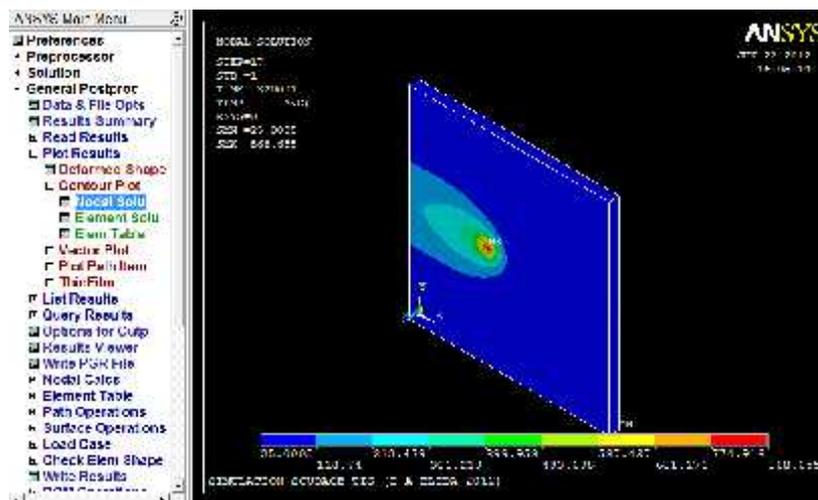


Figure IV.15: Déplacement de température (étape de transition).

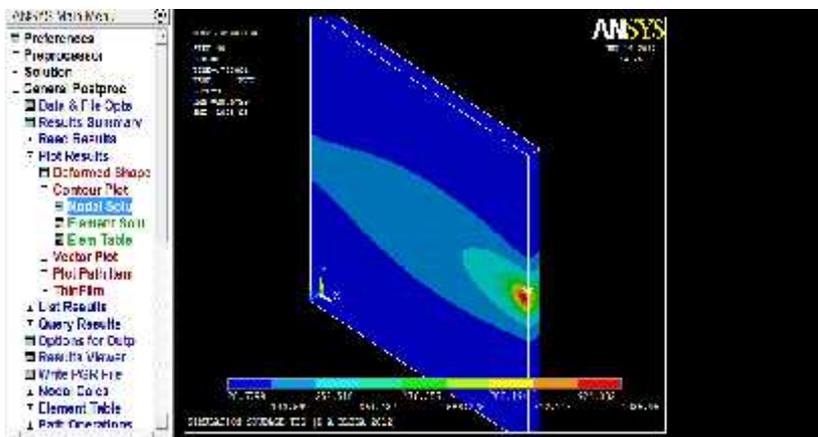


Figure IV.16: Dernière étape du déplacement de température.

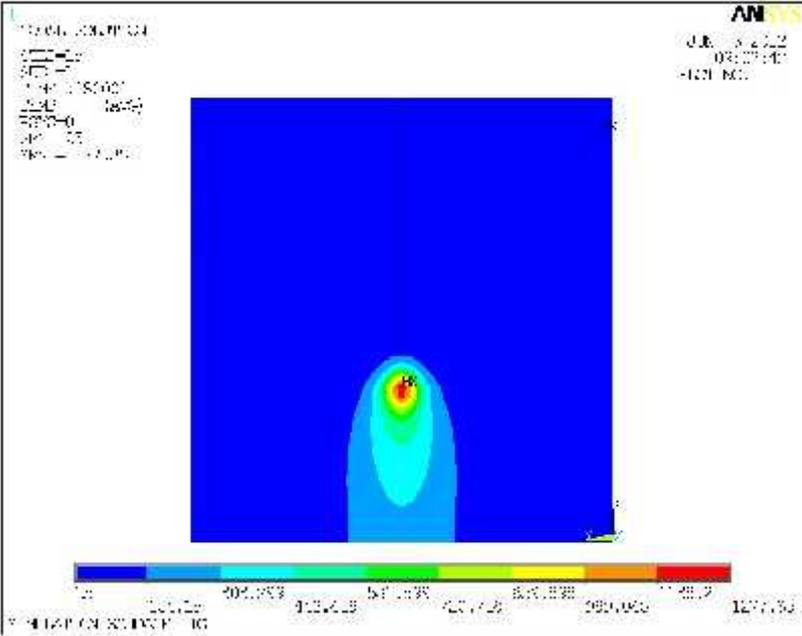


Figure IV.17: Déplacement de température sur le cordon de soudure.

