

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

UNIVERSITE SAAD DAHLAB DE BLIDA 1
FACULTE DE TECHNOLOGIE
DEPARTEMENT DE MECANIQUE

Projet de Fin D'études
Pour l'obtention de diplôme de
Master en Génie Mécanique et Matériaux

Titre :

Soudage par friction malaxage (FSW) d'alliage d'aluminium 2024 T3

Proposé et encadré par :
Dr Mustapha TAMMAR

Etudié par :
Zahra YAHIAOUI

Année universitaire 2015/2016

Remerciements

Ce travail de thèse a été réalisé au sein du Département de Mécanique de l'Université Saad Dahlab de Blida 01 et au niveau du laboratoire des recherches scientifiques de l'ERM Aéo.

Selon la tradition, et à travers cette page de remerciements, je tiens à saluer toutes les personnes qui, de près ou de loin, ont contribué à la concrétisation de ce travail.

Je voudrais tout d'abord remercier les membres du jury pour leur précieux temps accordé à la lecture et à la critique de ce travail.

Je suis très reconnaissante à Monsieur **Temmar Mustapha**, pour avoir accepté de diriger mon travail, et dont l'aide précieuse m'a été indispensable sur le plan scientifique et humain. Je lui présente également ma plus sincère gratitude pour la confiance et la sympathie qu'il m'a témoignée au cours de ces mois de travail.

J'exprime aussi toute ma gratitude à tous mes enseignants et le personnel technique de notre Département de Mécanique.

Dédicaces

A ma mère et mon père,

En remerciements de leurs efforts qui m'ont permis de faire de longues études,

A ma sœur, mes frères,

A toute ma famille,

A tous mes amis,

Je voudrais remercier de nombreuses personnes sans qui cette thèse n'aurait pas pu aboutir et être menée à bien sans leurs aides et leurs idées. Je ne voudrais pas les citer nominativement de peur d'oublier une ou plusieurs personnes,

Aussi, je voudrais remercier l'ensemble du personnel de :

- Atelier d'usinage et de soudage de notre Département de mécanique,
- Service de maintenance d'Air Algérie, (Alger),
- Laboratoire de recherches scientifiques et UFI de ERMAéro,(Dar el beida),

Encore une dernière fois, merci à tous.

LISTE DES SYMBOLES

K : Coefficient de partage à l'équilibre

Al : Aluminium

Zn : Zinc

Mg : Magnésium

Cu : Cuivre

Fe : Fer

Cr : Chrome

Ti : Titan

Mn : Manganèse

Si : Silicium

Liste des figures

| | | |
|--------------|---|----|
| Figure I.1 | Subdivision de l'état T | 5 |
| Figure I.2 | Différents classes d'alliages d'aluminium..... | 6 |
| Figure I.3 | l'effet de la teneur en Mg sur les propriétés mécanique R , Re et A%..... | 8 |
| Figure I.4 | Diagramme ternaire Al-Cu-Mg..... | 10 |
| Figure I5 | diagramme binaire (Al-Cu)..... | 11 |
| Figure I.6 | microstructure obtenues à l'ambiante dans un alliage AL-4%Cu..... | 13 |
| Figure I.7 | Rapport entre la résistance à la déformation et la quantité des défauts (densité de dislocations)..... | 14 |
| Figure I.8 | Diagramme d'équilibre d'un alliage à durcissement structural..... | 16 |
| Figure I.9 | Cycles de traitement thermique des alliages d'aluminium..... | 16 |
| Figure I.10 | Durcissement de l'alliage Al-Cu-Mg (4% Cu) pour des températures proches de l'ambiante (maturation)..... | 17 |
| Figure I.11 | Morphologie des grains observés au microscope optique selon trois directions..... | 17 |
| Figure II2 | Grains observés au microscope optique pour un grossissement de 500 sur la face..... | 21 |
| Figure II.1 | Année d'apparition des principaux procédés de soudage..... | 23 |
| Figure II.2 | Schéma du procédé de soudage par friction, a) phase d'accostage des pièces, b) phase de frottement et c) phase de pression élevée d) phase de joint forgé..... | 24 |
| Figure II.3 | Schéma d'une machine outil pour le FSW..... | 25 |
| Figure II.4 | Schéma général de l'outil FSW..... | 26 |
| Figure II.5 | types classiques d'outils du TWI..... | 27 |
| Figure II.6 | Principe général du procédé de soudage par friction malaxage..... | 28 |
| Figure II.7. | Principe du soudage par Friction-Malaxage (FSW)..... | 28 |
| Figure II.8 | Phase de Pénétration de l'outil..... | 29 |
| Figure II.9 | Phase de soudage..... | 30 |
| Figure II.10 | phase de retrait de l'outil..... | 31 |
| Figure II.11 | Coupe macrographique d'un joint soudé par FSW sur un alliage d'aluminium de nuance 2024-T351..... | 32 |
| Figure II.12 | Noyaux soit en forme de cuvette soit en forme d'ellipsoïde..... | 33 |
| Figure II.13 | profils de dureté(a) Profils de dureté d'un joint soudé par FSW d'un alliage 5454 soit dans un état écroui (symbole H) soit dans un état recuit (symbole O). (b) Profils de dureté d'un joint soudé par FSW à deux vitesses de soudage déférentes pour un 7050-T74..... | 35 |
| Figure III.1 | tôles de AL2024..... | 36 |
| Figure III.2 | Schéma des différents outils fabriqués | 36 |

| | |
|--|----|
| Figure III.3 Photo des différents éléments de l'outil FSW | 38 |
| Figure III.4 Schéma des différentes composantes de l'outil FSW | 39 |
| Figure III.5 Fraiseuse utilisée | 39 |
| Figure III.6 Réglage de la vitesse de rotation de l'outil (V_r) | 40 |
| Figure III.7 Réglage de la vitesse d'avance de soudage (V_a) | 40 |
| Figure III.8 Réglage d'angle d'inclinaison α ; a) $\alpha = 1^\circ$, b) $\alpha = 2^\circ$ | 41 |
| Figure III.9 Système de bridage pour la fixation des tôles..... | 41 |
| Figure III.10 : les étapes de soudage | 42 |
| Figure III.11 Plaque soudée..... | 43 |
| Figure III.12 Les empreintes existantes sur FSW..... | 43 |
| Figure III.13 : Plaques soudées | 44 |
| Figure III.14 Soudage de la tôle 2024-T3($e = 2$ mm), $V_r = 1125$ tr/min, $V_a=60$ mm/min, $\alpha = 2^\circ$ a) face avant et b) faces arrière..... | 44 |
| Figure III.15 Soudage de la tôle 2024-T3($e = 2$ mm), $V_r=1125$ tr/min, $V_a=60$ mm/min, $\alpha=1^\circ$ a) face avant et b) faces arrière | 44 |
| Figure III.16 Soudage de la tôle 2024-T3 ($e=3$ mm), $V_r=1500$ tr/min, $V_a=36$ mm/min, $\alpha=2^\circ$ a) face avant et b) faces arrière..... | 45 |
| Figure III.17 Soudage de la tôle 2024-T3 ($e = 5$ mm) $V_r = 1625$ tr/min, $V_a = 36$ mm/min et $\alpha=1^\circ$ | 48 |
| Figure III.18 <i>Micrographie d'un échantillon soudé montrant les différentes zones de soudage</i> | 46 |
| Figure III.19 contrôle par ultrason des plaques soudées..... | 46 |
| Figure III.20 le contrôle par ultrason des plaques soudées | 47 |
| Figure III.21 principe de contrôle par ultrason des plaques soudées | 48 |
| Figure III.22 clichés obtenu après la radiographie..... | 49 |
| Figure III.23 Les étapes de Traitement thermique de l'état T3..... | 50 |
| Figure III.24 Four à moufle Nabertherm de type LT5/12..... | 51 |
| Figure III.25 Micrographie d'un échantillon traité (mise en solution) x 100r..... | 51 |
| Figure III.26 Microscope optique de type Carl Zeiss..... | 52 |
| Figure III.27 Résine utilisée..... | 53 |
| Figure III.28 Polisseuse utilisée..... | 54 |
| Figure III.29 composantes chimiques de la solution Keller..... | 54 |
| Figure III.30 Les cordons du contrôle qualité..... | 56 |
| Figure III.31 Machine de traction..... | 56 |

| | |
|--|----|
| Figure III.32 Epreuve de l'essai de traction normalisée..... | 56 |
| Figure III.33: Les diff erentes étapes au cour de l'essai de traction..... | 57 |
| Figure III.34 Epreuves de traction | 58 |
| Figure III.35 Profil de dureté d'un joint d'un alliage d'aluminium [3.13]..... | 59 |
| Figure III.36 Duromètre utilisé pour mesurer la microdureté..... | 59 |
| Figure III.37: Duromètre utilisé pour mesurer la dureté | 61 |
| Figure IV.1 Phénomènes physiques impliqués et leurs couplages lors du psoudage[4.1]..... | 61 |
| Figure IV.2: Microstructure à l'état brut pour des épaisseurs respectives de 3 et5 mm X-100... | 62 |
| Figure IV.3 Microstructure à l'état brut pour des épaisseurs respectives de 3 et 5m X200..... | 63 |
| Figure IV.4 : Microstructure à l'état de mise en solution pour des épaisseurs respectives De 3 et 5 mm X-100 | 52 |
| Figure IV.5 : Microstructure à l'état de mise en solution pour des épaisseurs respectives De 3 et 5 mm X-200 | 64 |
| Figure IV.6 : Etapes de soudage..... | 65 |
| Figure IV.7 Plaques soudées par le procédé FSW..... | 65 |
| Figure IV.8 Clichés des tôles soudées | 66 |
| Figure IV.9 contrôle par ultrason des plaques soudées | 66 |
| Figure IV.10 Essai de microdureté | 67 |
| Figure IV.11 Micrographie de l'échantillon soudé..... | 68 |
| Figure IV.12 Microstructure du MB du matériau non traité Pour une épaisseur de 5 mm..... | 69 |
| Figure IV.13 Microstructure de la ZAT du matériau non traité pour une épaisseur 5 mm..... | 69 |
| Figure IV.14 Microstructure du noyau du matériau non traité Pour une épaisseur de 5 mm..... | 70 |
| Figure IV.15 Microstructure du MB pour un épaisseur de 3 mm..... | 72 |
| Figure IV.16 Microstructure de la ZAT pour un épaisseur de3 mm..... | 72 |
| Figure IV.17 Microstructure du noyau pour une épaisseur de 3 mm..... | 73 |
| Figure IV.18 Epreuves normalisées ayant subies l'essai de traction..... | 76 |
| Figure IV.19 Essai de traction sur une éprouvette de 3 mm(non traité)..... | 76 |
| Figure IV.20 Epreuves non traitée ayant subies l'essai de traction pour un épaisseur de 3mm..... | 77 |
| Figure IV.21 Essai de traction sur une éprouvette de 3mm..... | 78 |

Liste des tableaux

| | |
|--|----|
| Tableau I.1 Propriétés mécaniques typiques de quelques métaux | 2 |
| Tableau I.2 les méthodes d'amélioration des propriétés mécaniques..... | 3 |
| Tableau I.3 normalisation des états métallurgiques | 4 |
| Tableau I.4 Subdivision de la trempe T: traitements thermiques des alliages d'aluminium. | 6 |
| Tableau I.5 le classement en séries de l'Aluminium Association | 9 |
| Tableau I.6 composition chimique des alliages de la série 2000..... | 10 |
| Tableau I.7 Caractéristiques physiques des alliages de la série 2000 | 20 |
| Tableau II.1 Année d'apparition des principaux procédés de soudage [14]..... | 33 |
| Tableau II.2 Organigramme des différents procédés de soudage..... | 34 |
| Tableau III.1 Composition chimique d'alliages 2024 (% en poids) | 35 |
| Tableau III.2 Caractéristiques physiques et mécaniques d'alliage 2024..... | 37 |
| Tableau III.3 conditions de fabrication des outils de FSW | 37 |
| Tableau III.4 les composantes de l'outil FSW..... | 42 |
| Tableau III.5 Les paramètres expérimentaux. | 50 |
| Tableau IV.1 Résultats de la dureté Vickers du matériau à l'état brut..... | 56 |
| Tableau IV.2 Résultats de la microdureté du matériau à l'état brut | 62 |
| Tableau IV.3 Résultats de la dureté du matériau à l'état Traité..... | 62 |
| Tableau IV.4 Résultats de la microdureté Vickers à l'état de mise en solution à 495C°..... | 63 |
| Tableau IV.5 Résultats de la dureté Vickers du matériau à l'état brut(MB)..... | 70 |
| Tableau IV.6 Résultats de la dureté Vickers du matériau à l'état brut(ZAT)..... | 70 |
| Tableau IV.7 Résultats de la dureté Vickers du matériau à l'état brut(Noyau)..... | 70 |
| Tableau IV.8 Résultats de la microdureté du matériau à l'état brut(MB)..... | 71 |
| Tableau IV.9 Résultats de la microdureté du matériau à l'état brut(ZAT)..... | 71 |
| Tableau IV.10 Résultats de la microdureté du matériau à l'état brut (noyau)..... | 71 |
| Tableau IV.11 Résultats de la dureté Vickers du matériau à l'état Traité (MB)..... | 73 |
| Tableau IV.12 Résultats de la dureté Vickers du matériau à l'état Traité (ZAT)..... | 73 |
| Tableau IV.13 Résultats de la dureté Vickers du matériau à l'état Traité (Noyau)..... | 73 |
| Tableau IV.14 Résultats de la microdureté du matériau à l'état traité (MB)..... | 74 |
| Tableau IV.15 Résultats de la microdureté du matériau à l'état traité (ZAT)..... | 74 |
| Tableau IV.16 Résultats de la microdureté du matériau à l'état traité (noyau)..... | 74 |
| Tableau IV.17 Essai de traction pour une éprouvette soudée (épaisseur de 3 mm à l'état brute)..... | 77 |
| Tableau IV.18 Essai de traction pour une épaisseur de 3 mm..... | 78 |

SOMMAIRE

INTRODUCTION GENERALE

CHPITRE I : GENERALITES SUR L'ALUMINIUM ET SES ALLIAGES

| | |
|---|----|
| I.1. Historique | 01 |
| I.2. Domaines d'utilisation..... | 01 |
| I.3. Principales caractéristiques de l'aluminium..... | 01 |
| I.3.1 Masse volumique..... | 01 |
| I.3.2 Résistance à la corrosion..... | 02 |
| I.3.3 La conductibilité électrique..... | 02 |
| I.4.Propriétés mécaniques..... | 02 |
| I. 5.Propriétés de mise en forme..... | 03 |
| I.6.Etats métallurgiques..... | 03 |
| I.7. Type de classe et classification des alliages d'aluminium..... | 05 |
| I.8.Alliages corroyés..... | 06 |
| I.8.1 Désignations des alliages d'Aluminium..... | 06 |
| I.8.2 Alliages sans durcissement structural..... | 07 |
| I.8.2.1 Série 1000 (aluminium pur)..... | 07 |
| I.8.2.2 Série 3000 (aluminium manganèse)..... | 07 |
| I.8.2.3 Série 5000 (aluminium magnésium)..... | 07 |
| I.8.3 Alliages à durcissement structural..... | 08 |
| I.8.3.1 Série 2000 (aluminium cuivre)..... | 08 |
| I.8.3.2 Série 6000 (aluminium magnésium silicium)..... | 08 |
| I.9.Série 2000 (aluminium-cuivre)..... | 09 |
| I.9.1 Propriétés générales..... | 09 |
| I.9.2 L'alliage d'aluminium 2024..... | 10 |
| I.9.3 Les traitements thermiques applicables au 2024..... | 11 |
| I.3.3 .1 Traitement d'homogénéisation..... | 11 |
| I.3.3.2 Traitement d'adoucissement..... | 12 |
| I.3.3.3 Traitements de trempe structurale..... | 12 |
| I.10.Durcissement des alliages d'aluminium..... | 13 |
| I.10 .1 Durcissement par écrouissage..... | 13 |
| I.10 .2 Durcissement en solution..... | 14 |
| I.10 .3 Durcissement par affinage du grain..... | 14 |
| I.10 .4 Durcissement par précipites (durcissement structural)..... | 14 |

| | | |
|---|---|-----------|
| I.10.4.1 | Microstructure de l'alliage 2024..... | 17 |
| I.11. | Le soudage de l'aluminium et de ses alliages..... | 19 |
| CHPITRE I I : SOUDAGE PAR FRICTION MALAXAGE (FSW) | | |
| II.1 | Historique..... | 20 |
| II.2 | Définition de soudage..... | 21 |
| II.3 | Les différents procédés de soudage..... | 21 |
| II.4 | Le soudage en phase solide..... | 22 |
| II.4.1 | Généralités..... | 22 |
| II.4.2 | Les procédés de soudage en phase solide..... | 22 |
| II.5. | Analyse micrographique..... | 68 |
| IV.5.1. | Etat soudé et non traité..... | 69 |
| IV.6. | Résultats des essais mécaniques..... | 70 |
| CHAPITRE III : MATERIAUX ET TECHNIQUES EXPERIMENTALES | | |
| III.1 | Matériaux et compositions chimiques..... | 33 |
| III.1.1 | Les éléments de l'outil FSW..... | 34 |
| III.2 | Procédure expérimentale..... | 37 |
| III.2.1 | Condition de l'expérience..... | 39 |
| III.3 | Le contrôle non destructif..... | 45 |
| III.3.1 | Contrôle par ultrason..... | 45 |
| III.3.2 | Contrôle par radiographie..... | 48 |
| III.4 | Traitement thermique de l'état T3..... | 49 |
| III.5 | La microscopie optique..... | 51 |
| III.6 | Méthodes d'essais mécaniques..... | 55 |
| III.6.1. | Essai de traction..... | 55 |
| III.6.2. | Essai de dureté..... | 57 |
| CHAPITRE IV : CARACTERISATION MECANIQUE DU JOINT SOUDE | | |
| IV.1 | Introduction..... | 60 |
| IV.2 | Aspect métallurgique du procédé de soudage FSW..... | 60 |
| IV.3 | Procédé de soudage..... | 64 |
| IV.4 | Résultats du CND..... | 66 |
| IV.5 | Caractérisation du durcissement structural..... | 67 |
| IV.6 | Résultats des essais mécaniques..... | 70 |
| Conclusion générale..... | | 80 |
| Bibliographie..... | | 81 |

Introduction générale

L'aluminium pur présente des propriétés mécaniques très réduites. Pour améliorer ces derniers, on ajoute des éléments d'additions entrant en solution solide ou formant des précipités.

Plusieurs classifications peuvent être effectuées sur l'aluminium et ses alliages :

- ◆ Alliages corroyés et alliages de fonderie.
- ◆ Alliages à durcissement structural et alliages sans durcissement structural.

Les alliages à durcissement structural (série 2000, 6000 et 7000) sont utilisés dans le cadre de l'allègement des structures de transport aérien, naval et terrestre.

Cependant, ses alliages sont difficilement soudables par les procédés classiques et le seul moyen c'est le rivetage. Ce processus présente de nombreux inconvénients comme la concentration des contraintes au niveau des trous, une jonction hétérogène entre les deux tôles et particulièrement dommageable pour la tenue en fatigue. Parmi les procédés de soudage, une nouvelle technique de soudage a été développée en 1991 par un centre de recherche nommé TWI (The Welding Institute) localisé à Cambridge au Royaume-Uni. Ce nouveau procédé est nommé le soudage par friction malaxage, plus connu au niveau international sous le terme de (FSW). Il est bien adapté aux alliages d'aluminium difficilement soudables cités auparavant, c'est à dire aux alliages très alliés et cela sans avoir à augmenter la température au delà du point de fusion.

Cette nouvelle technologie de soudage est en pleine phase de développement bien que déjà appliquée industriellement pour certaines fabrications, notamment aux USA (Aéronautique et Spatial, depuis 1994), au Japon (Ferroviaire).