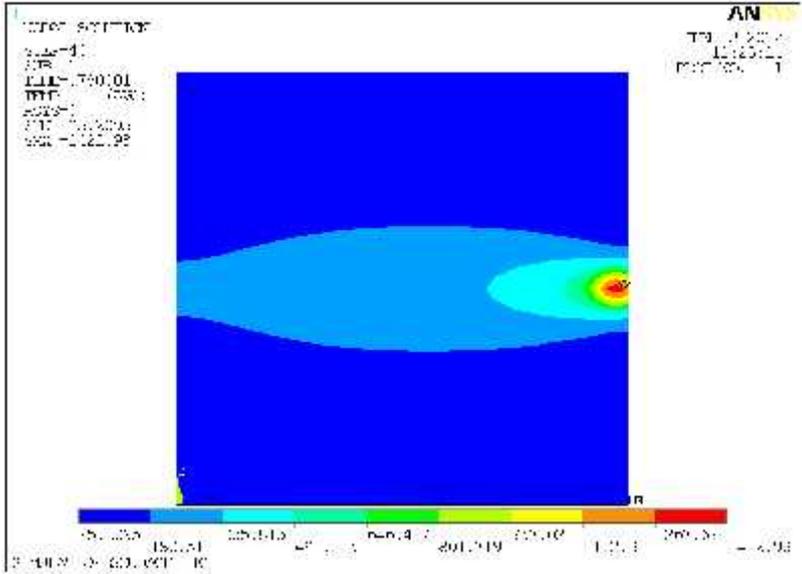


Figure IV.18 : Déplacement de température en 2D.

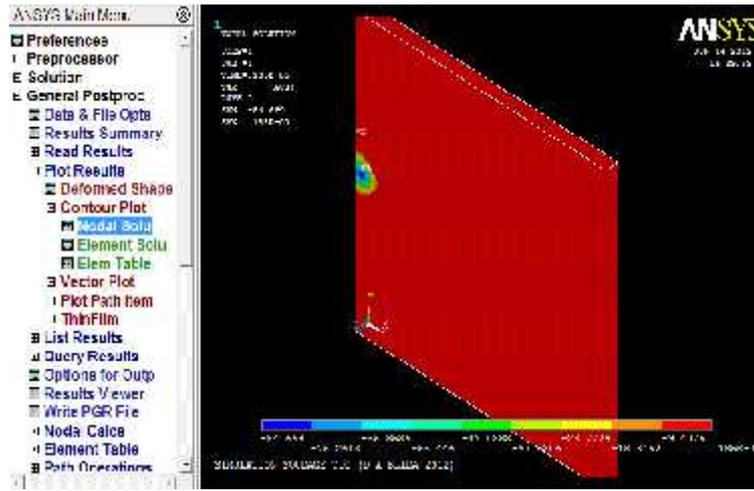


Figure IV.19 : Gradient de température suivant l'axe x (1^{ère} étape).

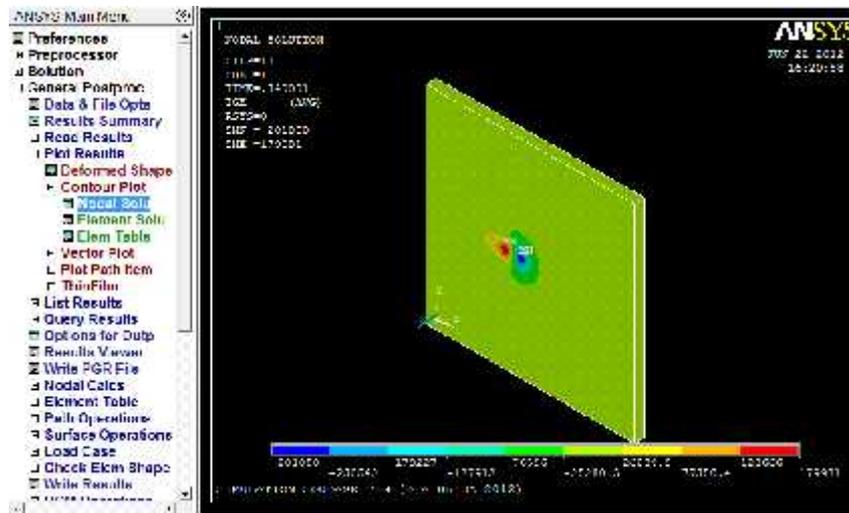


Figure IV.20 : Gradient de température suivant l'axe x (Etape de transition).