Notre présent mémoire est structuré de la manière suivante

- Une recherche bibliographique sur l'aluminium et ses alliages, le soudage d'une manière générale et le soudage par friction malaxage FSW en particulier.
- Une partie expérimentale consacrée à l'opération de soudage FSW, et par la suite son application sur des tôles en alliages d'aluminium 2024-T3 et un contrôle non destructif (CND).
- Une dernière partie consacrée à la caractérisation mécanique par des essais de traction et microdureté ensuite l'interprétation des résultats obtenus.
- Une conclusion générale terminera notre travail.

CHAPITRE I : ALUMINIUM ET SES ALLIAGES

I.1 HISTORIQUE :

En 1825, Hans Christian Oersted obtient l'aluminium à l'état de corps simple sous forme d'une poudre grise contenant une très grande quantité d'impuretés. En 1827, Friedrich Wöhler obtient cette même poudre contenant moins d'impuretés. Ce n'est qu'en 1854 que le chimiste français Sainte Claire Deville présente le premier lingot d'aluminium obtenu à l'état fondu par un procédé mis en application en 1859 de façon industrielle par Henry Merle. Mais ce procédé était compliqué car il donnait un métal trop cher, réservé uniquement à une utilisation de luxe.

Aujourd'hui, l'aluminium et ses alliages sont présents, sous les formes les plus variées, pratiquement sur tous les marchés ou domaines d'application. Ceci explique leur grand nombre : c'est ainsi que plus de 310 alliages différents font actuellement l'objet des spécifications internationales de l'Aluminium Association.

I.2 DOMAINES D'UTILISATION :

L'aluminium et ses alliages sont utilisés dans tous les domaines de l'industrie et de la vie quotidienne : construction aéronautique, automobile, ferroviaire et navale (superstructures et équipements), bâtiment (toitures, façades, aménagement intérieur), industrie électrique (câbles et appareillages), boîtes de boissons...etc. L'aluminium pur n'est pas une très grande résistance mécanique mais ses alliages peuvent avoir des propriétés remarquables. [3]

I.3 Principales caractéristiques de l'aluminium :

En tonnage, la production d'aluminium ne représente que 2 % environ de celle des aciers. Cependant, ce métal et ses alliages arrivent en seconde position pour l'utilisation des matériaux métalliques. L'aluminium doit cette place à un ensemble de propriétés qui en font un matériau remarquable. [1] [2]

I.3.1 Masse volumique

La masse volumique de l'aluminium est de 2700 kg/m^3 . L'utilisation de l'aluminium s'impose donc dans les domaines de la construction aéronautique et du transport. [1] [2]

I.3.2 Résistance à la corrosion

Grâce à la couche d'oxyde qui se forme en surface de l'ordre de $0.7 \text{ } \mu\text{m}$, les alliages d'aluminium résistent à la corrosion [3]. On peut rendre cette couche plus épaisse par

anodisation. L'aluminium et ses alliages peuvent alors être utilisés sans protection supplémentaire comme revêtements extérieurs de bâtiments. Par contre, dans les milieux corrosifs, les alliages d'aluminium peuvent subir les effets de la corrosion. Des piqûres, de la corrosion sous contrainte, de la fatigue corrosion, voire 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. [1] [2]

En contact de l'oxygène de l'air, l'aluminium forme très vite une couche d'oxyde Al_2O_3 , plus l'aluminium est pur et plus sa tenue en corrosion est élevée. [3]

I.3.3 La conductibilité électrique

La conductibilité électrique de l'aluminium pur atteint 62 % de celle du cuivre. Par ailleurs, la masse volumique du cuivre est plus élevée que celle de l'aluminium. Un conducteur en aluminium, dont la masse est inférieure à celle d'un conducteur en cuivre, s'échauffe moins. [1] [2]

I.4 Propriétés mécaniques

L'aluminium commercialement pur possède, à l'état recuit, des propriétés mécaniques faibles. On peut toutefois améliorer considérablement ces propriétés par écrouissage, addition d'éléments d'alliage ou 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. [1] [2]

| Alliage métallique | Limite conventionnelle d'élasticité (MPa) | Resistance à la traction (MPa) | Allongement à la rupture (A %) |
|--------------------|---|--------------------------------|--------------------------------|
| Acier (1020) | 180 | 380 | 25 |
| Aluminium | 35 | 90 | 40 |
| Cuivre | 69 | 200 | 45 |

Tableau I.1 Propriétés mécaniques typiques de quelques métaux [3]

I.5 Propriétés de mise en forme

L'aluminium a une température de fusion relativement basse, d'environ $660^\circ C$. Il en résulte une facilité de fusion qui présente un avantage certain pour les opérations de fonderie. L'aluminium est très ductile, on peut aisément le mettre en forme à l'état solide, par déformation plastique.

Les alliages peuvent être mis en forme selon deux techniques

Mise en forme par corroyage

Elle concerne les demi-produits et les produits finis. On travaille par déformation à chaud des lingots, des billettes ou des brames de coulée continue.

Pour les alliages corroyés, une distinction est faite entre les alliages non trempant et les alliages trempant

| Catégorie d'alliages | Méthodes d'amélioration des propriétés mécaniques |
|----------------------|---|
| Non trempant | Addition d'éléments en solution solide, présence de secondes phases dispersées, écrouissage |
| Trempant | Durcissement structural |

Tableau I.2 les méthodes d'amélioration des propriétés mécaniques

La principale méthode de durcissement par traitement thermique est donc le durcissement structural. La méthode par traitement mécanique est l'écrouissage. [2][4]

I.6 Etats métallurgiques

On peut obtenir des alliages d'aluminium en divers états: recuits, écrouis ou trempés et vieillis. On désigne le plus souvent ces différents états par des symboles. Ces désignations s'appliquent aussi bien aux alliages corroyés qu'aux alliages de fonderie. [2][4]

| Symbole | ETAT DE BASE |
|---------|-------------------------|
| F | Brut de fabrication |
| O | Recuit |
| H | Ecroui |
| T | Traité thermiquement |
| W | Trempé et non stabilisé |

Tableau I.3 normalisation des états métallurgiques [2][4]

Les états F et O n'ont pas de subdivisions, au contraire des états H et T.

F : Fabriqué à chaud Les opérations de forgeage, filage, laminage effectué à chaud conduisent à l'état F.

O : Recuit ou recristallisé Les mêmes opérations effectuées à chaud ou à froid suivies d'un recuit conduisent à l'état O.

H : Ecoui par une opération de travail à froid

W : Trempe fraîche .C'est un état métallurgique instable et donc ce n'est pas un état d'utilisation.

[4]

| Désignation | Traitements thermiques |
|-------------|---|
| <i>T1</i> | Refroidi après transformation à chaud et mûri jusqu'à l'obtention d'une condition stable: s'applique aux produits non écouis après la trempe |
| <i>T2</i> | Refroidi après transformation à chaud, écoui, et mûri jusqu'à l'obtention d'une condition stable: s'applique aux produits écouis après la trempe |
| <i>T3</i> | Traitement thermique de dissolution, trempé, écoui, et mûri jusqu'à l'obtention d'une condition stable: s'applique aux produits écouis |
| <i>T4</i> | Traitement thermique de dissolution, trempé, et mûri jusqu'à l'obtention d'une condition stable: s'applique aux produits non écouis |
| <i>T5</i> | Refroidi après transformation à chaud et revenu: s'applique aux produits non écouis suivant la trempe |
| <i>T6</i> | Traitement thermique de dissolution, trempé et revenu: s'applique aux produits non écouis après la trempe |
| <i>T7</i> | Traitement de dissolution, trempé et sur-revenu: matériau apporté au-delà du point de résistance maximale afin de contrôler une autre propriété du matériau |
| <i>T8</i> | Traitement thermique de dissolution, trempé, écoui, et revenu: s'applique aux produits écouis |
| <i>T9</i> | Traitement thermique de dissolution, trempé, revenu, et écoui: s'applique aux produits écouis |
| <i>T10</i> | Refroidi après transformation à chaud, écoui, et revenu: s'applique aux produits écouis |

Tableau I.4: Subdivision de la trempe T: traitements thermiques des alliages d'aluminium. [2]

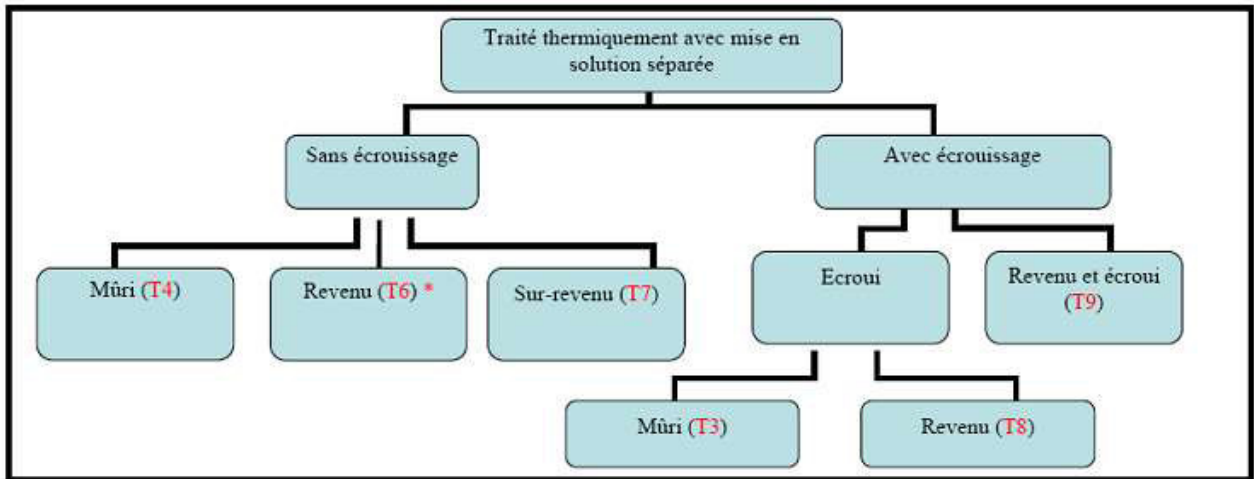


Figure I.1 : Subdivision de l'état T [3]

T : état durci par traitement thermique .les traitements thermiques considérés sont des combinaisons de tout ou partie des traitements de mise en solution, trempe, maturation, revenu; avec application éventuelle de déformation plastique.

♦ Le chiffre qui suit la lettre est subdivision et indique le processus général du traitement thermique ou thermochimique.

Exemple : 6 correspond à la mise en solution séparée, trempe et revenu (sans écrouissage complémentaire).

♦ Les chiffres complémentaires, s'il y en a, sont là pour signaler des traitements particuliers.[5]

Notre alliage d'aluminium 2024 est généralement utilisé dans l'état :

T3 : Il correspond à une mise en solution suivie d'une trempe, d'un écrouissage et d'une maturation à la température ambiante.

I.7 Type de classe et classification des alliages d'aluminium

Les alliages d'aluminium les plus répandus sont Al-Cu, Al-Mg, Al-Cu-Mg-Si, ainsi que Al-Zn-Mg-Cu. A l'état d'équilibre, tous ces alliages forment une solution solide faiblement alliée et des phases intermétalliques CuAl_2 , (phase θ), Mg_2Si , Al_2CuMg (phase S), Al_6CuMg_4 (phase T). Al_3Mg_2 , $\text{Al}_3\text{Mg}_3\text{Zn}_3$ (phase T) Tous les alliages d'aluminium peuvent être rangés en trois groupes :

a- Alliages corroyés : destinés à la forge et le laminage, ils sont prévus pour l'obtention des demi-produits (tôles, plaques, feuillards, barres. Profilés, tubes, etc.), ainsi que des pièces de forge et estampées produites par laminage, pressage, forgeage et estampage.

b- Alliages de fonderies : prévus pour le moulage des formes.[2]

c-Alliages frittés : élaborés par frittage suivant la méthode de métallurgie des poudres. [6]

I.8 Alliages corroyés

I.8.1 Désignations des alliages d'Aluminium

Nous désignerons les alliages d'aluminium corroyés suivant les normes de l'Aluminium Association des Etats-Unis. Ces normes affectent à chaque type d'alliage un nombre de quatre chiffres qui permet de les classer en séries. Nous traiterons brièvement des alliages non trempant des séries 1000, 3000 et 5000 puis les alliages à durcissement structural des séries 2000, 6000 et 7000. Les alliages de la série 4000 seront négligés de part leur sous-utilisation. [2][7]

| Série | Désignation | Elément d'alliage principal | Phase principale Présente dans l'alliage |
|-------|-------------|-------------------------------|---|
| 1000 | 1xxx | 99% d'aluminium au minimum | |
| 2000 | 2xxx | Cuivre (Cu) | Al ₂ Cu-Al ₂ CuMg |
| 3000 | 3xxx | Manganèse (Mn) | Al ₆ Mn |
| 4000 | 4xxx | Silicium (Si) | - |
| 5000 | 5xxx | Magnésium (Mg) | Al ₃ Mg ₂ |
| 6000 | 6xxx | Magnésium (Mg)+ Silicium (Si) | Mg ₂ Si |
| 7000 | 7xxx | Zinc (Zn) | MgZn ₂ |
| 8000 | 8xxx | Lithium et autres | Al ₃ Li |

Tableau I.5: Classement en séries de l'Aluminium Association

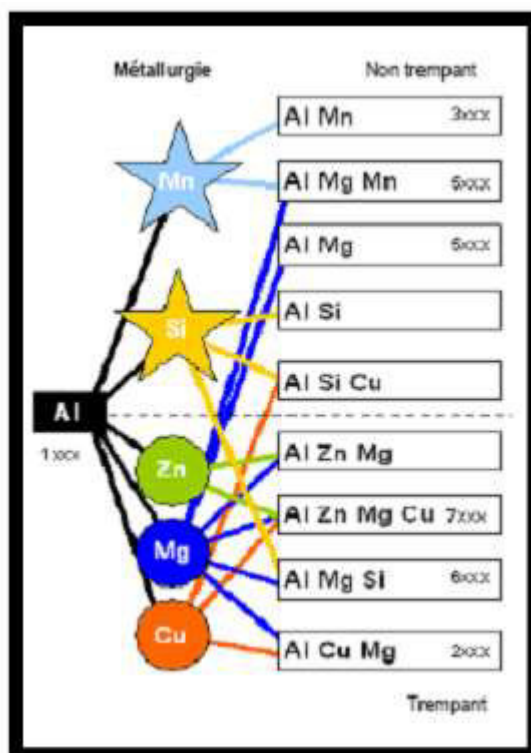


Figure I.2 Différents classes d'alliages d'aluminium [3]

I.8.2 Alliages sans durcissement structural :

I.8.2.1 Série 1000 (aluminium pur) :

Il ne s'agit pas à proprement parler d'alliage puisqu'il s'agit de nuances, en principe sans ajout d'éléments. Cependant, les différentes nuances de la série 1000 se distinguent par la présence plus ou moins importante d'impuretés. Souvent, le troisième chiffre indique le degré de pureté en donnant la valeur de la première décimale à ajouter à 99 % (exemple : l'alliage 1050 contient 99.5 % d'aluminium). Parmi ces nuances, l'alliage 1050 est le plus représenté. Il est utilisé dans de très nombreuses applications et souvent pour des applications de grande consommation. [2][7]

I.8.2.2 Série 3000 (aluminium manganèse) :

L'élément d'alliage de cette série est le manganèse (Mn). Pour certains alliages de cette famille, le taux de magnésium (Mg) est relativement important, on peut parler d'alliage aluminium manganèse magnésium (Al-Mn-Mg). Le manganèse a pour effet d'augmenter les caractéristiques mécaniques. Pour augmenter les caractéristiques mécaniques, il est également possible de jouer sur le taux de cuivre (jusqu'à 0,20 %). Ce sont des alliages à écrouissage. Leurs caractéristiques mécaniques ne sont pas obtenues par traitement thermique mais la déformation à froid. Ces alliages sont caractérisés par des caractéristiques mécaniques relativement faibles, une très bonne aptitude à la mise en forme, une bonne soudabilité et une bonne résistance à la corrosion. L'alliage le plus représentatif de cette série est le 3003. L'alliage 3004 a une meilleure résistance mécanique grâce à l'apport de magnésium. On peut noter également que certains alliages de cette série ont été mis au point pour être émaillés (3009 par exemple). [2][7]

I.8.2.3 Série 5000 (aluminium magnésium) :

L'élément d'alliage est le magnésium (jusqu'à 5%). Ce sont des alliages par écrouissage. Ces alliages ont des caractéristiques mécaniques moyennes qui augmentent avec le taux de magnésium. Ces caractéristiques augmenteront également avec le taux d'écrouissage. Ils ont une bonne aptitude à la déformation. Cette aptitude diminuant si le taux de magnésium augmente. Ils ont un excellent comportement à la soudure et à ce titre sont utilisés en chaudronnerie soudure. Ils ont également un bon comportement aux basses températures. Ils ont un bon comportement à la corrosion qui justifie leur utilisation dans les applications marine. Cependant une exposition à la température (à partir de 65°C) peut générer des problèmes de corrosion extrêmement importants. Ce phénomène augmentant avec le taux de magnésium. Ils sont également utilisés pour certaines applications de décoration grâce à un bon comportement aux traitements de surface (anodisation, SSbrillantage). [2][7]

I.8.3 Alliages à durcissement structural :***

I.8.3.1 Série 2000 (aluminium cuivre) :

Cette partie de sous chapitre sera détaillée dans a I.9.

I.8.3.2 Série 6000 (aluminium magnésium silicium) :

Les éléments d'alliage de cette série sont le magnésium (Mg) et le silicium (Si). Cette famille d'alliage a une grande importance industrielle. Elle est très utilisée pour les profilés. Ils ont une de très bonne aptitude à la déformation (filage, matriçage principalement) et à la mise en forme à froid à l'état recuit. Leurs caractéristiques mécaniques sont moyennes et sont inférieures à celles des alliages 2000 et 7000. Ces caractéristiques peuvent être augmentées par addition de silicium qui donnera le précipité durcissant Mg_2Si . Ils ont une excellente résistance à la corrosion notamment atmosphérique. Ils se soudent très bien (soudure à l'arc ou brasage). [2][7]

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

Pour retrouver une bonne résistance à la corrosion, il faut effectuer ce qui est appelé un sur-revenu ou revenu à double pallier (T7). Ce traitement se distingue par une baisse des caractéristiques mécaniques. Ces alliages se divisent en deux groupes : les 7000 avec addition de cuivre et les 7000 sans addition de cuivre.

♦ Les alliages 7000 avec cuivre :

Ce sont eux qui ont les meilleures résistances mécaniques (à l'état T6). Le sur-revenu fait baisser les caractéristiques mécaniques d'environ 20 %. L'alliage le plus connu de ce groupe est le 7075 utilisé en aéronautique armement, sport.