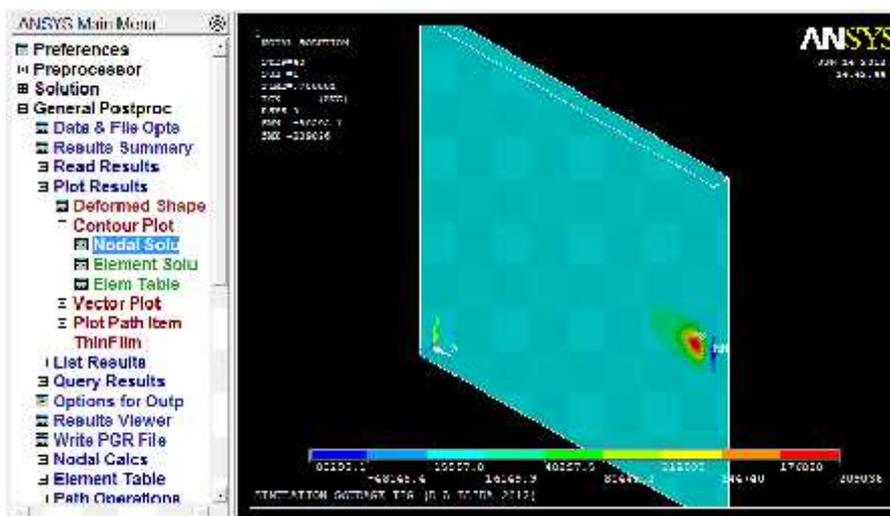


Figure IV.21: Gradient de température suivant l'axe x (Dernière étape).

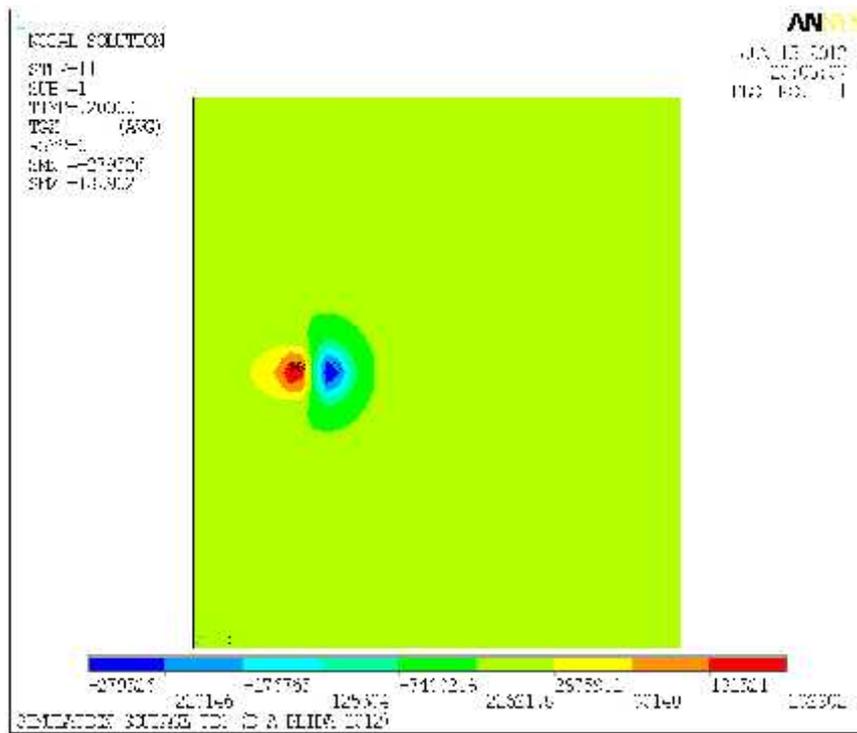


Figure IV.22 : Gradient de température.

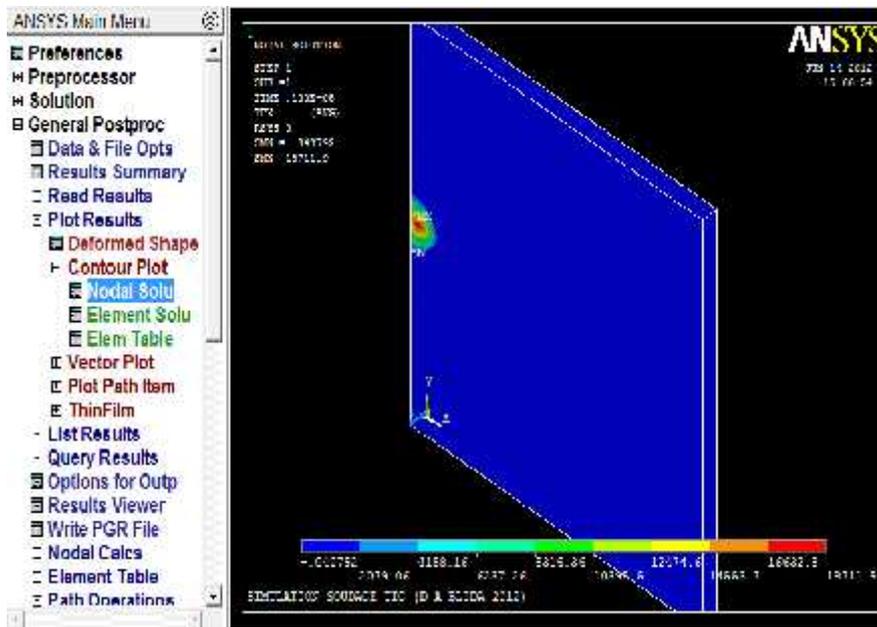


Figure IV.23 : Flux de température suivant l'axe x(1^{ère} étape).

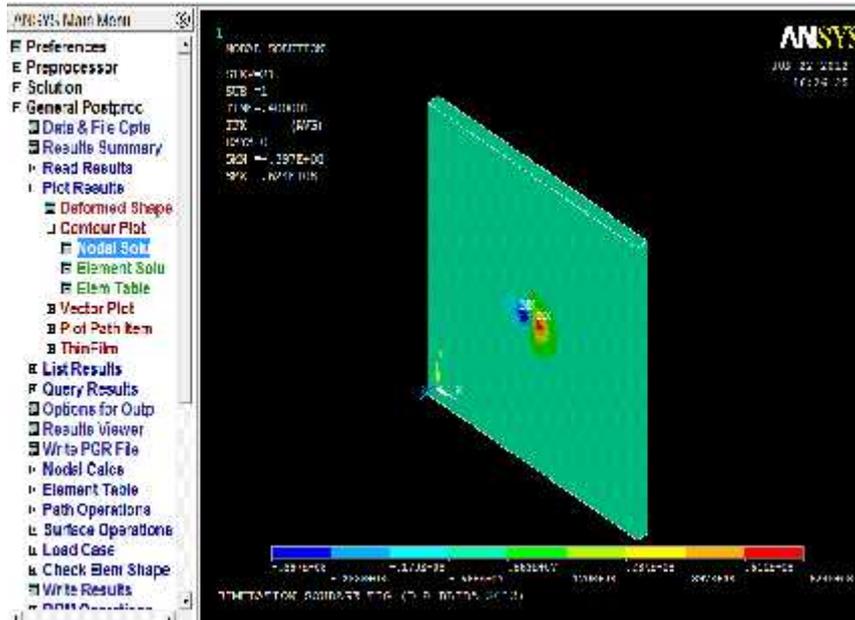


Figure IV.24 : Flux de température suivant l'axe x(Etape de transition).

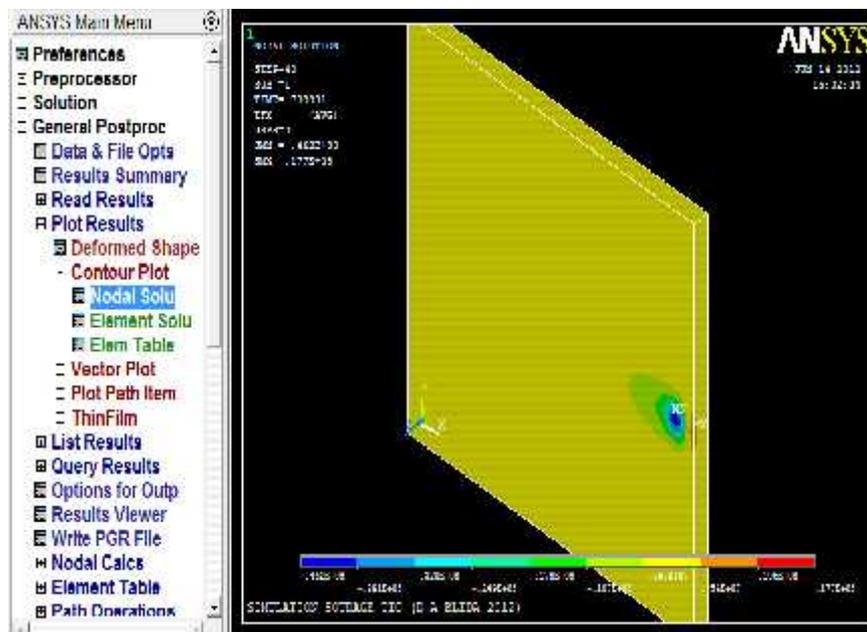


Figure IV.25 : Flux de température suivant l'axe x(Dernière étape).