♦ **Les alliages 7000 sans cuivre :**

En les comparant avec les alliages avec cuivre, ils ont de moins bonnes caractéristiques mécaniques mais une meilleure résistance à la corrosion. Certains, comme le 7020, présentent également de bonnes aptitudes à la soudure. [2][7]

I.9 Série 2000 (aluminium-cuivre) :

L'addition de Cu en tant qu'élément d'alliage principal est liée à la recherche de meilleures propriétés mécaniques pour les alliages d'aluminium. En effet, cela permet la précipitation d'une phase durcissant améliorant ainsi les propriétés mécaniques générales de l'alliage tout en gardant un matériau relativement léger. En revanche, du fait de cette composition chimique et de la microstructure associée notamment, les alliages d'aluminium de la série 2xxx présentent traditionnellement une résistance à la corrosion relativement faible comparativement à celle de l'aluminium pur. [8]

I.9.1 Propriétés générales :

Les alliages Al-Cu-Mg sont des alliages à haute résistance mécanique, ils contiennent environ 2 à 4,9 % Cu, 0,2 à 1,8 Mg, 0,2 à 1,1 Mn et dans certains cas, 0,2 à 0,6 % Si et sont caractérisés par une résistance élevée lorsqu'ils subissent la trempe et le revenu. [6]

Le 2017 anciennement appelé en France duralumin est utilisé pour ces bonnes aptitudes à l'usinage. En revanche ses caractéristiques mécaniques sont moyennes. L'alliage 2024 a de meilleures caractéristiques mécaniques grâce à un taux plus élevé en magnésium. Il présente une bonne tenue à chaud et à la ténacité et à la propagation de criques (fissures) mais une soudabilité et une tenue à la corrosion faible. [2] [8]

| Composition | | | | | | | | | | | | | | |
|-------------|------|------|------|------|------|------|------|----|------|----|-------|------------------|-----------------|-------------|
| Alliage | - | Si | Fe | Cu | Mn | Mg | Cr | Ni | Zn | Ti | Zr+Ti | Autres chaque | Autres total | Al |
| 2017 | Min. | 0.20 | / | 3.50 | 0.40 | 0.40 | / | / | / | / | / | / | / | le reste |
| | Max. | 0.80 | 0.70 | 4.50 | 1.00 | 1.00 | 0.10 | / | 0.25 | / | 0.25 | 0.05 | 0.15 | |
| 2024 | Min. | / | / | 3.80 | 0.30 | 1.20 | / | / | / | / | / | / | / | le reste |
| | Max. | | | | | | | | | | | | | |

Tableau I.6 Composition chimique des alliages de la série 2000. [2] [8]

*** Les concentrations sont en pourcentage massique

| / | 2017 | 2024 |
|---|---------------|---------------|
| Masse volumique (g/cm ³) | 2.79 | 2.77 |
| Intervalle de fusion | 510-640 | 500-638 |
| Coefficient de dilatation linéique (0 à 100 °C) (°C ⁻¹ .106) | 23.0 | 22.9 |
| Module d'élasticité (Mpa) (1) | 74000 | 73000 |
| Coefficient de Poisson | 0.33 | 0.33 |
| Conductivité thermique (0 à 100°C) (W/M°C) | État T4 : 134 | État T3 : 120 |
| Résistivité à 20°C (μΩcm) | État T4 : 5.1 | État T3 : 5.7 |
| Capacité thermique massique (0 à 100°C) (J/kg°C) | 920 | 920 |
| Limite élastique RP0.2} (MPa) | 260 (2) | 300 (3) |
| Limite à la rupture Rm (MPa) | 390 (2) | 440 (3) |
| Allongement (%) | 9 (2) | 9 (3) |

Tableau I.7 Caractéristiques physiques des alliages de la série 2000 [2][8]

(2) Barre filée état T4 (trempé, mûri) diamètre entre 75 et 6 mm

(3) Barre filée état T3 (trempé, écroui, mûri) diamètre entre 50 et 100 mm [2]

I.9.2 L'alliage d'aluminium 2024 :

L'alliage 2024 est un alliage dont les principaux éléments d'alliage sont le cuivre et le magnésium. Sa composition chimique est présentée dans le (Tableau I.7):

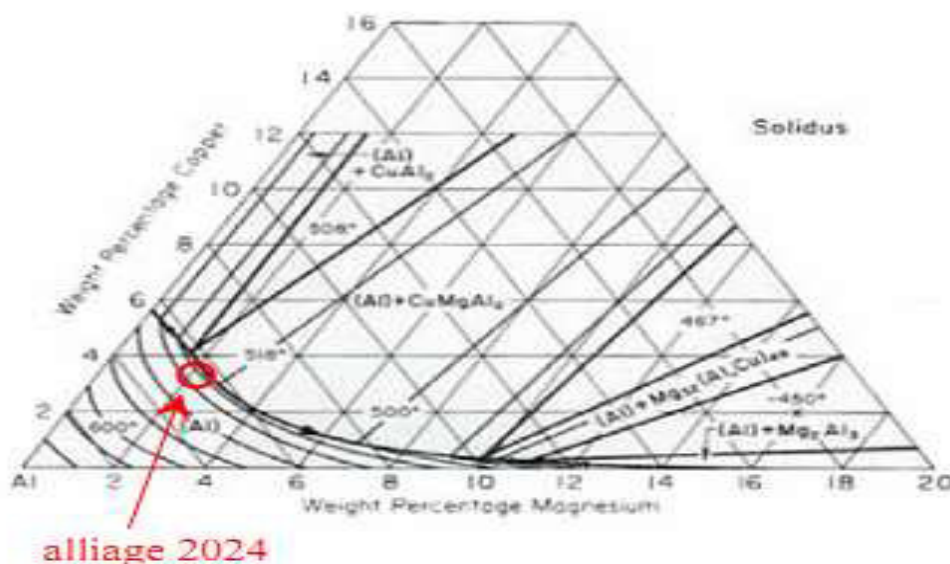


Figure I.4 : Diagramme ternaire Al-Cu-Mg [8]

I.9.3 LES TRAITEMENTS THERMIQUES APLICABLES AU 2024 :

Il est possible d'avoir une large gamme de caractéristiques mécaniques sur une même composition d'alliage, en effectuant des traitements thermiques agissant dans trois sens :

- ◆ **Les traitements d'homogénéisation:** pour faciliter la transformation à chaud ou à froid (filage, étirage, laminage, forgeage).
- ◆ **Traitement d'adoucissement :** accompagné d'une diminution de la résistance mécanique et d'une augmentation de la ductilité.
- ◆ **Traitement de durcissement :** accompagné d'une augmentation de la résistance mécanique.

Mais les traitements thermiques n'influencent pas seulement la résistance mécanique, ils sont susceptibles d'influencer un grand nombre d'autres propriétés aussi importantes comme :

- L'aptitude à la transformation à chaud ou à froid.
- La résistance à la corrosion, à la fatigue, au fluage.
- L'aptitude à l'oxydation anodique.
- La conductivité électrique. [9]

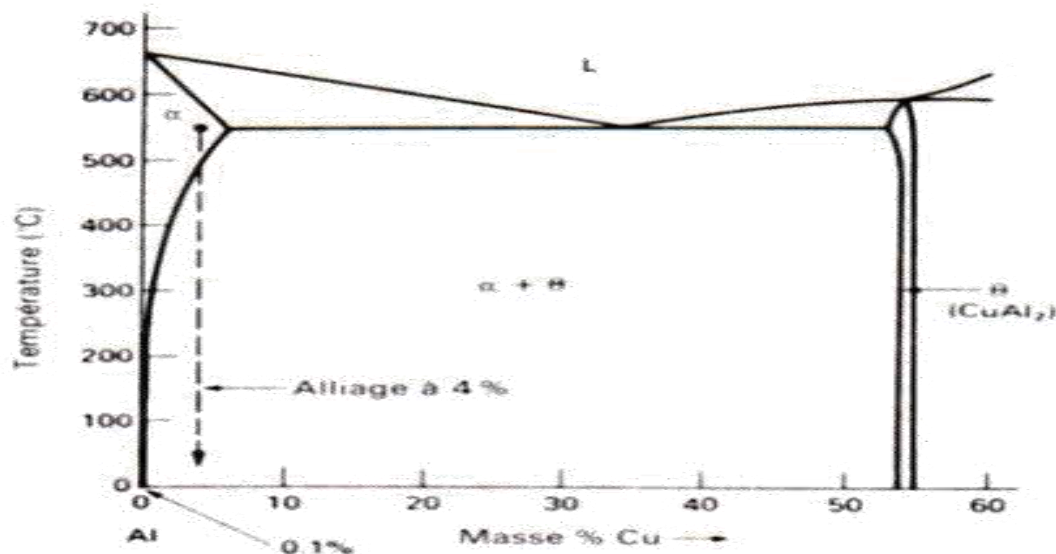


Figure I.5 diagramme binaire (Al-Cu) [2]

I.9.3 .1/ TRAITEMENT D'HOMOGENEISATION :

Ce sont des traitements comportant un chauffage à de température relativement élevée appliqué à certains produits bruts de fonderie ou corroyés, et destinés plus souvent à en faciliter la transformation à chaud ou à froid (filage, étirage, laminage, forgeage).

Ils consistent en général à des maintiens de 6 à 48 heures à des températures allant de 450° C à 600 °C, qui ont pour principal but de dissoudre la phase métallique en excès et de réaliser une homogénéisation de la composition solide. [10]

I.9.3.2/ TRAITEMENT D'ADOUCCISSEMENT :

Sans recourir au recuit (trempe + revenu), il peut être nécessaire d'adoucir un alliage léger pour faciliter sa mise en forme.

S'il s'agit d'un alliage à traitement thermique qui a subi après trempe sa maturation complète, il peut être parfois nécessaire d'améliorer momentanément la malléabilité pour façonner le métal sans affecter les caractéristiques mécaniques. [5]

Ils sont pour but d'adoucir un métal ou un alliage durci par écrouissage ou trempe structural. Dans le cas de l'écrouissage. Ceux sont des traitements de restauration et des recuits de recristallisation.

C'est traitements ont des effets semblables à ceux décrits pour aluminium. Seules les températures de traitement sont plus élevées pour les alliages:

- ◆ le traitement de restauration est effectué à 200-300 ° C pendant 1 à 8 heures.
- ◆ Le traitement de recristallisation est effectué a 200 - 400 ° C pendant 0.5 à 3 heures. [10]

Pour les alliages durcis par traitement thermique, la vitesse de refroidissement allant jusqu'à 200 à 250°C doit être inférieure ou égale à 30°C/h.

On l'applique pour supprimer l'écrouissage et obtenir un grain fin. Dans la plupart des alliages d'aluminium, lorsque la déformation atteint 50 à 75 %, la température de début de recristallisation s'échelonne de 290 à 400°C.

Après le recuit de recristallisation des alliages non durcis par traitement thermique, la vitesse de refroidissement est choisie arbitrairement.

Le recuit incomplet est une modalité de recuit de recristallisation. Il permet d'obtenir des propriétés intermédiaires entre l'état écroui et recristallisé. Dans ce cas, la température de recuit doit être inférieure à celle de la fin de recristallisation pour assurer l'obtention d'une structure sous forme de polygone, ou partiellement recristallisée, qui supprime une partie l'écrouissage.

Le plus souvent, le recuit est appliqué dans le cas des alliages de forge et de laminage non soumis au durcissement par trempe et vieillissement. [5]

I.9.3.3/ Traitements de trempe structurale:

Ils ont effets et des buts totalement différents des traitements de durcissement par des aciers.

Principe :

Le traitement de trempe structurale des alliages d'aluminium comptent une mise en solution solide (**Figure I.6 a**), suivi de :

- ◆ Un refroidissement suffisamment rapide pour maintenir à la température ambiante la solution solide existant à des températures plus élevées. (**Figure I.6 b**).

- ♦ Un traitement de revenu ultérieur effectuée à température ambiante (maturation) ou à une température supérieure qui conduit à un durcissement de l'alliage.



Figure I.6 microstructure obtenues à l'ambiante dans un alliage AL-4%Cu

- a) refroidissement lent à partir de 550 °c, b) refroidissement rapide à partir de 550 °c [10]

I.10 DURCISSEMENT DES ALLIAGES D'ALUMINIUM :

Un des buts des métallurgiques est de produire des matériaux de plus en plus résistants, donc à la limite d'élasticité de plus en plus élevée. Le durcissement s'accompagne généralement d'une perte de ductilité, qui entraîne une diminution de l'allongement.

Les principaux modes de durcissement sont :

- Le durcissement par écrouissage.
- Le durcissement par soluté.
- Le durcissement par affinage du grain.
- Le durcissement par précipitation (dispersion d'une phase étrangère). [5]

I.10.1 / DURCISSEMENT PAR ECROUISSAGE :

L'origine de ce durcissement est due à l'augmentation de la densité de dislocation avec la déformation, jusqu'à 10^{10} ou 10^{12} /cm², car toutes les dislocations ne peuvent disparaître aux surfaces ou aux joints de grains, ou par annihilations mutuelles de dislocation de signes contraires.

Le glissement des dislocations devient de plus en plus difficile au fur et à mesure que la déformation progresse. [5]

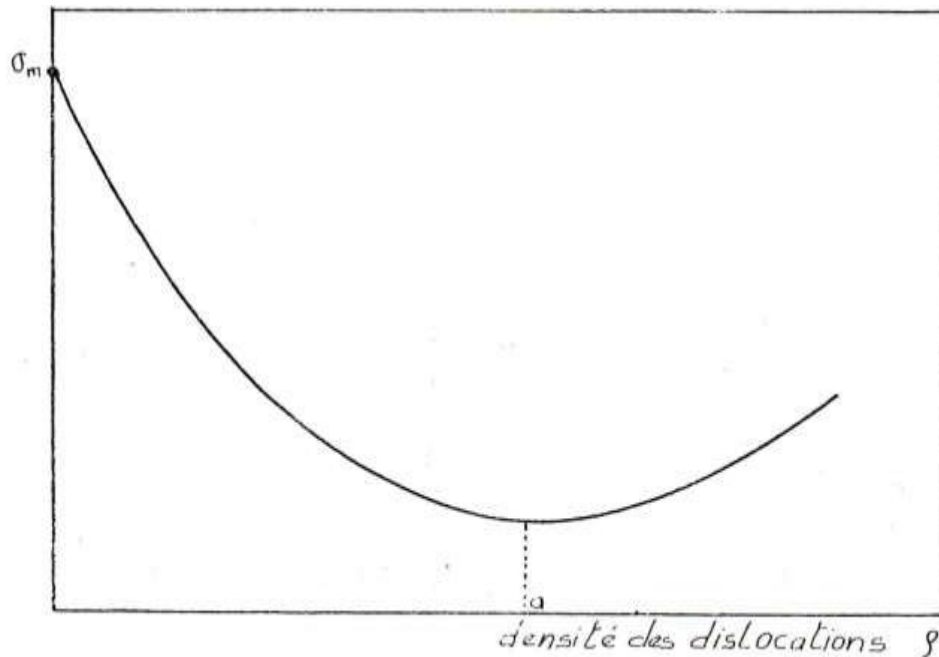


Figure I.7 Rapport entre la résistance à la déformation et la quantité des défauts (densité de dislocations) [9]

I.10.2/ DURCISSEMENT EN SOLUTION :

Ce durcissement peut avoir plusieurs origines, toutes liées à une entrave au mouvement des dislocations, autrement dit à l'existence d'une force de freinage ; cette force provient d'une interaction entre les dislocations et les atomes étrangers en solution, liée à l'effet de taille de l'atome étranger.

Si les atomes étrangers sont suffisamment mobiles (température assez élevée), ils peuvent migrer vers les dislocations et former un (nuage) ou (atmosphère de COTTRELL) qui ancrent les dislocations. [5]

I.10.3/ DURCISSEMENT PAR AFFINAGE DU GRAIN :

Les joints de grains constituent aussi des obstacles à la déformation plastique. Leur effet est d'autant plus efficace que l'orientation des plans cristallins diffère d'un grain à un autre. Ceci explique que les poly-cristaux à grains gros ont une limite d'élasticité plus basse que celle des grains fins. [11]

I.10.4/ DURCISSEMENT PAR PRECIPITES (durcissement structural) :

C'est le mode de durcissement le plus employé ; la précipitation est à la base de la majorité des traitements thermique.

La résistance et la dureté de certains alliages aluminium peuvent être améliorés par une série de traitements thermiques, cette série de traitements constitue un processus nommé « durcissement structural ».

Cette série provoque de très fines particules appelées « précipités », d'une deuxième phase répartie uniformément dans la matrice initiale.

Le traitement qui permet d'obtenir un durcissement structural comporte les trois stades suivants. [5]

A : La Mise en solution :

La mise en solution consiste à chauffer l'alliage jusqu'à une température T_0 située dans le domaine de la phase α , et à maintenir cette température jusqu'à ce que la phase β soit entièrement dissoute, on obtient ainsi un alliage constitué uniquement de la phase α , **Figure 8**.

Cette étape permet de dissoudre toutes les phases ayant pu précipiter antérieurement dans l'alliage, ce qui contribue aussi à diminuer la dureté.

B : La Trempe :

On procède ensuite à un refroidissement rapide jusqu'à une température T_1 , qui correspond en générale à une température ambiante, (ce refroidissement doit être suffisamment rapide pour empêcher toute diffusion qui permettent à une partie de la phase β de se reformer).

A la température T_1 , on obtient une solution solide, dans cet état la dureté et la résistance de l'alliage est médiocre.

Cette étape permet de conserver, pour une période de temps limitée et à température ambiante, l'état de solution solide obtenue à température élevée de ce traitement.

C : Le Revenu (vieillessement):

Appelé aussi vieillissement, qui consiste à chauffer la solution solide obtenue, sursaturée α , jusqu'à une température intermédiaire T_2 , du domaine $\beta + \alpha$, à cette température, la vitesse de diffusion devient appréciable, et un précipité d'équilibre β de composition β_C commence à apparaître sous la forme de fine particules dispersés, ce traitement est appelé « revenu » ou « vieillissement ».

Après un temps de revenu, suffisamment long à la température T_2 , on laisse refroidir l'alliage à la température ambiante, la vitesse de refroidissement n'a guère d'importance, La nature des particules β ainsi que la résistance et la dureté de l'alliage dépendent à la fois de la température T_2 , et la durée du revenu, à cette température pour certains alliages le revenu se produit spontanément, bien que lentement à la température ambiante.

Au cours de cette étape de vieillissement qu'il y a modification des propriétés et durcissement de l'alliage La nature des particules β ainsi que les propriétés mécaniques de l'alliage dépendent à la fois de la température T_2 et de la durée du vieillissement à cette température, au cours duquel

La dureté et la résistance atteignent un maximum, puis diminuent, **figure I.9. [8]**

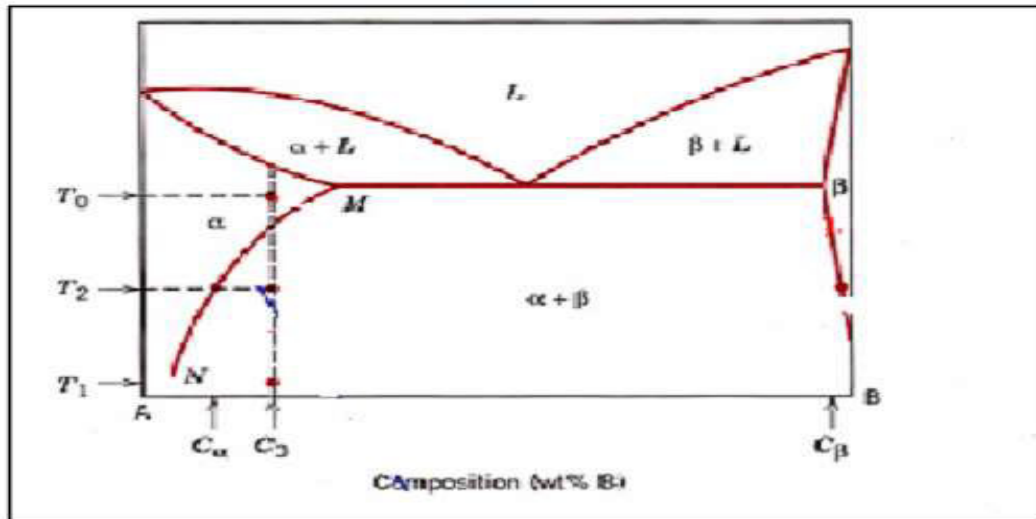


Figure I.8 Diagramme d'équilibre d'un alliage à durcissement structural [8]

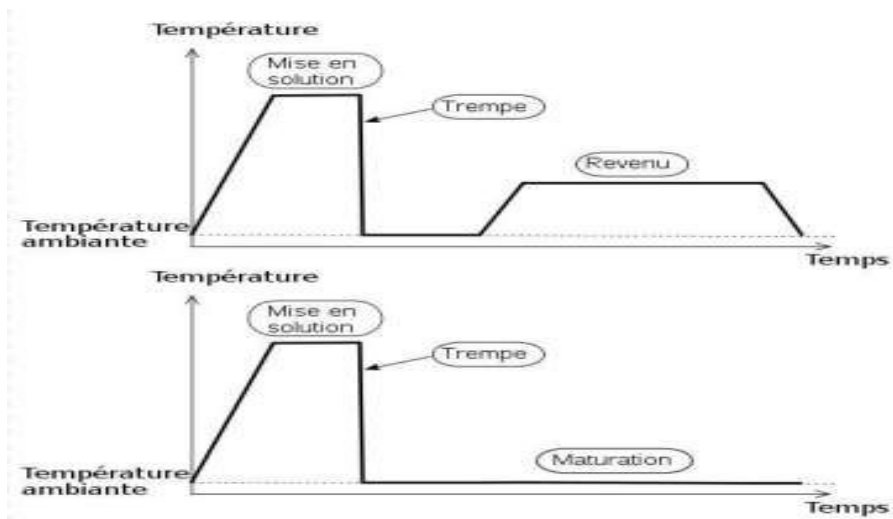


Figure I.9 Cycles de traitement thermique des alliages d'aluminium

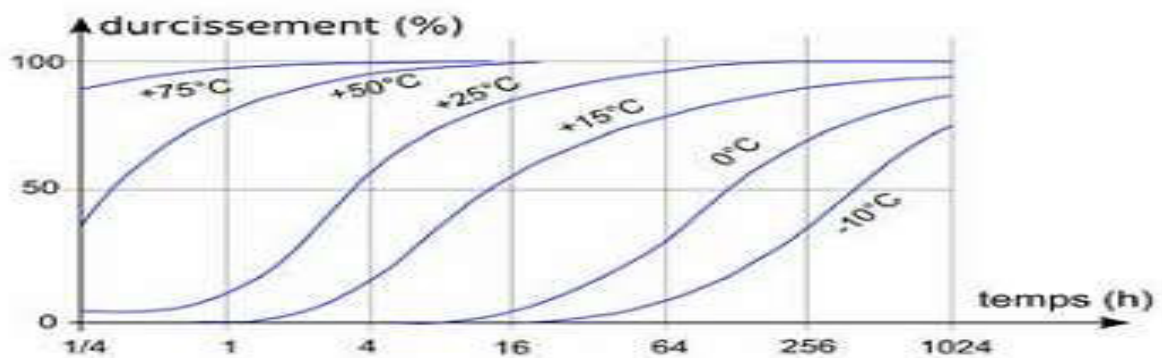


Figure I.10 Durcissement de l'alliage Al-Cu-Mg (4% Cu) pour des températures proches de l'ambiante (maturation)[8]

I.10.4.1 Microstructure de l'alliage 2024 :

Comme cela a déjà été écrit précédemment, le cuivre est ajouté à l'aluminium de manière à obtenir une phase durcissant et par conséquent de meilleures propriétés mécaniques. L'addition de magnésium à l'alliage Al-Cu entraîne également une augmentation significative des propriétés mécaniques de l'alliage lors de l'étape de maturation. [8]

La morphologie et les dimensions des grains du 2024-T3 sont illustrées sur la **figure I.11**.