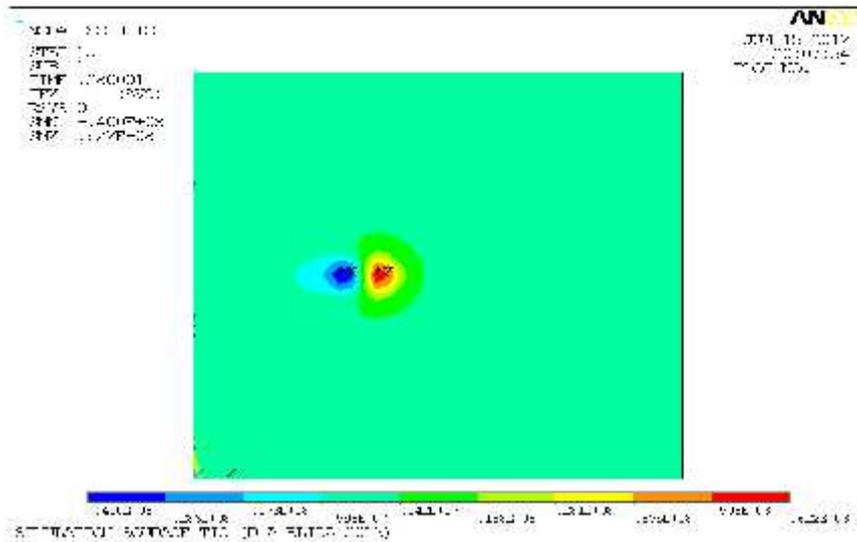


Figure IV.26 : Flux de température.

IV.7. Discussions des résultats:

- Le maillage divise les deux plaques en 40 éléments sur la surface et de 4 éléments sur l'épaisseur et chaque élément a 0.5mm de surface comme elle est citée dans les figures (IV.7) ; (IV.8).
- Les figures (IV.2) ; (IV.3) ; (IV. 4) ; (IV. 5) représentent l'étape de l'Initialisation.
- La figure(IV.9) représente le déplacement nodal de la température sur le milieu des deux plaques qui représente dans la pratique le cordon de soudure et le calcul des résultats de maillage.
- Les figures (IV.10) ;(IV.11) représentent la visualisation des résultats de maillage.
- les figures(IV.13) ;(IV.14) (IV.15) ;(IV.16) représentent la distribution de la température sur la surface de les deux plaques et on remarque une distribution volumique de la source de chaleur dans le joint soudé Cette source de chaleur s'apparaît à la forme du bain de fusion qui se déplace sous l'électrode et nous considérons qu'il s'agit d'une forme ellipsoïdale. (Source de chaleur gaussienne).

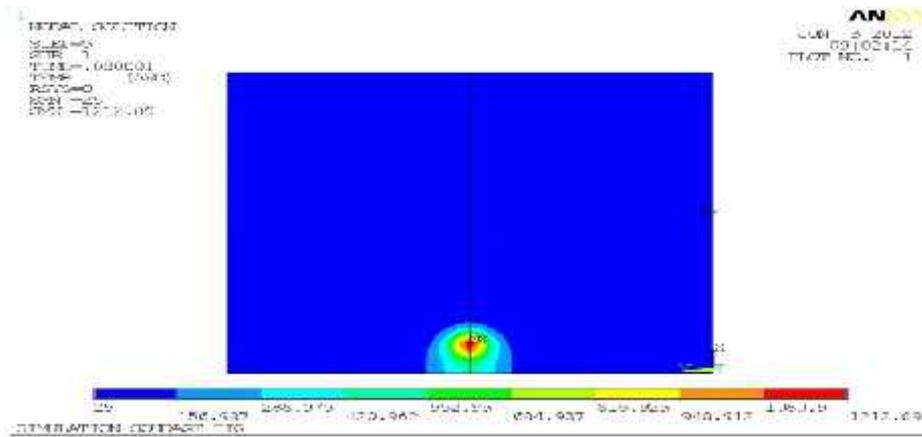


Figure IV.27 : Représentation du déplacement de la source de chaleur à $T=0.080001$.

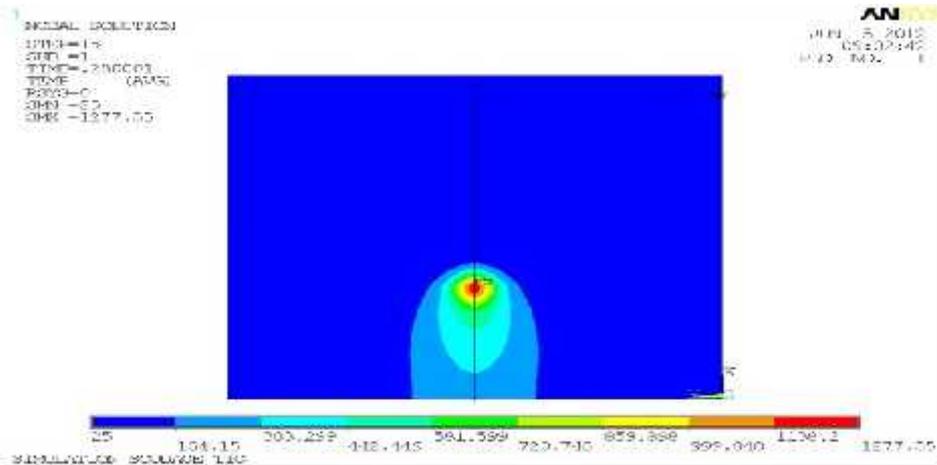


Figure IV.28 : Représentation du déplacement de la source de chaleur à $T=0.280001$.

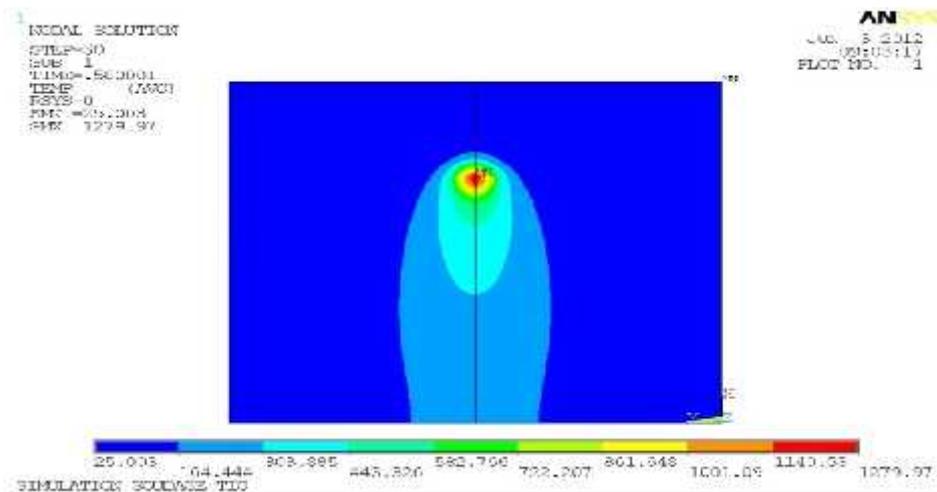


Figure IV.29 : Représentation du déplacement de la source de chaleur à $T=0.580001$.

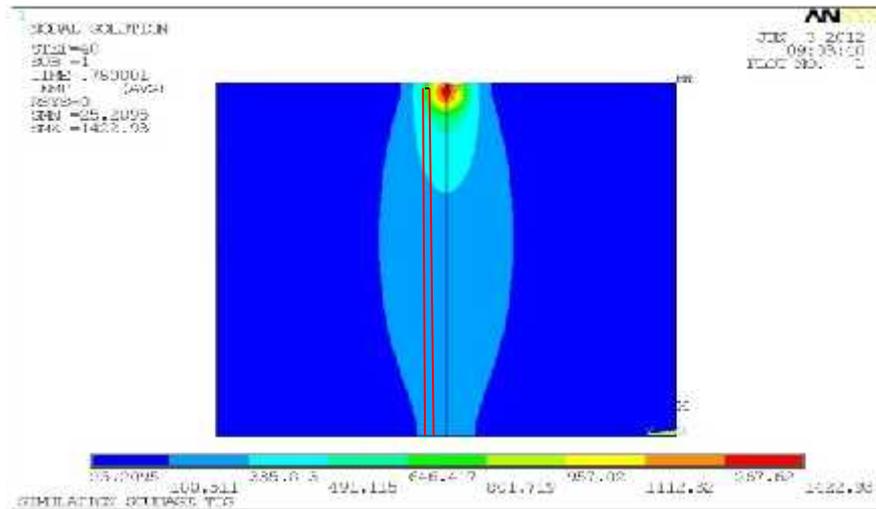


Figure IV.30 : Représentation du déplacement de la source de chaleur à $T=0.780001$.

Les figures (V.27), (V.28), (V.29) et (V.30) représentent (simulent) le déplacement de la source de chaleur suivant la fonction de la ligne du soudage à des instants déferrent.

La chaleur a suffisamment de temps pour ce propagé par conduction dans les différentes directions de l'assemblage, mais pas suffisant vers l'avant vu que l'arc électrique se déplace en avant (OX).

A $T=0.80001$ sur le nœud (5) la température est maximale (1212.89°K) et commence à augmenter jusqu'elle atteint (1422.93°K) à $T= 0.780001\text{s}$ sur le dernier nœud (40).

On remarque aussi un refroidissement un peut rapide après la fusion.

On peut à partir de la figure (V.30), limiter la zone fondue (ZF) et la zone affecté thermiquement (ZAT) sont limités respectivement par la température de fusion (650°k), et la température de solidification (520°k).

Conclusion :

Dans cette partie, nous avons pu obtenir des résultats numériques après des heures de calcul de la simulation du soudage d'un cordon de soudure entre deux plaques rectangulaire.

On conclue que le raffinement du maillage c'est-à-dire rendre un maillage plus fin implique une réelle contribution pour l'obtention de résultats précis est proche de la réalité, donc il faut faire attention à bien choisir le type de maillage adéquat pour chaque cas.

Conclusion général :

Dans le cadre de notre étude, nous nous sommes intéressés aux alliages d'aluminium 2024 T351. Ces alliages contiennent Cu et Mg 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.

En plus cette recherche nous a montrée 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.

En premier lieu, nous avons étudié la microstructure résultant du procédé de soudage TIG ainsi que les caractéristiques du phénomène de soudage.