Ces grains apparaissent homogènes et de faible épaisseur. Leurs dimensions sont d'environ 80 à 100 μm de longueur (selon la direction de laminage), 60 à 80 μm de largeur (selon la direction transverse) et 20 μm d'épaisseur (selon la direction normale). Ces grains sont légèrement allongés dans la direction de laminage. La **figure I.12** montre la microstructure du 2024-T3 de la face 1 pour un grossissement de 500. Les observations au microscope optique permettent essentiellement de caractériser la morphologie des grains. [12]

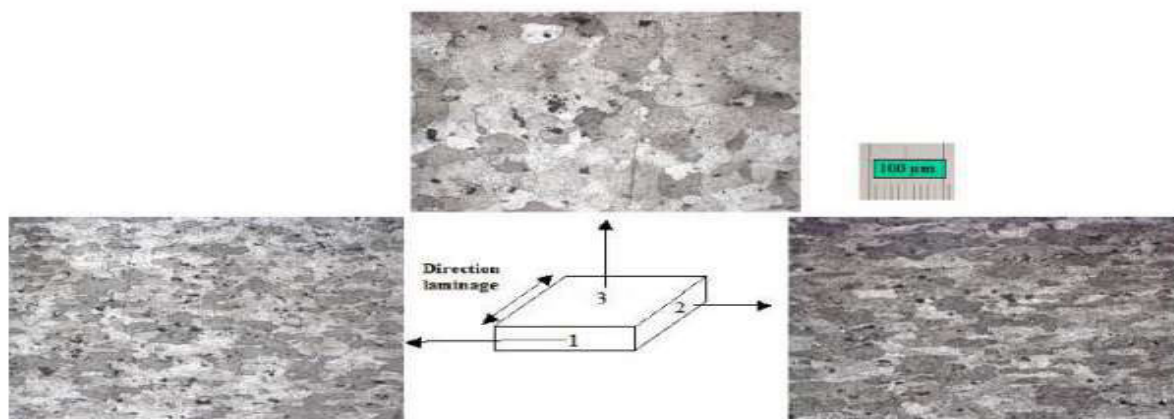


Figure I.11 Morphologie des grains observés au microscope optique selon trois directions 1 [12]

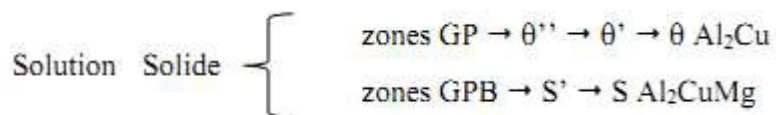


Figure I.12 Grains observés au microscope optique pour un grossissement de 500 sur la face 1 [12]

La plupart des alliages industriels Al-Cu-Mg, y compris l'alliage 2024, contiennent un excès de cuivre par rapport à la coupe quasi binaire Al-Al₂CuMg (les alliages dont le rapport des

teneurs en cuivre et en magnésium est de 2,2 appartiennent au système approximativement quasi binaire Al-Al₂CuMg).

L'alliage 2024 présente donc, suite au traitement de durcissement structural, une séquence de coprécipitation mixte



Les zones GP, dites de Guignier-Preston, sont composées de disques plans parallèles aux plans (100) de la matrice. La phase θ'' est une phase cohérente avec la matrice et qui précipite sous forme de plaquettes parallèles aux plans $\{100\}$ de la matrice. La phase θ' est une phase semi-cohérente avec la matrice précipitant également sous forme de plaquettes. La phase θ est le composé d'équilibre Al₂Cu, qui est totalement incohérent avec la matrice. L'alliage tend toujours vers l'état d'équilibre mais, suivant le traitement de revenu, la décomposition est plus ou moins complexe. Pour une température de revenu inférieure à 200°C, la décomposition de la solution solide sursaturée s'arrête à θ'' ou θ' ; pour des températures supérieures, on peut obtenir directement θ' . Lors d'un traitement de maturation à température ambiante, on n'obtient que les zones GP. La présence de 1,5% de Mg dans l'alliage induit la précipitation de nouvelles phases.

Les zones GPB (Guignier-Preston-Bagaryatsky), appelées ainsi pour les différencier des zones GP, correspondent à un arrangement à courte distance d'atomes de Cu et Mg. Les phases S'' et S' sont des phases de transition respectivement cohérente et semi-cohérente avec la matrice (S'' n'est pas indiquée dans la séquence de précipitation car son existence même est sujette à controverse). La phase S ou Al₂CuMg est une phase à l'équilibre, incohérente avec la matrice et qui précipite sous forme de plaquettes.

A l'échelle du microscope optique, il est possible d'observer les particules intermétalliques grossières. L'alliage 2024 contient des particules plutôt sphériques riches en Cu et en Mg qui correspondent à la phase S ou Al₂CuMg. Elles ont une taille moyenne de l'ordre de 5 μm . On peut également observer des particules de forme irrégulière riches en Cu, Fe et Mn. Ces particules ont une taille moyenne de 30 μm et occupent une fraction surfacique de 2,8% alors que la fraction surfacique couverte par les particules Al₂CuMg n'est que de 1% environ. [8]

I.11/ Le soudage de l'aluminium et de ses alliages

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

Le soudage de l'aluminium crée systématiquement une zone affectée thermiquement (ZAT) dans laquelle les propriétés mécaniques peuvent être réduites jusqu'à 50 % par rapport aux valeurs nominales, dépendant de l'alliage soudé et du procédé utilisé. Généralement, pour le calcul de structures, il est entendu d'étendre cette zone à 2,5cm de chaque côté du joint, à moins de pouvoir traiter thermiquement la pièce après soudage. Les alliages à durcissement par écrouissage, les alliages traitables thermiquement et les alliages de fonderie ne réagissent pas de la même façon au soudage. De plus, ce ne sont pas tous les alliages d'aluminium qui sont soudables.

La plupart des nuances des séries 1000, 3000, 5000 et 6000 sont soudables avec le procédé conventionnel TIG. La série 5000 est celle qui présente les meilleures propriétés de soudabilité. série 2000 et certaines nuances de la série 7000 sont peu recommandables au soudage (risque de fissuration ou crique de retrait avec le cuivre). Les pièces moulées en aluminium sous pression ne sont pas soudables car elles contiennent trop de bulles d'air emprisonnées dans la masse. [2]

CHAPITRE II : SOUDAGE PAR FRICTION MALAXAGE (FSW)

II -1/ Historique

Les premières pièces soudées sont apparues vers 3000 avant JC avec le travail des métaux. Des pièces en bronze sont alors soudées à la poche, puis des pièces en fer sont soudées à la forge.

Il faudra attendre la fin du 19^{ème} siècle pour voir l'apparition des procédés de soudage oxyacétylénique, aluminothermique, à l'arc électrique et le soudage par résistance. [13]

La mise au point de ces technologies a donné une alternative à l'assemblage mécanique tel que le rivetage et a permis d'assurer un gain de temps de production. Les procédés de soudage sont aujourd'hui prépondérants en matière d'assemblage et ont une incidence considérable sur le coût de fabrication et la qualité des produits. De ce fait, tout au long du 20^{ème} siècle, de nouvelles technologies de soudage sont apparues répondant aux besoins industriels. Comme le montre la **Figure II.1**, une grande variété de procédés de soudage a été développée à ce jour. [14]

| | Date d'apparition | Apparition des procédés | Type de procédé |
|------|-------------------|--------------------------------------|--------------------------|
| 1880 | 1886 | Soudage par résistance | électrique |
| | 1895 | Aluminothermie | chimique |
| 1900 | 1902 | Soudage au chalumeau oxyacétylénique | flamme |
| | 1907 | Soudage à l'électrode enrobée | électrique |
| | 1924 | Soudage TIG | électrique |
| | 1930 | Soudage à arc sous flux submergé | électrique |
| 1950 | 1943 | Soudage MIG | électrique |
| | 1955 | Soudage MAG | électrique |
| | 1956 | Soudage par faisceaux d'électrons | faisceau à haute énergie |
| 1960 | 1956 | Soudage par friction rotative | mécanique |
| | 1957 | Soudage par explosion | chimique |
| 1990 | 1965 | Soudage Laser | faisceau à haute énergie |
| | 1991 | Soudage par friction malaxage | mécanique |

Liste non exhaustive d'apparition des procédés de soudage.

Figure II.1 Année d'apparition des principaux procédés de soudage [14]

Le soudage par friction-malaxage est plus communément appelé Friction StirWelding, FSW. [14][15][16]

II-2/ Définition de soudage

Le soudage est une opération consistant à réunir deux ou plusieurs parties constitutives d'un assemblage de manière à assurer la continuité entre les parties à assembler, soit par chauffage, soit par intervention de pression, soit par l'un et l'autre, avec ou sans emploi d'un produit d'apport dont la température de fusion est du même ordre de grandeur que celle du matériau de base. [14]

II-3 / LES DIFFÉRENTS PROCÉDÉS DE SOUDAGE

En général, nous pouvons classer les différents procédés de soudage par leur modes (fusion, sans fusion) ou bien par un classement basé sur les sources d'énergie (arc électrique, résistance électrique) et sur les moyens de protection mise en œuvre contre la contamination atmosphérique.

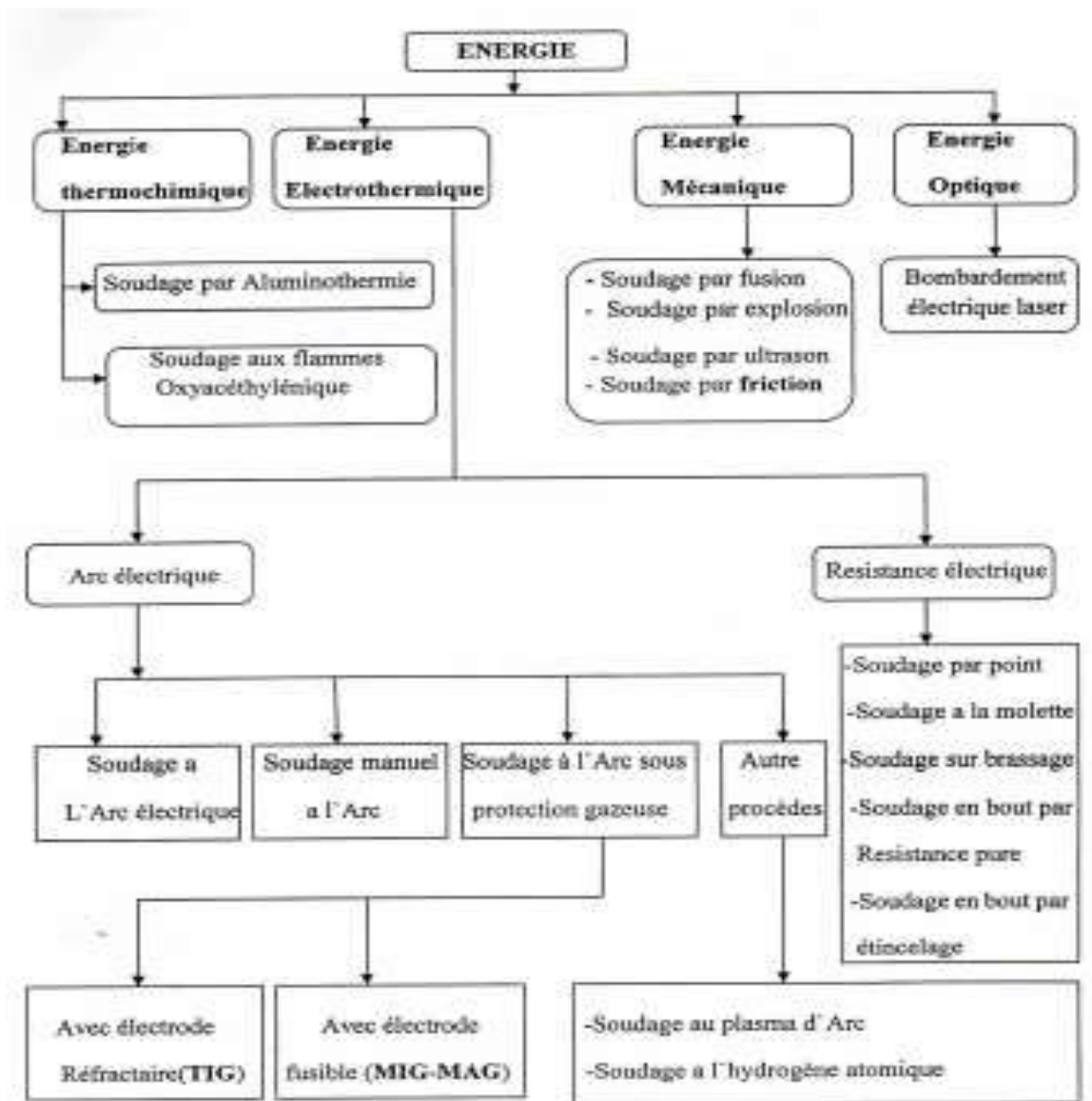


Tableau II.1 Organigramme des différents procédés de soudage

II-4/ Le soudage en phase solide

II-4-1/ Généralités

Le soudage en phase solide est la classe des procédés qui ne nécessite pas un métal d'apport, et les deux surfaces sont jointes sans fondre le métal de base.

Les procédés de soudage en phase solide ont été développés avant ceux passant par une phase liquide à cause des exigences d'apport d'énergie moins sévères pour les premiers. Un exemple bien connu est le soudage par forgeage; déjà utilisé dans la fabrication des armes.

Dans ces procédés, les joints sont établis par au moins un des trois mécanismes suivants :

- 1- Un mouvement relatif des deux pièces à joindre donne lieu au cisaillement des points de contact, produisant des régions non-contaminées qui sous pression forment des joints métalliques entre les pièces. Ce mécanisme intervient dans les procédés de soudage par friction et le soudage par ultrason.
- 2- Une déformation coordonnée des deux pièces à joindre produit des régions non contaminées qui sous pression forment des joints métalliques entre les pièces.
- 3- La diffusion préférentielle suscitée par une force qui met l'interface sous pression permet de réduire le volume de pores entre les surfaces à joindre.

Les procédés de soudage en phase solide sauf le soudage par diffusion nécessitent donc toujours une déformation très importante, ce qui limite ces procédés aux métaux ductiles et aux géométries simples. [17]

II-4-2/ Les procédés de soudage en phase solide

A/ Le soudage par friction

Le soudage par friction utilise la déformation relative des deux pièces à souder pour produire des interfaces non-contaminées. En même temps, l'énergie dissipée par frottement chauffe les interfaces pour faciliter leurs cisaillements. Pour des géométries cylindriques, le mouvement est en général fait par une rotation ce qui permet de garder pendant tout le cycle de soudage un alignement précis. Les deux pièces sont pressées l'une contre l'autre de manière que le mouvement relatif produise de la chaleur par frottement. Ensuite, la rotation est arrêtée et la pression est augmentée. Cela produit un joint forgé par déformation coordonnée.

Il existe plusieurs façons pour réaliser ce mouvement relatif

- une partie tourne, l'autre est fixée
- les deux pièces tournent en sens opposé
- les deux pièces tournent avec la même vitesse et une troisième pièce au centre reste immobile (une sorte de métal d'apport) joignant ainsi les deux premières pièces. [17] voir **figure II.2.**

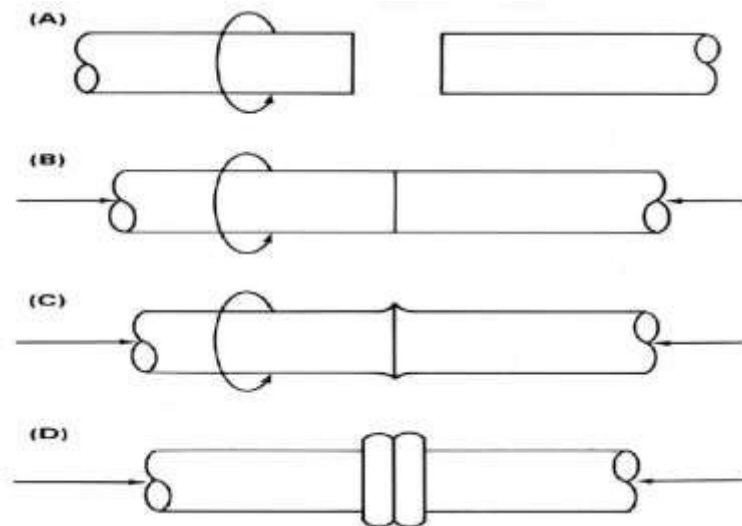


Figure II.2 Schéma du procédé de soudage par friction, a) phase d'accostage des pièces, b) phase de frottement et c) phase de pression élevée d) phase de joint forgé.

B/soudage par friction malaxage(FSW)

B-1/ Définition

Le soudage par friction malaxage, plus communément appelé Friction StirWelding (FSW), a été développé par Mr Thomas Wayne à l'institut de soudure britannique (The Welding Institute, TWI). Le premier brevet sur cette technologie a été déposé en décembre 1991 par TWI. Il permet un assemblage par voie solide, ce qui supprime les défauts liés à la solidification et conduit à des contraintes internes plus faibles que les procédés de soudage classiques. Ce procédé est adapté à plusieurs matériaux : Acier, Titanium, le cuivre et plus particulièrement aux alliages d'aluminium à durcissement structural (série 2000, 6000, 7000), difficilement soudable par voie classique.[18]

B-2/Domaine d'application

Le procédé de soudage par friction malaxage est appelé à connaître un développement important dans les prochaines années. De nouvelles applications voient constamment le jour.

Il est principalement utilisé dans l'industrie de la construction et du transport, telle que l'industrie spatiale, aéronautique, ferroviaire, automobile, maritime... Une liste non exhaustive d'applications du procédé dans différentes industries est présentée ci-dessous :

- ◆ **Industrie Aéronautique** soudage de tôles en remplacement du rivetage pour les ailes, le fuselage, soudage de réservoirs cryogéniques, réservoirs de kérosène, corps de missiles ...
- ◆ **Construction navale** pont, plate-forme d'atterrissage d'hélicoptères, mât et bôme, coque de bateau...
- ◆ **Transport ferroviaire** planchers de voitures, corps de container...
- ◆ **Automobile** raboutage de tôles, réservoir d'essence, carter de moteur électrique, jantes...[18]

B-3/ Avantages et inconvénients de la technique

B-3-1/ Avantages

Ses avantages sont :

- Pas de métal d'apport ni de gaz.
- Absence de discontinuité.
- Temps de cycle court..
- Automatisable.
- Absence de fumées et de projection.[18]
- L'absence de métal d'apport permet de réaliser des joints chimiquement homogènes
- Les défauts internes des procédés par fusion, tels le manque de compacité, les soufflures, les criques n'apparaissent pas, il ne génère pas de fissure à chaud.[19][15]
- Il permet de réaliser des soudures hétérogènes
- Le procédé est propre, par exemple il n'est pas nécessaire de décaper les tôles d'aluminium avant de les souder, et l'utilisation de consommables tels qu'un gaz de protection ou un fil d'apport n'est pas requise [10]. De plus, le soudage par FSW est un procédé peu consommateur en énergie.[15]
- L'application du procédé FSW implique une mécanisation de type machine-outil **figure II.3** s'apparentant à une installation de fraisage qui assure les fonctions classiques de support et de déplacement de la tête de soudage, et ne nécessitant pas une qualification spécifique de l'opérateur.

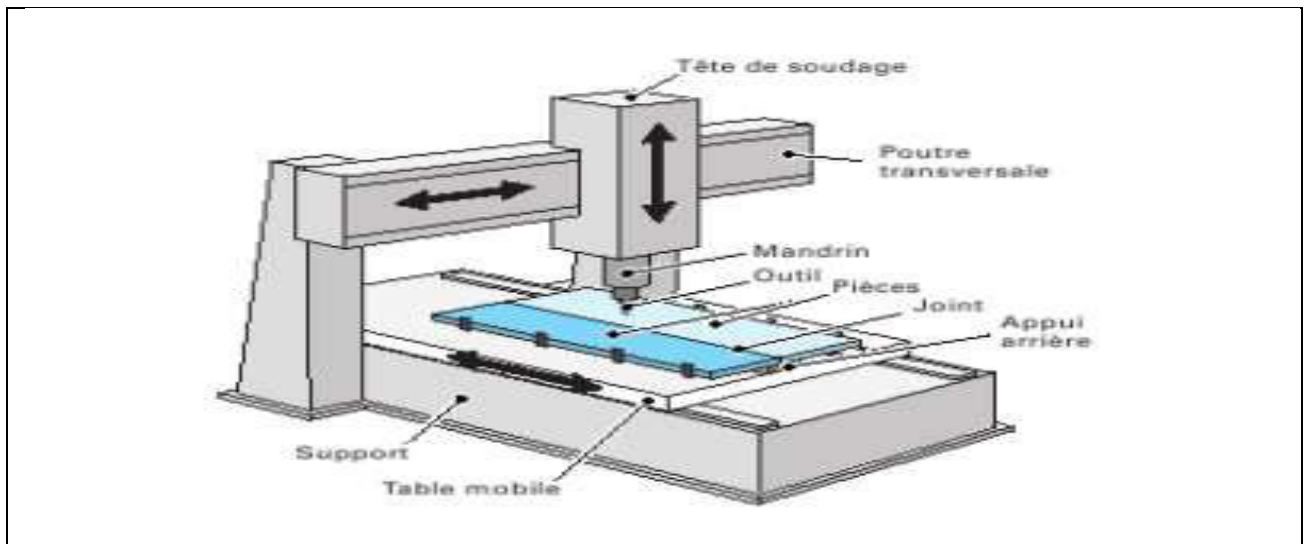


Figure II.3 Schéma d'une machine-outil pour le FSW [15] [21]

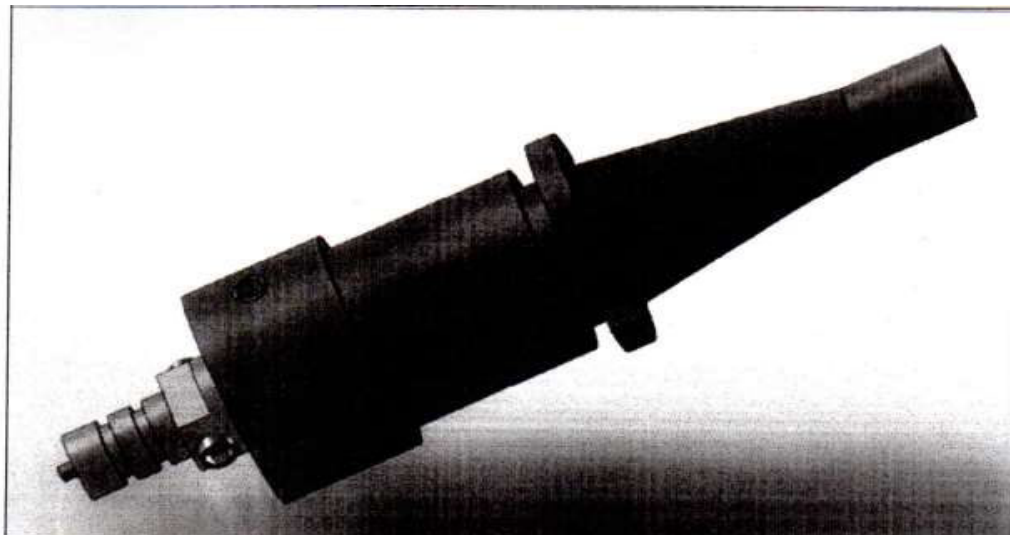
B-3-2/ Inconvénients

Ses inconvénients sont

- ne convient pas aux matériaux à haute résistance.
- nécessité d'avoir un appui (forces transversales par l'arrière).
- présence de cratères en fin de soudure.
- Usure des outils suivant les matériaux à assembler..
- Mal adapté au soudage 3D.
- Trou à la fin de chaque soudure.
- Taquets de début et de fin de soudure.[18]

B-4/ Outil de soudage

La forme de l'outil de soudage constitue la base du procédé car il ouvre son potentiel d'applications en termes de matériaux, d'épaisseurs soudables et de performances techniques et économiques. [21]



FigureII.4Schéma général de l'outil FSW[18]

A l'origine du procédé, il comporte essentiellement un épaulement associé à un pion coaxial l'un et l'autre de révolution. Il est apparu intéressant, sinon primordial, d'affecter le pion de reliefs sous forme de nervures circulaires ou hélicoïdales dans le but d'augmenter l'effet de malaxage du métal et, par suite, de rendre plus facile la formation de la soudure.

Les matériaux utilisés pour les outils sont principalement des aciers résistant à haute température et ayant un bon comportement à l'usure, car en fonctionnement, la température de l'outil s'élève à 300/400 ° C environ.

Les effets de l'outil sur la formation de la soudure combinent, la plupart du temps, celui de l'épaulement et celui du pion, indissociables dans le fonctionnement du système.[18]

B-4-1/ Épaulement

Le rôle de l'épaulement est de fournir une butée déterminant la pénétration du pion ainsi que de bloquer le reflux de la matière vers le haut. Sa forme est globalement plane et perpendiculaire à l'axe de rotation, ses dimensions transversales restant suffisamment grandes et de cinq fois environ le diamètre du pion afin de couvrir totalement la zone affectée.

Différentes dispositions ont été expérimentées dans lesquelles, par exemple, l'épaulement a un léger dégagement intérieur, et sa portée ne s'exerce alors que sur la périphérie en formant des stries caractéristiques, ou encore comporte des ondulations concentriques dont l'effet de friction, encore que peu ou pas pénétrant, permet de mieux contrôler la surface de la soudure.[18]

B-4-2/ Pion

Le pion a des dimensions appropriées à la nature des matériaux et à l'épaisseur à souder. Sa longueur est adaptée à la pénétration, qui est nécessairement complète en principe, et elle ne doit pas excéder l'épaisseur des tôles à souder. Ainsi qu'on peut le voir sur la **figureII.5**, le pion peut prendre diverses formes simples ou sophistiquées. Il est généralement tronconique et (ou) prismatique avec évidement ou collets hélicoïdaux subtilement répartis. Certains profils intéressants ont fait l'objet de marques déposées.



FigureII.5Types classiques d'outils du TWI[21]

B-5/Paramètres du procédé

De nombreux paramètres ont un rôle non négligeable sur la qualité d'un assemblage :

- La vitesse d'avance de l'outil V_a .
- La vitesse de rotation V_r .
- L'effort axial F_z appliqué sur l'outil suivant son axe de rotation, afin de compenser la pression formée dans la zone de soudure.[21]
- Dimensions de l'outil : diamètres de l'épaulement et du pion, longueur du pion
- L'angle d'inclinaison de l'outil dénommé angle de déplacement α .
- Localisation de la plongée de l'outil (ce paramètre donne l'endroit où est introduit l'outil dans les plaques en fonction des bords des plaques),

B-5-1/La vitesse de rotation et vitesse d'avance

Les vitesses de rotation et vitesses d'avances de l'outil varient en fonction de la nature de l'alliage à assembler et les dimensions des pièces. Ces paramètres devront donc être adaptés afin que réchauffement et le brassage de la matière soient optimaux tout en assurant une bonne cadence de soudage. La vitesse de rotation est généralement exprimée en tour par minute et la vitesse d'avance en mm par min.

B-6/ Principe général du soudage par friction malaxage (FSW)

Contrairement au procédé de soudage par friction « classique », les pièces à assembler n'ont pas de mouvement relatif l'une par rapport à l'autre. Ceci lui offre un plus large choix de configurations de joints soudables. Ce procédé, innovant, permet de souder à l'état « solide », c'est-à-dire sans atteindre la température de fusion.

Le principe de soudage est simple, les deux tôles à souder sont mises en contact et solidement bridées. L'outil en rotation (400 à plusieurs trs/min) pénètre la matière puis se déplace le long du joint à souder (jusqu' à 1000mm/min)[19]

Ce procédé est de réaliser une soudure de proche en proche en malaxant localement la matière des deux pièces à assembler. La liaison métallurgique est obtenue à chaud, mais en dessous de la température de fusion des matériaux. **Figure II.6[14]**

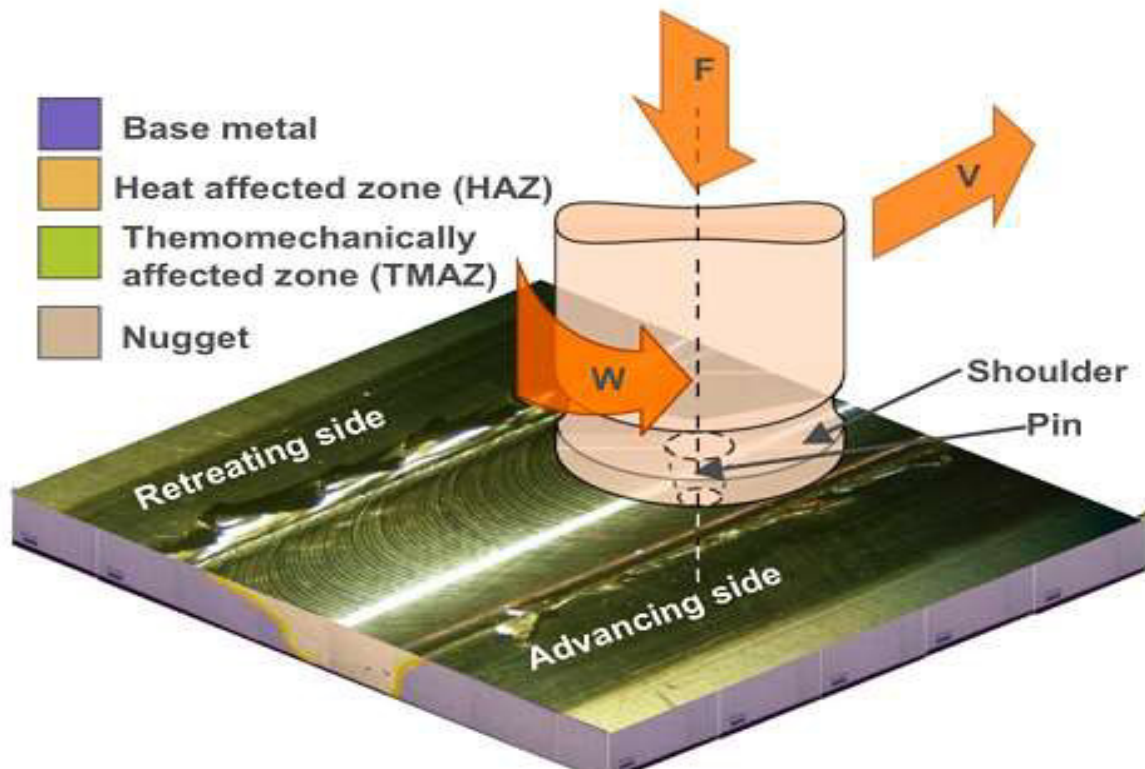


Figure II.6 Principe général du procédé de soudage par friction malaxage [22]

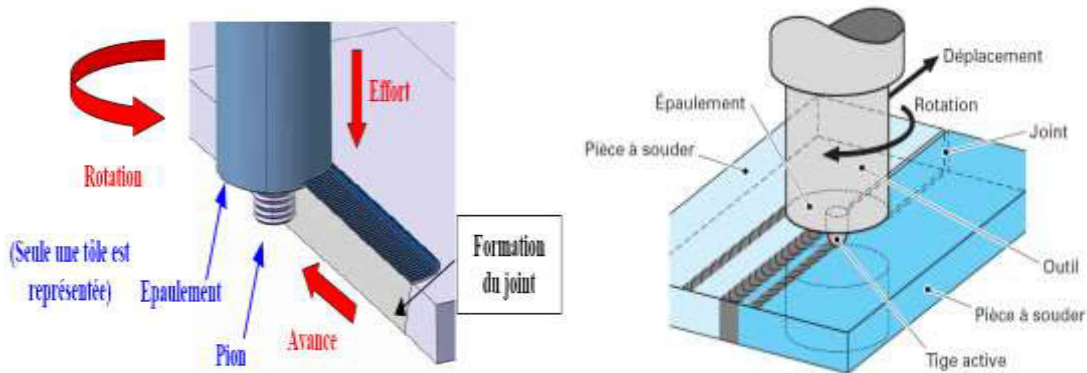


Figure II.7 : Principe du soudage par Friction-Malaxage (FSW).

Le procédé de soudage par friction malaxage peut être décomposé en 4 étapes :

B-6-1/♦ Pénétration de l'outil

L'outil composé d'un pignon de géométrie plus ou moins complexe et d'un épaulement de diamètre de 2 à 2.5fois supérieur au pignon est mis en rotation rapide (entre 100 tr/min). Sous un effort défini, le pignon entre en contact avec la surface des tôles à assembler.[16]. La chaleur générée par le frottement pignon-matière provoque un ramollissement local de la matière et permet la pénétration du pignon jusqu'à ce que l'épaulement entre en contact avec la surface des pièces **Figure II.7.**[23][22]

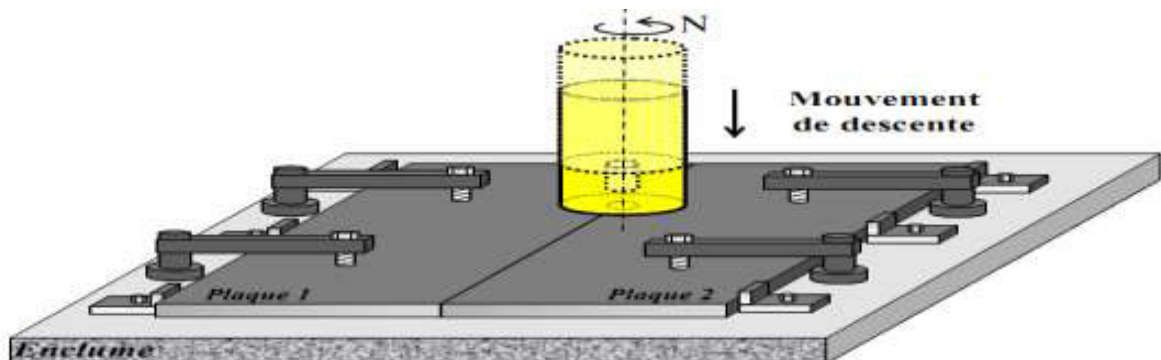


Figure II.8 Phase de Pénétration de l'outil

B-6-2/ ♦ Temps de préchauffage

Afin de générer l'apport de chaleur nécessaire pour obtenir un volume de matière à l'état pâteux suffisant au voisinage de l'outil, celui-ci est maintenu en rotation pendant un temps appelé Dwell-time ou temps de préchauffage (Dt).

Cet intervalle de temps dépend des matériaux à assembler (il faut au moins atteindre des températures de forgeabilité des matériaux de base), des épaisseurs et des configurations]

B-6-3/ ♦ Soudage

Après préchauffage, l'outil en rotation se déplace le long du joint à une vitesse définie (jusqu'à 2 m/min). Par un mécanisme combiné d'extrusion par le pion et de forgeage par l'épaulement, le cordon est réalisé de proche en proche. Une nouvelle structure métallurgique commune aux deux matériaux est formée grâce à des phénomènes de restauration-recristallisation.