Cette étude du joint soudé nous a permis d'identifier plusieurs zones :

- une zone loin du cordon de soudure non affectée par le soudage
- une zone proche du cordon de soudure
- une zone intermédiaire

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 :

- Dureté,
- Résilience,
- Traction.
- DMA

En utilisant la microdureté, on remarque que la moyenne de la microdureté varie d'une zone à l'autre : $HV_{MB} > HV_{ZAT} > HV_{ZF}$.

Même pour l'essai de résilience l'énergie varie entre l'éprouvette non soudée (14.003 **J/cm**) et soudée (3.574 **J/cm**).

DMA a permis déterminer les propriétés mécaniques initiales du matériau :

- La déformation : ≈ 0 % ;
- Le module de stockage ou (élastique) : $E' \sim 65$ GPa ;
- Le module de perte : $E'' = 2.3$ GPa ;
- L'amortissement (ou déphasage) : $Tan \delta = 0.037$.

Conclusion générale

Dans la dernière partie de notre travail, nous avons procédé à une simulation numérique contribuer à la compréhension des phénomènes thermiques induits lors l'opération de soudage TIG, En modélisant la source de chaleur par une forme Bi-elliptique avec une distribution surfacique Gaussienne de du flux de chaleur de l'arc.

La température maximale de fusion atteint (1422.93°K).

La chaleur a suffisamment de temps pour ce propagé par conduction dans les différentes directions de l'assemblage, mais pas suffisant vers l'avant vu que l'arc électrique se déplace en avant (OX).

A $T=0.80001$ sur le nœud (5) la température est maximale (1212.89°K) et commence à augmenter jusqu'elle atteint (1422.93°K) à $T= 0.780001s$ sur le dernier nœud (40).

Finally, notre étude nous a permis d'étudier l'influence de procédé de soudage TIG sur les alliages d'aluminium 2024 T351. Elle nous a permis de distinguer les caractéristiques de l'évolution de la structure lors de l'application du procédé de soudage TIG dans les différentes zones (métal de base, zone affectée thermiquement et zone fondue) en fonction de l'état initial de l'alliage.

Perspectives :

Comme ce domaine d'étude est très important est très vaste, cette étude peut être complétée par des futures masters en tenant compte de la mécanique de rupture qu'est une recherche appliquée très approfondie.


```
LESIZE,1,,40  !!!! subdivisions X
LESIZE,4,,40  !!!! subdivisions y
LESIZE,9,,4   !!!! subdivisions z
MSHKEY,1
VATT,1,1,1
VMESH,1
/PNUM,DEFA
EPLOT
FINISH
```

```
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
!!!!Résolution
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
```

```
/SOLU
LSIZE=0.001  !!!longeur element
V=0.05      !!! vitesse d'avavnce m/s
TINC=LSIZE/V
```

```
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!constantes de la formulation de la distribution gaussienne du flux de
chaleur
rb=0.002
pi=3.1415926
```

```
Q=2200      !!!!!!! mu*u*i/v
Qmax=Q/(pi*rb*rb)  !!!flux max voir these
R=0.002
```

```
MAX_TIME=41
MAX_X=41
MAX_Y=41
```

```
*DIM,Tig,TABLE,MAX_X,MAX_Y,MAX_TIME,X,Y,TIME
```

```
*DO,K,1,MAX_TIME,1
  *DO,I,1,MAX_X,1
    Tig(I,0,K)=(I-1)*LSIZE
  *ENDDO
*DO,J,1,MAX_Y,1
  Tig(0,J,K)=(J-1)*LSIZE
*ENDDO
*DO,I,1,MAX_X,1
```

```

*DO,J,1,MAX_Y,1
  XCENTER=V*(K-1)*TINC
  YCENTER=0.02

  DISTANCE=SQRT(((I-1)*LSIZE-XCENTER)**2+((J-1)*LSIZE-YCENTER)**2)

  *IF,DISTANCE,LE,R,THEN

    Tig(I,J,K)=Qmax /EXP(2*DISTANCE**2/(0.002**2))  !!!distribution
gaussienne

    *ELSE
      Tig(I,J,K)=0
    *ENDIF
*ENDDO
*ENDDO
Tig(0,0,K)=(K-1)*TINC
*ENDDO

!!!preprop

ANTYPE,TRANS  !type d'analyse transitoire
TUNIF,25      !temp initiale

KBC,1
*SET,DELT,1
TIMINT,ON
AUTOTS,OFF

TT=0.8

*DO,TM,1E-6,TT,TINC
/VIEW,1,1,1,1
/ANG,1
/REP,FAST
FLST,2,1,5,ORDE,1
FITEM,2,2
/GO
!*
TIME,TM
AUTOTS,0
DELTIM, , , 1
KBC,0