La liaison métallique est ainsi assurée sans atteindre la température de fusion des matériaux de base, ce qui permet de s'affranchir de problèmes liés à la solidification qui apparaissent en utilisant les procédés de soudage classiques (porosités, fissuration à chaud,...) **Figure II.9.[16]**

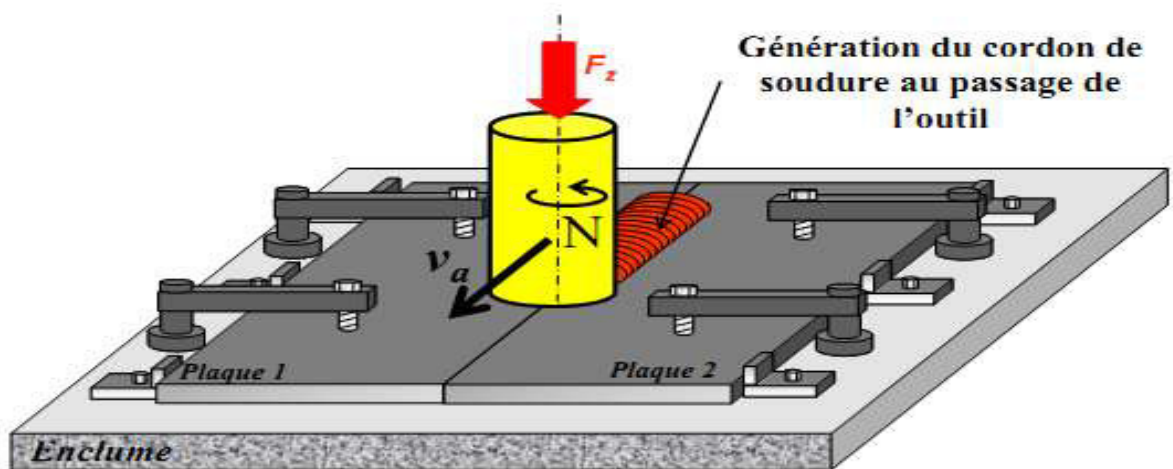


Figure II.9 Phase de soudage

B-6-4/ ♦ Rétraction de l'outil

Lorsque la longueur soudée est réalisée, l'outil en rotation est retiré de la matière. Suivant la technologie de soudage utilisé, il reste en fin de soudage une empreinte laissée par le pion (**Figure II.10.[16]**

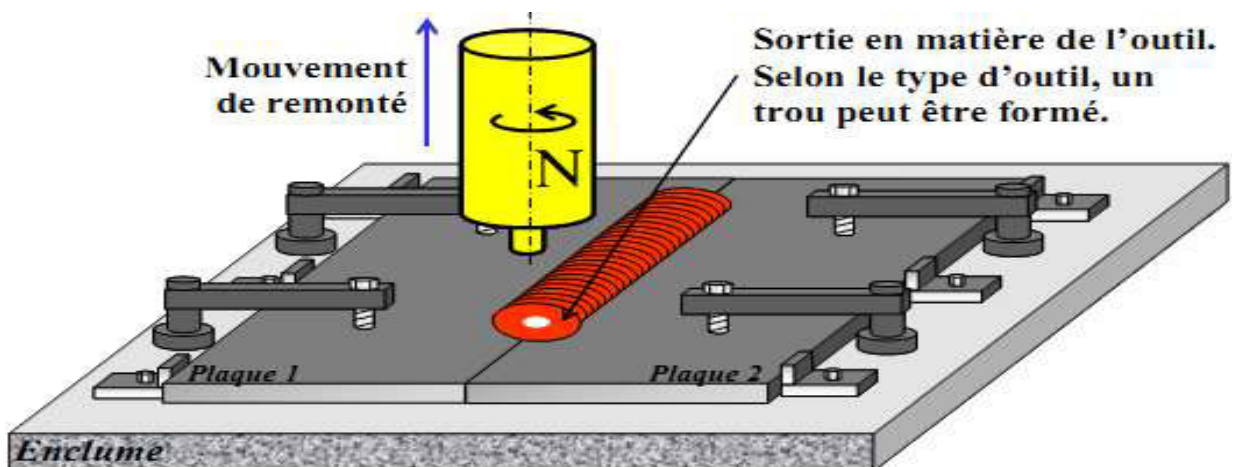


Figure II.10 phase de retrait de l'outil

B-7/ Caractérisation métallurgique de la zone soudée par FSW :

B-7-1/ Évolutions macrostructurales de la zone soudée

La microstructure des joints soudés par friction malaxage a été découpée selon les régions suivantes figure II.11 [15]

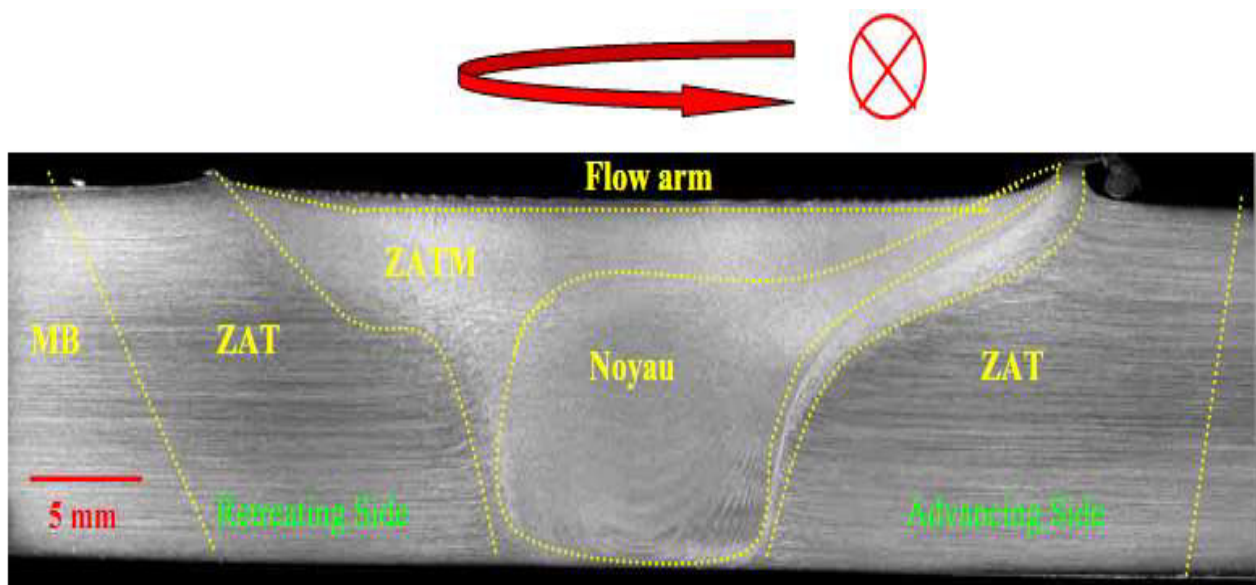


Figure II.11 Coupe macrographique d'un joint soudé par FSW sur un alliage d'aluminium 2024-

A/ ♦ Métal de base (MB)

Ainsi, au loin du cordon, le métal de base (MB) ne subit ni déformation, ni d'échauffement suffisant pour modifier sa structure.[17]

Il s'agit de la partie la plus éloignée du centre de la soudure ; dans cette zone, le matériau n'est pas déformé, et bien qu'ayant pu subir un cycle thermique pendant le soudage, n'en est pas affecté en termes de microstructure et de propriétés mécaniques.[15]

B/ ♦ Zone affectée thermiquement (ZAT)

Dans cette zone plus proche du centre de la soudure, le métal a subi un cycle thermique, dont la température maximum dépasserait 250 °C, modifiant la microstructure ou les propriétés mécaniques. La forme des grains est identique à celle rencontrée dans le métal de base.

L'extension latérale de la zone affectée thermiquement est en général de l'ordre du centimètre.[15]

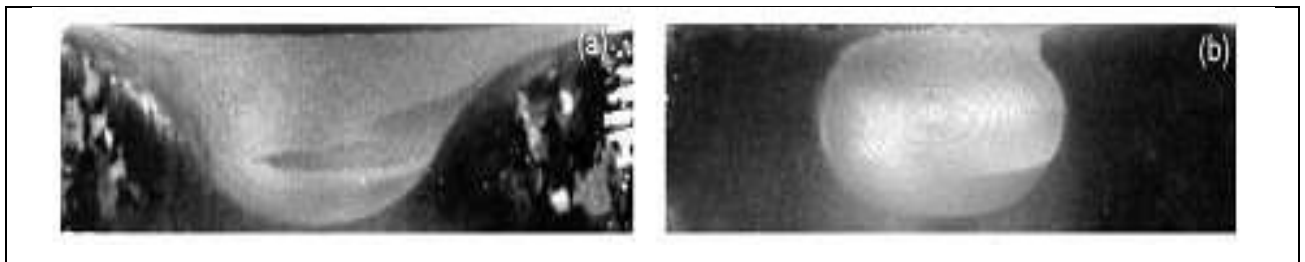
C/ ♦ Zone affectée thermomécaniquement (ZATM)

Cette zone, se trouvant autour du noyau, est propre au FSW. Elle est à la fois déformée plastiquement et affectée thermiquement. La frontière entre la zone centrale de la soudure et la

ZATM est généralement très marquée, souvent plus du côté « advancing side ». Une recristallisation partielle est également observée le long de cette frontière

D/ ♦ Noyau soudé **

La zone au centre de la soudure est habituellement appelée noyau soudé. Elle correspond aux maximums de déformation et de température. Les mesures de température dans cette région sont délicates et sont estimées à partir de la microstructure finale du joint. Dans le cas des alliages d'aluminium, la température maximum serait comprise entre 425 °C et 500 °C. La forme du noyau est très variable et dépend étroitement de l'alliage et des paramètres du procédé.[15]



FigureII.12 : Noyaux soit en forme de cuvette soit en forme d'ellipsoïde [15]

Son diamètre est légèrement supérieur à celui du pion. Cette zone montre souvent un motif en forme d'ellipses concentriques (« onion rings ») comme sur la (figureII.12 b). [15]

B-8/ Dureté en travers du joint

L'allure du profil de dureté à travers les soudures FSW dépend de la nature du durcissement du matériau, selon qu'il soit par écrouissage ou par précipitation.[15].

B-8-1/ Durcissement par écrouissage

Dans le noyau, le cycle thermique a pour effet de restaurer et surtout de recristalliser la microstructure. Si l'état de départ est recristallisé (état O), la dureté du joint soudé sera proche de celle de départ. Un durcissement est observable selon la taille des grains dans le noyau. Un matériau pris dans un état écroui (état H) présente une diminution substantielle de la dureté de la zone soudée suite à sa recristallisation. Les deux possibilités sont illustrées par la (figureII.13a).

Elle présente le profil de dureté de deux joints soudés dans les mêmes conditions d'un alliage 5454 soit dans un état restauré soit dans un état écroui. La dureté du noyau d'un matériau au départ restauré est proche de celle d'un matériau initialement écroui. Le traitement thermomécanique imposé dans le noyau efface donc toutes différences entre les deux états de départ.[15]

B-8-2/ Durcissement par précipitation **

Les soudures par FSW de matériaux à durcissement structural présentent un profil caractéristique en « W » (**figure II.13b**) [15].

Dans le noyau, il est admis que le cycle thermique remet en solution toute la précipitation durcissant, une fraction de celle-ci reprécipite lors du refroidissement de manière hétérogène et le reste lors de la maturation à température ambiante. Ceci a pour effet d'effacer tous les traitements thermiques antérieurs, et par conséquent l'état du noyau dépend peu de l'état initial.

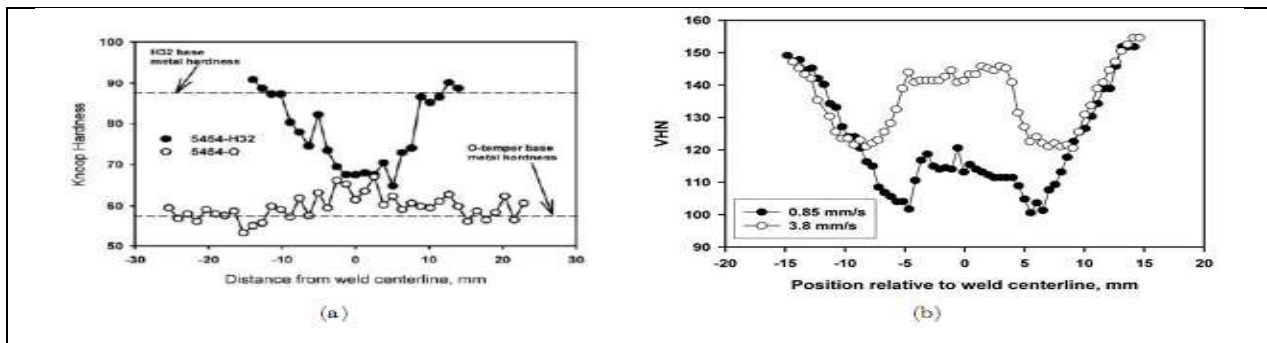


Figure II.13 [15]: profils de dureté (a) Profils de dureté d'un joint soudé par FSW d'un alliage 5454 soit dans un état écroui (symbole H) soit dans un état recuit (symbole O). (b) Profils de dureté d'un joint soudé par FSW à deux vitesses de soudage

La ZATM présente une précipitation grossière et hétérogène qui correspond au minimum de dureté. Le minimum de dureté est plus large pour un état revenu (T6) que pour un état mûri (T3).

Dans la zone affectée thermiquement, l'effet du soudage dépend de l'état initial :

- pour un état revenu, les précipités coalescent, ce qui s'accompagne d'une diminution de la dureté ;
- pour un état mûri, loin de la soudure, les précipités sont susceptibles de se dissoudre sans reprécipiter, ce qui explique la présence du minimum extérieur pour des joints en 2024-T3.

Pour des zones de plus en plus proches de la soudure, l'effet du cycle thermique déplace de plus en plus la précipitation sur le chemin classique nucléation-croissance-coalescence, ce qui explique l'augmentation suivie de la diminution de la dureté. [15]

CHAPITRE III : MATERIAUX ET TECHNIQUES EXPERIMENTALES

III-1MATERIAUX ET COMPOSITIONS CHIMIQUES

Le matériau 2024T3 est un Al-Cu-Mg qui présente un durcissement structural. Il est caractérisé par sa légèreté et ses meilleures caractéristiques mécaniques. Il présente une bonne tenue à la ténacité et à la propagation des fissures, grâce au taux élevé de Magnésium. Cet alliage est utilisé dans les structures aéronautiques, dans les voitures et dans d'autres applications.

Notre matériau a été remis par le service de la maintenance d'Air Algérie.

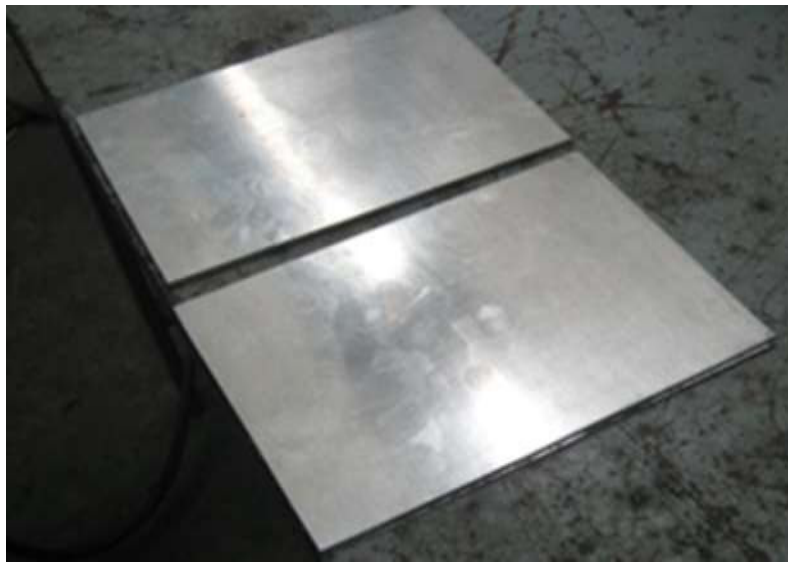


Figure III.1 tôles de AL2024

| Alliage | Si | Fe | Cu | Mn | Mg | Cr | Zn | TI | Zr + Ti | Autres |
|---------|-----|-----|--------------|---------------|--------------|-----|------|------|------------|--------|
| % | 0,5 | 0,5 | 3,8 - 4,9 | 0,3 - 0,9- | 1,2 - 1,8 | 0,1 | 0,25 | 0,15 | 0,2 | 0,2 |

Tableau III.1 Composition chimique d'alliages 2024 (% en poids)

| / | 2024 |
|--|---------------|
| Masse volumique (g/cm ³) | 2.77 |
| Intervalle de fusion | 500-638 |
| Coefficient de dilatation linéique (0 à 100 °C) (°C ⁻¹ .10 ⁶) | 22.9 |
| Module d'élasticité (Mpa) | 73000 |
| Coefficient de Poisson | 0.33 |
| Conductivité thermique (0 à 100°C) (W/M°C) | État T3 : 120 |
| Résistivité à 20°C (μΩcm) | État T3 : 5.7 |
| Capacité thermique massique (0 à 100°C) (J/kg°C) | 920 |
| Limite élastique RP0.2} (MPa) | 300 |
| Limite à la rupture Rm (MPa) | 440 |
| Allongement (%) | 9 |

Tableau III.2Caractéristiques physiques et mécaniques d'alliage 2024

III-1 -1/ Les éléments de l'outil FSW

Les figures suivantes présentent respectivement les schémas de l'outil FSW et ses différentes composantes.

On signale que les outils utilisés dans notre procédure expérimentale (soudure) sont fabriqués en tournage dans L'atelier de Mécanique au niveau d'UFI.

Dans notre cas, on a utilisé des différents types d'aciers d'outil qui sont bien montré dans le tableau suivant :

| Out il | matière | Composantes Chimiques | Pion (mm) | Diamètre pion(mm) | Diamètre épaulement (mm) | Trempe à l'huile | Revenu |
|--------|-------------|-----------------------|-----------|-------------------|--------------------------|------------------|-------------------|
| 1 | Z80WC 18 | Fe,W,Cr,V,Mn,Mo | 3,7 | 7 | 21 | 1300°C | (double)5 75°C |
| 2 | 30NCD 16 | Fe,Ni,Cr,Mo,Mn | 4,7 | 6 | 18 | 950°C | 200°C |
| 3 | 42CD4 | C,Cr,Mo | 3,3 | 5 | 15 | 840°C | 200°C |
| 4 | 42CD4 | C,Cr,Mo | 2,8 | 6 | 18 | 840°C | 200°C |

Tableau III.3 conditions de fabrication des outils de FSW

Après la fabrication des outils, ils ont été traités thermiquement et misent dans un four à une température qui dépasse des fois 1000°C, après tremper à l'huile.

Les figures suivantes présentent respectivement les outils FSW fabriqués et ses différentes composantes :



Figure III.2 Schéma des différents outils fabriqués



Figure III.3 Photo des différents éléments de l'outil FSW

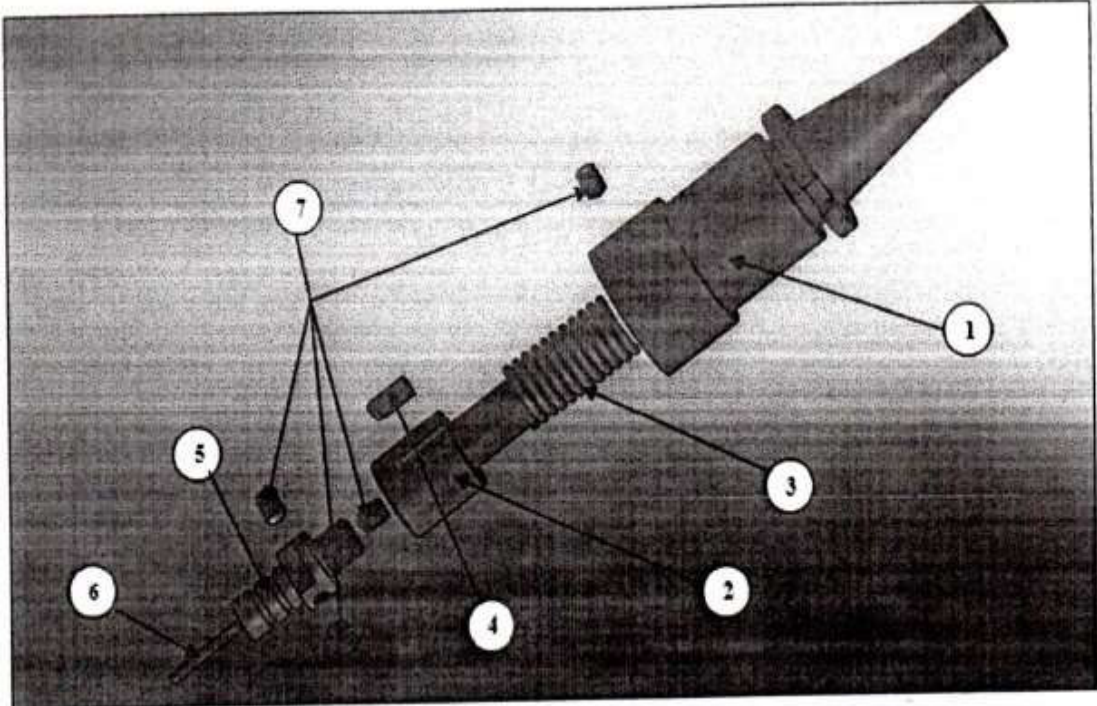


Figure III.4 Schéma des différentes composantes de l'outil FSW

La liste des éléments réalisés de l'outil FSW et leurs nomenclatures :

| Numéro des pièces | Nom des pièces | Matériau |
|-------------------|----------------|--------------------------------|
| 1 | Porte outil | E24 |
| 2 | Arbre | E24 |
| 3 | Ressort | Acier allié |
| 4 | Clavette | E24 |
| 5 | Epaulement | 42CD4 |
| 6 | Pion | Acier à outil stub (115CV3) |
| 7 | Vis sans tête | Acier sallié |

Tableau III.4 Les composantes de l'outil FSW

III-2 / Procédure expérimentale

Les soudures ont été faites au niveau de l'atelier d'usinage de notre département. Et l'atelier d'usinage d'UFI (ERMAéro).



Figure III.5 : Fraiseuses utilisées

III-2-1 Condition de l'expérience

Avant de souder, il faut :

- ◆ Placer le porte outil dans la machine de fraisage.
- ◆ Mesurer l'épaisseur des tôles à souder.
- ◆ Montage et fixation du pion dans l'épaulement. Il faut respecter la distance entre la tête du pion et celle de l'épaulement.
- ◆ Montage de l'épaulement avec le porte outil,
- ◆ Régler les paramètres de soudage :
 - Vitesse de rotation de l'outil V_r .
 - Vitesse d'avance de soudage V_a .



Figure III.6 Régler la vitesse de rotation de l'outil (V_r)



Figure III.7 Régler la vitesse d'avance de soudage (V_a) l'angle d'inclinaison α .



Figure III.8 Réglage d'angle d'inclinaison α ; a) $\alpha = 1^\circ$, b) $\alpha = 2^\circ$

- ◆ Placer un support sur la table de la machine.
- ◆ Nettoyer les tôles à souder avec de l'alcool puis les polir en surface et sur les bords par un papier abrasif fin pour limiter la présence des huiles et des oxydes.
- ◆ Vérifier la planéité des tôles.
- ◆ Positionner les deux tôles à souder sur le support sur la table de la machine telle façon que le bord à souder soit bien parallèle à l'avance du pion lors de soudage et les lignes de laminage des deux tôles doit être dans la même direction (parallèle ou perpendiculaire par rapport au sens du soudage).
- ◆ Fixer les deux tôles à souder avec le support sur la table de la machine à l'aide d'un système de bridage pour éviter tout mouvement relatif de celle-ci sous l'action des efforts générés



Figure III.9 Système de bridage pour la fixation des tôles

- ◆ Vérifier que le bord à souder est parallèle avec l'avance du pion par le centrage au début et la fin de bord à souder.



Figure III.10 : les étapes de soudage

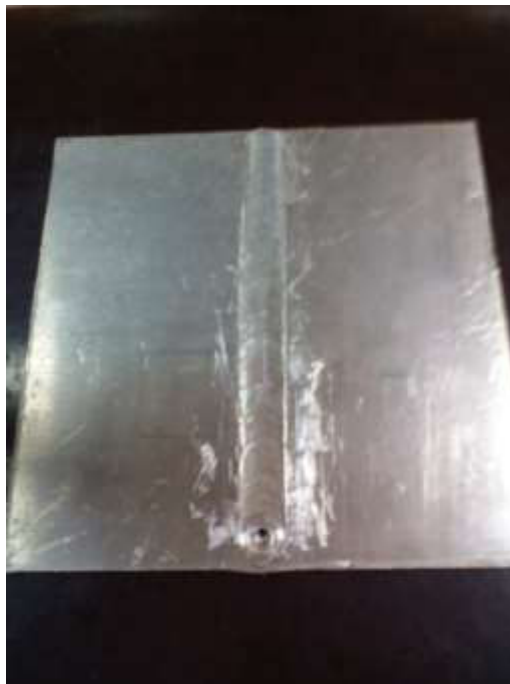


Figure III.11 : Plaque soudée

Les tôles utilisées, les paramètres de l'outil ainsi que les paramètres du soudage sont mentionnés sur le tableau ci-dessous

| Matériaux | Numéro De tôle | Épaisseur [mm] | Diamètre du pion [mm] | Diamètre de l'épaulemen t [mm] | Géométrie du pion (longueur) | Inclinaison de l'outil (α°) | N [tr/min] | Va [m m/m in] |
|----------------|----------------|----------------|-----------------------|--------------------------------|------------------------------|---|------------|---------------|
| 2024-T3 | 1 | 2 | 5 | 15 | 1.9 | 1.8 | 1125 | 60 |
| | 2 | 2 | 5 | 15 | 1.9 | 1.8 | 1125 | 60 |
| | 3 | 5 | 7 | 21 | 4.8 | 2 | 1650 | 36 |
| | 4 | 5 | 7 | 21 | 4.8 | 2 | 1650 | 36 |
| | 5 | 5 | 7 | 21 | 4.8 | 2 | 1650 | 36 |
| | 6 | 3 | 6 | 18 | 18 | 2.9 | 2 | 1500 |

Tableau III.5 Les paramètres expérimentaux

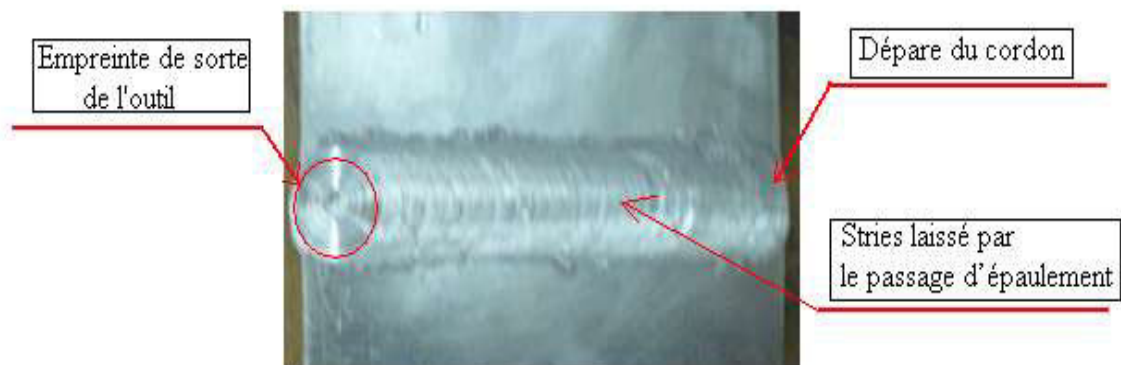


Figure III.12 : Les empreintes existantes sur FSW

Avec

V_r = vitesse de rotation.

V_a = vitesse d'avance

Il existe deux types de soudures :

- Les soudures froides dont le rapport de vitesse de rotation sur vitesse d'avance est inférieur à 1 tr/mm.
- Les soudures chaudes pour lesquelles ce rapport est supérieur à 1 tr/mm.

Dans notre cas, et vu que le rapport est très grand, on utilise les soudures chaudes.

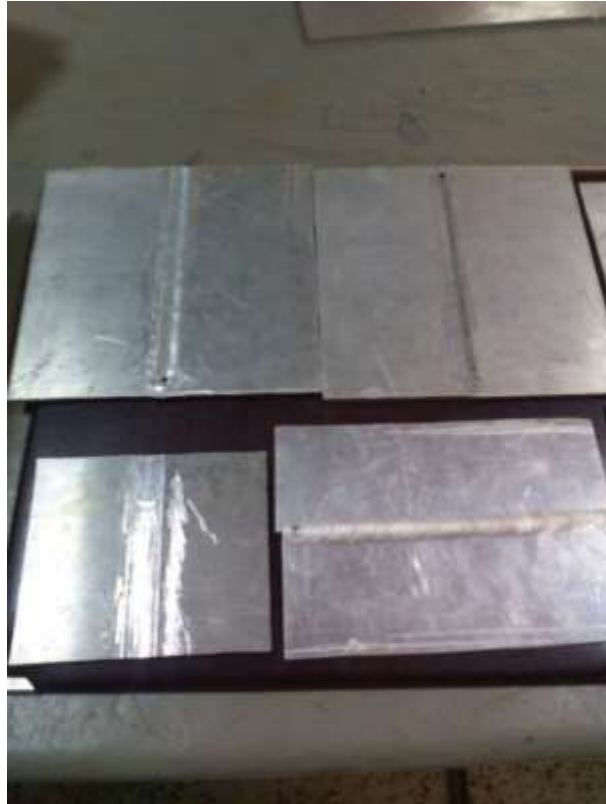


Figure III.13 : Plaques soudées

a) 2024-T3 d'épaisseur 2mm

Pion sans filetage à 2 gorges



Figure III.14 Soudage de la tôle 2024-T3 ($e = 2 \text{ mm}$), $V_r = 1125 \text{ tr/min}$, $V_a = 60 \text{ mm/min}$, $\alpha = 2^\circ$ a) face avant et b) faces arrière

a) 2024-T3 d'épaisseur 2mm



Figure III.15 Soudage de la tôle 2024-T3 ($e = 2 \text{ mm}$), $V_r = 1125 \text{ tr/min}$, $V_a = 60 \text{ mm/min}$, $\alpha = 1^\circ$ a) face avant et b) faces arrière

b) 2024-T3 d'épaisseur 3mm

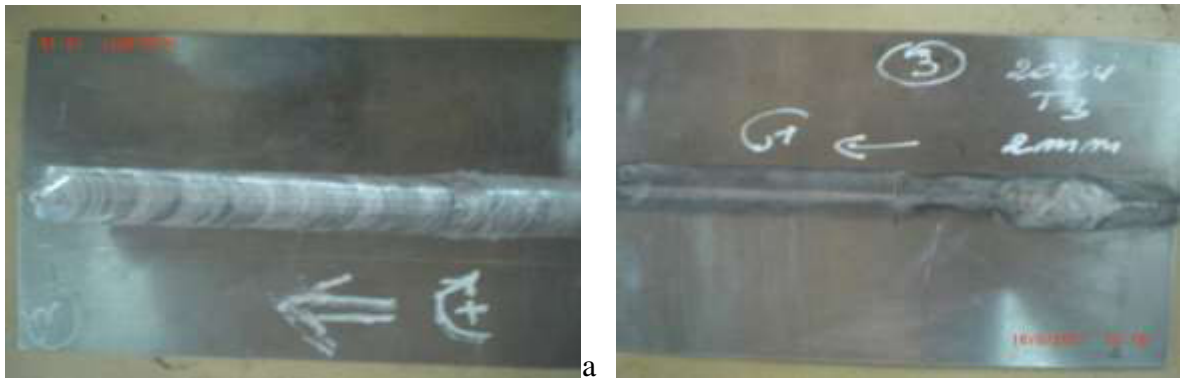


Figure III.16 Soudage de la tôle 2024-T3 ($e = 3 \text{ mm}$), $V_r = 1500 \text{ tr/min}$, $V_a = 36 \text{ mm/min}$, $\alpha = 2^\circ$ a) face avant et b) faces arrière

C) 2024-T3 d'épaisseur 5mm



Figure III.17 Soudage de la tôle 2024-T3 ($e = 5 \text{ mm}$) $V_r = 1625 \text{ tr/min}$, $V_a = 36 \text{ mm/min}$ et $\alpha = 1^\circ$

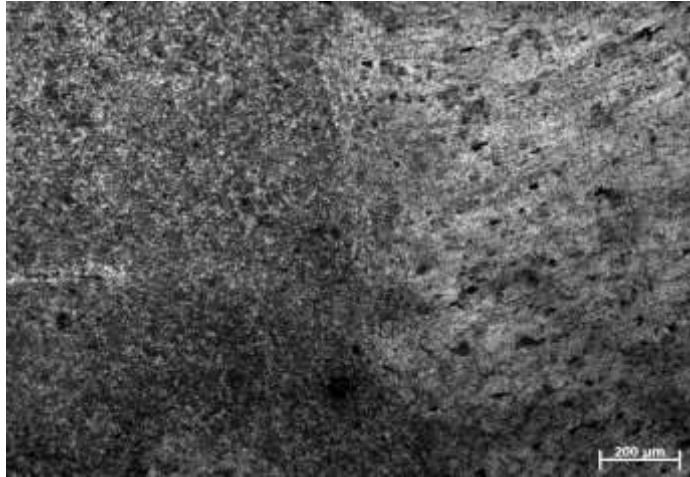


Figure III.18 Micrographie d'un échantillon soudé montrant les différentes zones de soudage

III-3LE CONTROL NON DESTRUCTIF :

- **Définition :**

Est un ensemble de méthodes qui permettent de caractériser l'état d'intégrité de structures et de vérifier l'homogénéité de matériaux ou soudure sans les dégrader, soit au cours de la production, soit en cours d'utilisation soit dans le cadre de maintenances. On parle aussi d'essais non destructifs (END) ou d'examen non destructifs.

Utilisations :

Ces méthodes sont utilisées dans l'ensemble des secteurs industriels. On peut citer notamment :

- l'industrie pétrolière (pipelines, tubes, barres, soudures, réservoirs) ,
- l'industrie navale (contrôle des coques),
- l'aéronautique (poutres, ailes d'avion, nombreuses pièces moteurs, trains d'atterrissage, etc.) l'aérospatiale et l'armée,
- l'industrie automobile (contrôle des blocs moteurs),
- Génie Civil et bâtiment.

III-3--1/contrôle par ultrasons :

Est une méthode de contrôle non destructif permettant la détection de défaut à l'intérieur. Le contrôle par ultrasons est basé sur la transmission et la réflexion d'onde de type ultrasons à l'intérieur d'un matériau. Les ondes utilisées peuvent être libres (de compression ou de Cisaillement) ou guidées (de surface ou de plaque).

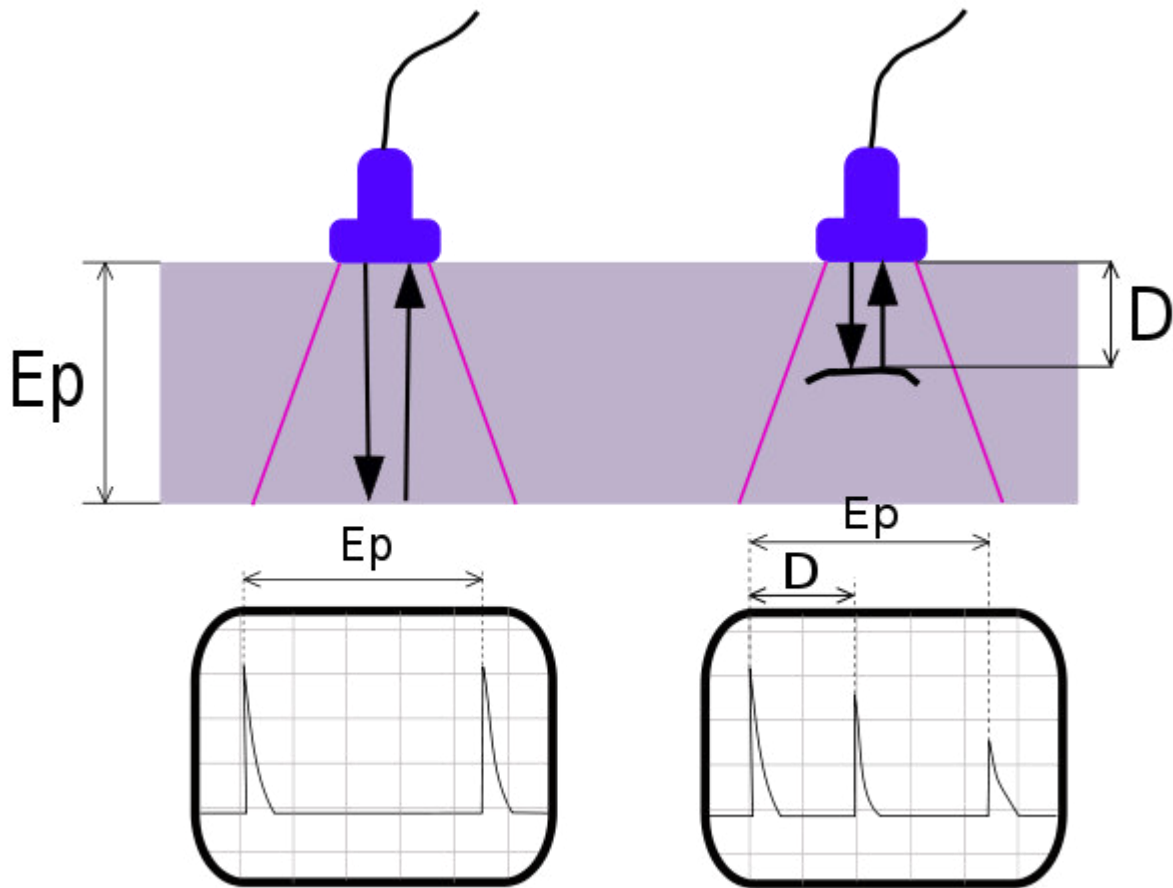
Cette méthode présente une résolution spatiale élevée et la possibilité de trouver des défauts aussi bien dans le volume de la matière qu'en surface. L'étape d'inversion est simple, du moins pour les pièces géométriquement et matériellement simples. Cette méthode nécessite d'effectuer un balayage mécanique exhaustif de la pièce. Il est d'ailleurs souvent nécessaire de contrôler plusieurs surfaces de la pièce pour pouvoir faire une représentation tridimensionnelle des défauts.



Figure III.19 Contrôle par ultrason des plaques soudées



Figure III.20 : Contrôle par ultrason des plaques soudées



Principe du contrôle par ultrasons : exemple du contrôle d'une tôle.

- L'écran de l'oscilloscope montre un pic d'entrée à gauche et un pic de sortie à droite. La distance, entre les deux pics correspond à 2 fois l'épaisseur de la tôle (aller-retour).
- Le palpeur émet au-dessus d'un défaut, il y apparition d'un pic correspondant au défaut. La position, relative du pic créé par le défaut permet de connaître sa profondeur. La distance entre le pic d'entrée et celui du défaut correspond à 2 fois la profondeur de ce dernier.



Figure III.21 principe de contrôle par ultrason des plaques soudées

Avantage :

- Aucun danger lié à l'utilisation de source radioactive et de rayonnements ionisants.
- Plus grande sensibilité de contrôle sur les pièces de forte épaisseur.
- Résultat du contrôle en temps réel.
- Contrôle plus rapide pour des épaisseurs importantes.
- Meilleure sensibilité de contrôle pour les défauts filiformes (fissures, tapures, criques) d'orientation aléatoire.

Inconvénients :

- Certains matériaux métalliques sont difficilement contrôlables (matériaux à gros grains).
- Contrôle plus lent pour les faibles épaisseurs.

III-3-2 /Radiographie :

Méthode pour la recherche des défauts internes, excelle pour la détection des défauts

Volumétriques, moyen peu efficace pour la recherche des fissures de fatigue. Nécessite

Beaucoup d'équipement onéreux, cette méthode est soumise à une réglementation très stricte

À cause de ses effets sur l'humain.

Formation de l'image radiographique :

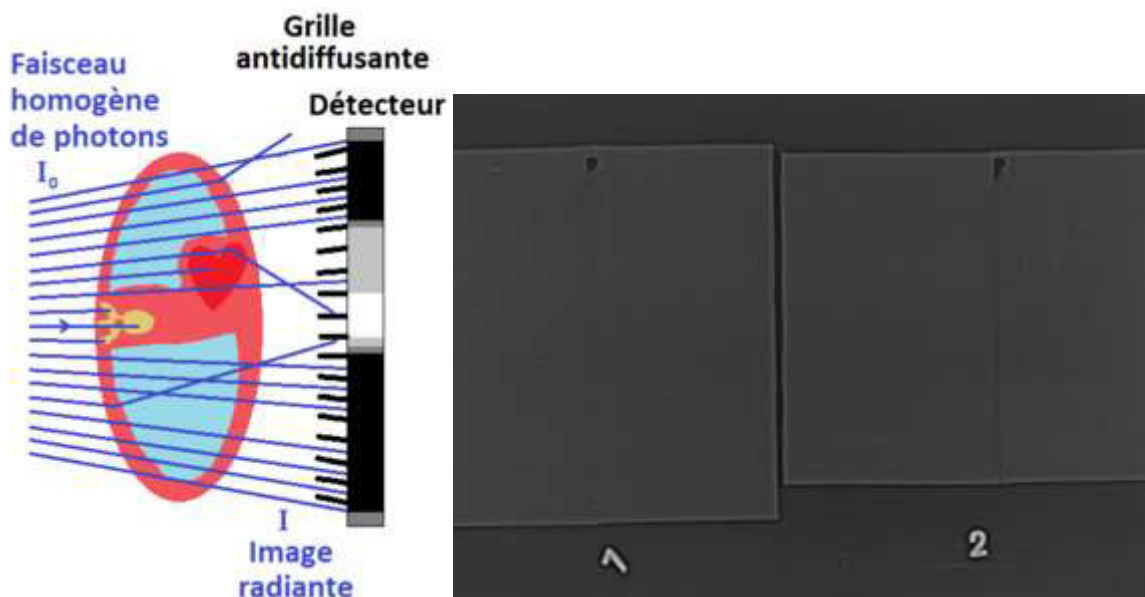


Figure III.22 clichés obtenus de l'image après la radiographie

L'atténuation des photons lors d'une radiographie dépend des structures traversées. Les photons diffusés sont atténués par la grille anti diffusante avant d'atteindre le détecteur. Les informations provenant des différentes structures traversées par le faisceau de rayonnements sont projetées sur un même plan pour former l'image. Par conséquent, il est souvent nécessaire de réaliser deux projections, à différentes incidences, pour pouvoir localiser une structure dans les trois dimensions de l'espace. La loi d'atténuation des photons explique l'atténuation différentielle du faisceau à travers différentes structures, ce qui est à l'origine du contraste radiographique.