```

```
!*  
TSRES,ERASE  
FLST,2,1,5,ORDE,1  
FITEM,2,2  
/GO  
!*  
!*  
SFA,P51X,1,HFLUX,% Tig%  
SOLVE
```

```
OUTRES,ALL,ALL,  
/PSF,HFLUX,,2  
/REPLOT  
*ENDDO  
OUTRES,ALL,ALL,  
FINISH
```

Annexe B

Tableau 1 : indices h k l des plans diffractant pour les structures cristallines classiques des Métaux

Cubique centré	Cubique à faces centrées	Cubique diamant
110	111	111
200	200	220
211	220	311
220	311	400
310	222	331
222	400	422
321	331	511 333
400	420	440
411 330	422	531
420	511 333	620
332	440	533
422	531	444
510 431	600 442	711 551
521	620	642
440	533	731 553
530 433	622	
600 442	444	
611 532	711 551	
620	640	
541	642	
622	731 553	
631		
444		
710 550		
543		
640		
731 633		
552		
642		
730		

Tableau 2 : les valeurs de $h^2+k^2+l^2$ correspondant à un facteur de structure non nul pour les trois réseaux de Bravais cubiques et la structure cubique diamant.

	Cubique simple	Cubique centré	Cubique à faces centrées	Cubique diamant
hkl	$h^2+k^2+l^2$	$h^2+k^2+l^2$	$h^2+k^2+l^2$	$h^2+k^2+l^2$
100	1			
110	2	2		—
111	3		3	3
200	4	4	4	—
210	5	—	—	—
211	6	6	—	
220	8	8	8	8
221,300	9			—
310	10	10		—
311	11	—	11	11
222	12	12	12	—
320	13	—	—	—

Références

- [1] J.Lanthony, Aluminium et alliages légers, Ed. Presses universitaires de France, Paris, pp 55, 1984.
- [2] Paul Héroult. << Invention du procédé d'électrolyse de l'aluminium>>. France, 1886.
- [3] BOUKHLEF Djedjiga.<< Oxydation anodique de l'aluminium en présence d'un acide organique comme additif élaboration et caractérisation>>. Edition Nathan, Paris, 2008
- [4] LACROIX<<mécanisme de corrosion localisée de l'alliage d'aluminium 2024 apport de la microscopie a force atomique>> Thèse de doctorat, université de Toulouse, 3 Octobre 2008
- [5] Naathalie PAUSZE<<Fatigue corrosion localisée>>, thèse de doctorat ; université de Toulouse 8 avril 2008.
- [6] groupe-thermi-lyon.com,wp-content-uploads, Lyon,2011.
- [7] J.L.Fanchon, Guide de mécanique, Sciences et technologie industrielles, Edition Nathan, Paris, 2008.
- [8] R.W.Messler Jr, Principles of welding, John Willey and Sons Edition, pp 50-55, New York, 1999
- [9] R.W.Messler Jr, Principes de soudage, Edition John Willey & Sons, New York, pp 50-55, 1999.
- [10].M.Courbière, Classement des alliages soudables et leur métallurgie, 1996.
- [11] B.Paul and Dickerson, Welding of aluminum, aluminum company of America, ASM Handbook Volume 6, Welding, Brazing, and Soldering (ASM International);USA;1993.
- [12] N.Toyoda, Proceedings of the workshop Manufacturing and its control, University of Osaka, Tokyo, July 1992
- [13] R.W.Messler Jr, Principes de soudage, Edition John Willey & Sons, NewYork, pp 50-55, 1999.
- [14] *Eddy current*, American Society for Non Destructive Testing ,2012.
- [15] J.L.Fanchon, Guide de mécanique, Sciences et technologie industrielles, Edition Nathan, Paris, 2008.
- [16] A.Dhooge, Techniques d'assemblage : le soudage ; Métallerie 65, spécial soudage, avril 2004.
- [17] Bergeret A and Albérola N. D; Avitabile, Experimental Modal Analysis, Mechanical Engineering Department, University of Massachusetts Lowell, USA., P 2000;1996.
- [18] A study of the interphase in styrene-mathacrylic acid copolymer / glass bead composites. Polymer, l'Ecole des Mines d'Alès, France. 1983.

[19] Crawford, R.J ; Moyens de contrôle par analyse thermique des composites à haute performance, Paris., 1998.

[20] Butterworth- Heinemann,. J.R. White et S.K. Plastics Engineering, 3rd Ed, chap. I & II, UK ;2001.

[21] , D. Larouche, Tensile creep testing of an Al–Cu alloy above solidus with a dynamic mechanical analyser, , Quebec. 2009,

[22] Patricia SAAD, Modélisation et identification du comportement non linéaire des cales en caoutchouc. Thèse de Doctorat en Mécanique. Ecole Centrale de LYON p. 400-436, 2003.