III.4 Traitements thermique de l'état T3 :

Le traitement thermique de l'état T3, est un traitement de durcissement structural comporte trois grands stades :

***Mis en solution**: Il est fait dans des fours de recuit disponibles au niveau de laboratoire de notre département et laboratoire d'UFI (unité de fabrication industriel) à ERMAéro. On chauffe les éprouvettes à une température de 495°C (selon l'alliage utilisé), avec un maintien pendant 20min, qui dépend l'épaisseur de l'éprouvette.

***Trempe** : Après sa mise en solution, on doit être trempée ou refroidie l'éprouvette dans un bain d'eau à la température ambiante ; c'est le traitement de trempe. Aussitôt après trempe, l'alliage est dit dans un état de « trempe fraîche », il présente alors une résistance mécanique relativement faible mais une bonne plasticité.

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

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

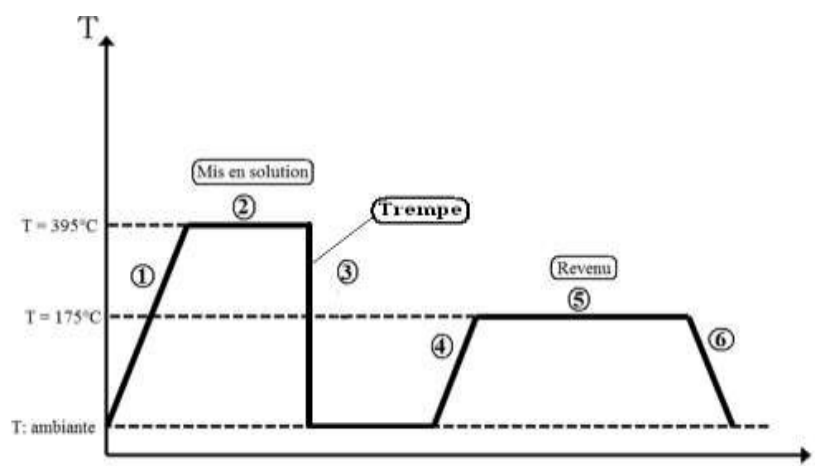


Figure III.23 : Les étapes de Traitement thermique de l'état T3

Nous avons utilisé un four à moufle de type LT5/12 et de volume 10L.

La Température maximale pouvant être atteinte est de 1100°C.

Ce four est équipé d'un système de régulation assez précis, ainsi que d'une minuterie

Permettant de réaliser des traitements thermiques en pallier.

La figure suivante représente le four utilisé lors de notre expérience :



Figure. III.24 : Four à moufle Nabertherm de type LT5/12

| |
|--|
| Mise en Solution : |
| 340 390 450 495°C |
| Temps de maintien pour chaque mise en solution : |
| 10 20 min |
| Trempe à l'eau |
| Revenu : |
| 80 100 160°C |
| Temps de maintien pour chaque Température de revenu : |
| 30 min 1h 4h 6h |

Tableau.III.6: Application des traitements thermiques



Figure. III.25 : Micrographie d'un échantillon traité (mise en solution) x 100r

III.5. La microscopie optique :

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

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

- Enrobage,
- Polissage,
- Attaque chimique.

Pour cette analyse microscopique, nous avons utilisé un microscope optique de type Carl Zeiss ayant un agrandissement variant de 50 à 1000. Il est équipé d'une caméra reliée à l'écran d'un ordinateur pour permettre la capture de photos de la structure observée et désirée.

La figure suivante représente le microscope utilisé au niveau du laboratoire de Recherche du département de mécanique.



Figure III.26 :Microscope optique de type Carl Zeiss

***Enrobage :**

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

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



Figure III.27 : Résine utilisée

***. Polissage :**

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

L'opération consiste à polir mécaniquement les échantillons à l'aide de papiers abrasifs en carbure de silicium. Ces papiers sont classés par grosseur de grains : 240, 280, 400, 600, 800, 1000 et 1200. Ces nombres correspondent au nombre de grains utilisé par unité de surface (grains/cm²). Le polissage est accompagné d'une lubrification à l'eau constante de l'échantillon afin d'éviter tout risque de surchauffe de ce dernier. Une opération de finition est exigée en utilisant un tapis de velours et une patte d'alumine. Cette ultime étape nous permet d'obtenir une surface avec un effet miroir où l'état de la surface doit être le plus lisse possible et ne possédant aucune rayure.

L'expérience s'est déroulée au niveau de centre de recherche et développement URD et au niveau de notre laboratoire SDM. La polisseuse utilisée est représentée dans la figure suivante.



Figure III.28:Polisseuse utilisée

* Attaque chimique :

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

- 2 ml d'acide fluorhydrique (HF),
- 5 ml d'acide nitrique (HNO_3),
- 3 ml d'acide chlorhydrique (HCl),
- 190 ml d'eau distillée (H_2O).

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

L'opération s'est déroulée au niveau du laboratoire des recherches scientifiques de l'ERM'Aéo.



Figure III.29:composantes chimiques de la solution Keller

PRELEVEMENT DES ECHANTILLONS :

Après les opérations de soudage des plaques d'aluminium, on prélève des échantillons pour contrôler la qualité du cordon par les méthodes de CND : Radiographie, Ultrason et appliqué des essais mécaniques (essai de dureté, essai traction).

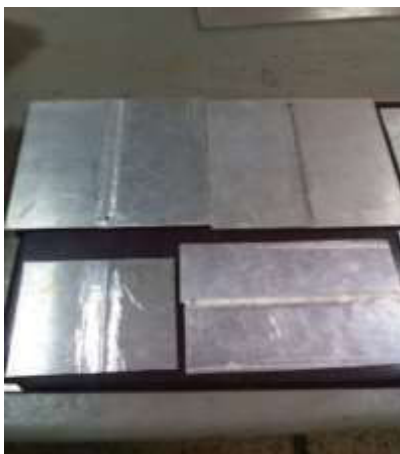


Figure III.30 : Les cordons du contrôle qualité.

III.6/ METHODES D'ESSAIS MECANIKES :

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

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.

III.6.1 Essai de traction :

Parmi tous les essais mécaniques, l'essai de traction est certainement l'essai le plus fondamental. Il sert à déterminer les principales caractéristiques mécaniques telles que 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 la déformer progressivement puis la rompre. Son exécution est facile et les résultats obtenus servent à dimensionner toutes sortes des pièces allant d'un pignon microscopique jusqu'à la structure métallique d'une grande pièce.

Cet essai a comme objectif :

- de faire connaître le fonctionnement d'une machine de traction et des capteurs qui y sont appliqués,
- de mesurer des courbes de traction sur des matériaux comme les alliages d'aluminium,
- d'interpréter les résultats obtenus: déterminer la limite élastique, l'allongement à rupture, etc...,
- d'estimer la précision de mesure.

Il est exécuté soit sur des barres de section constante, soit sur des éprouvettes cylindriques ou prismatiques prolongées de part et d'autre par des têtes d'attache de forme appropriée pour la fixation.

L'expérience s'est déroulée au niveau du laboratoire de Recherche Scientifique et Technique de L'ERMAéro (établissement de rénovation des matériels aéronautiques). On a utilisé une machine hydraulique de type Instron à commande électrique. Le pilotage et l'acquisition des données sont effectués à l'aide de la console de la machine, l'ensemble est piloté par un logiciel Merlin. La cellule d'effort a une capacité de ± 600 KN.



Figure III.31 : Machine de traction.

Les éprouvettes de traction ont été réalisées dans l'atelier de (UFI).

La figure suivante représente cette éprouvette :

Le type d'éprouvette utilisée est le suivant :

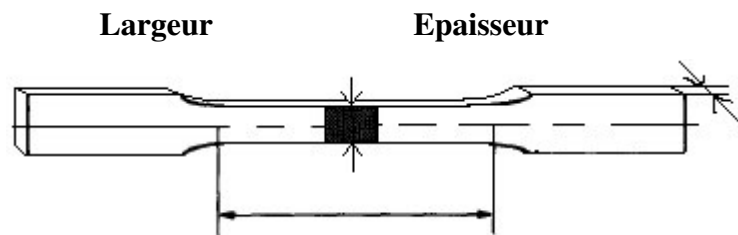


Figure III.32 : Eprouvette de l'essai de traction normalisée.

Les différentes étapes de l'essai de traction sont représentées ci-dessous :

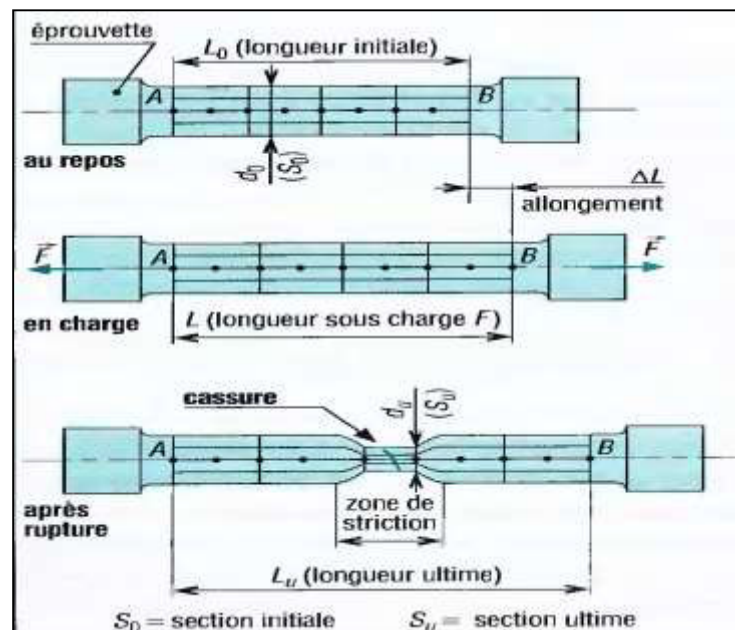


Figure III.33 : Les différentes étapes de l'essai de traction.

De l'essai de traction, on obtient les caractéristiques mécaniques suivantes :

- Le module d'élasticité,
- La limite élastique,
- La résistance à la traction, et l'allongement à la rupture.



Figure III.34 Eprouvettes de traction après l'essai mécanique.

III.6.2 Essai de dureté :

Le profil de dureté à travers la soudure change de forme selon l'alliage et l'état initial, notamment entre les alliages d'aluminium à durcissement par écrouissage (série 5000), et ceux à durcissement structural (série 2000, 6000 et 7000).

Pour les alliages d'aluminium de la série (7000 et 2000) à durcissement structural, la dureté est minimale dans la zone soudée. Elle chute de façon significative dans le noyau comme le montre la figure suivante. Ce phénomène est dû à la structure recristallisée dans laquelle les grains possèdent des dislocations, et à la dissolution des précipités durcissant.

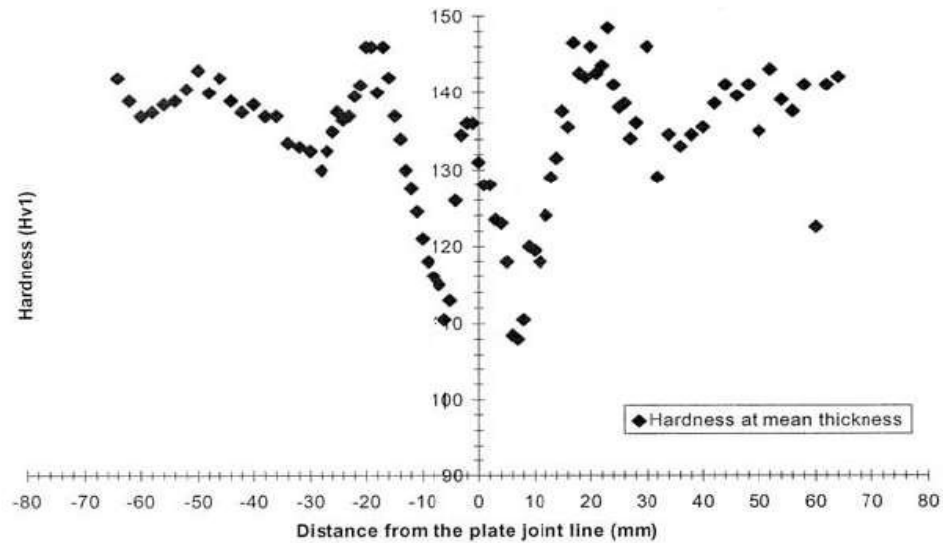


Figure III.35: Profil de dureté d'un joint d'un alliage d'aluminium [3.13]

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) :

On aurait tendance à exprimer H en méga pascals, 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, d'angle au sommet 136° , sous une charge F , et à mesurer la diagonale de l'empreinte laissée sur la surface après enlèvement de la charge.

L'essai s'est déroulé au niveau du laboratoire de Recherche Scientifique de l'ERMAéro

La figure suivante représente le duromètre utilisé.



Figure III.36:D'uroètre utilisé pour mesurer la micro dureté



Figure III.37:D'uroètre utilisé pour mesurer la dureté

CHAPITRE IV:INTERPRETATIONS ET RESULTATS

IV.1-Introduction :

Dans cette partie de notre travail, nous allons présenter, interpréter et discuter sur les résultats expérimentaux obtenus lors de nos différentes expériences.

Cette partie concernera nos éprouvettes soudées par le procédé FSW et surtout une discussion sur les différentes zones obtenues après le procédé de soudage FSW à savoir :

- *Métal de base (MB),
- *Zone affectée thermiquement(ZAT),
- *Zone affectée thermo mécaniquement(ZATM),
- *Noyau

On rappelle que le procédé de soudage FSW implique des phénomènes qui interviennent de façon couplée dans les différentes zones.

Ces phénomènes sont définis par les qualificatifs mécaniques : contraintes et déformations résiduelles induites lors de soudage

Conformément aux notre chapitres précédents, les expériences ont été réalisées au niveau de l'atelier d'usinage de notre département et l'atelier de fabrication de UFI (ERMAéro).

Les résultats et interprétations de notre travail seront détaillés dans ce chapitre.

Nous rappelons que notre travail s'est déroulé de la manière suivante :

- Aspect métallurgique de FSW
- Procédé de soudage,
- CND,
- Dureté et micro dureté,
- Traction.

IV.2. Aspects métallurgiques du procédé de soudage à friction malaxage FSW :

Etudié dans le chapitre II, le procédé de soudage consiste à assembler deux éléments métalliques, par fusion et re-solidification. Ce procédé implique des phénomènes qui interviennent de façon couplée dans le cordon de soudure.

Ces phénomènes sont définis par les qualificatifs :

- thermique : apport de chaleur (conduction et convection),
- métallurgique : évolutions microstructurales,
- mécanique : contraintes et déformations résiduelles induites lors du soudage.

Les interactions entre ces phénomènes sont représentées par la figure 4.1 :

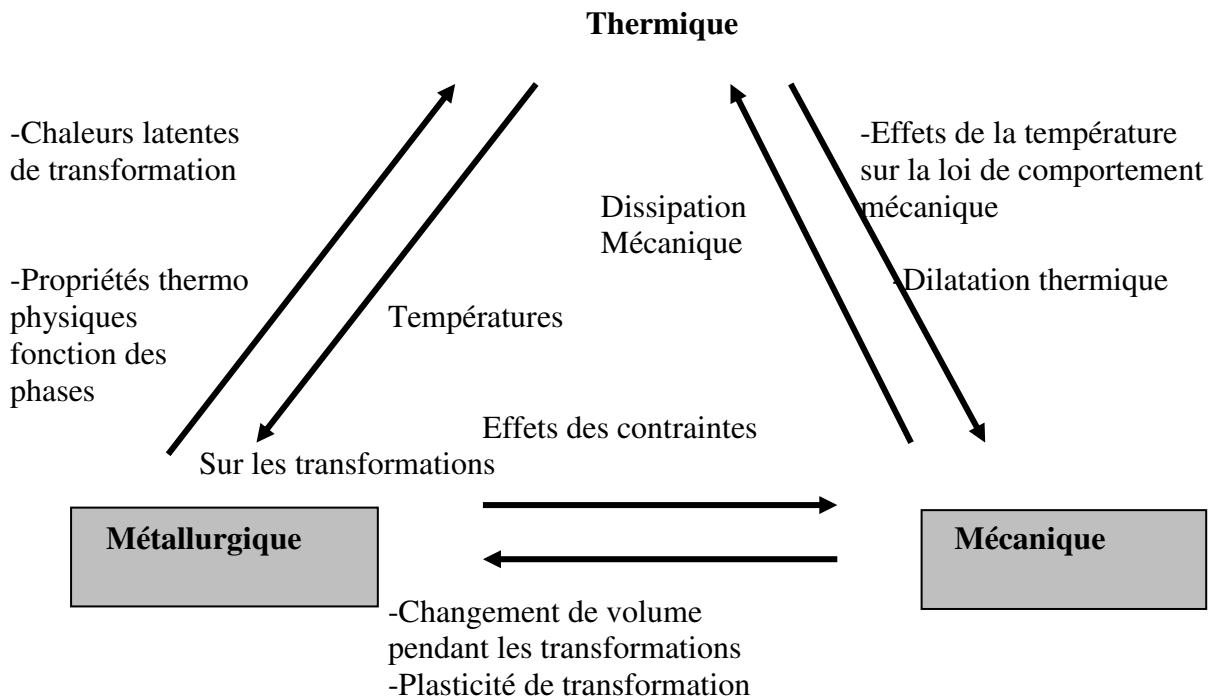


Figure 4.1 : Phénomènes physiques impliqués et leurs couplages lors du procédé de soudage [4.1]

IV.2.1. Etat brut :

IV.2.1.1. Analyse micrographique :

Avant de procéder à notre étude, nous avons choisi cette analyse micrographique pour déterminer les microstructures pour les échantillons non soudés et non traités.

Les figures suivantes représentent ces microstructures pour le cas des 2 épaisseurs :

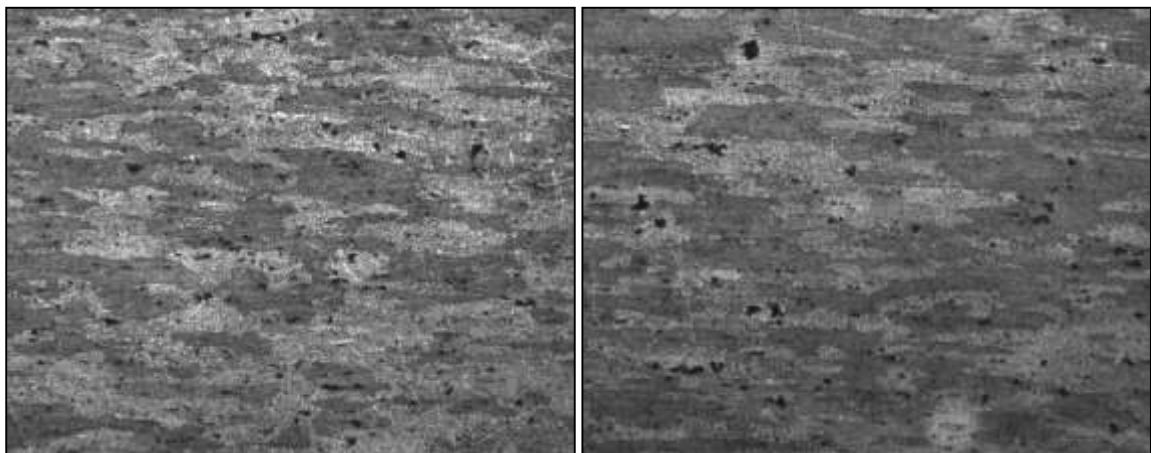


Figure 4.2 : Microstructure à l'état brut pour des épaisseurs respectives de 3 et 5 mm

X-100.

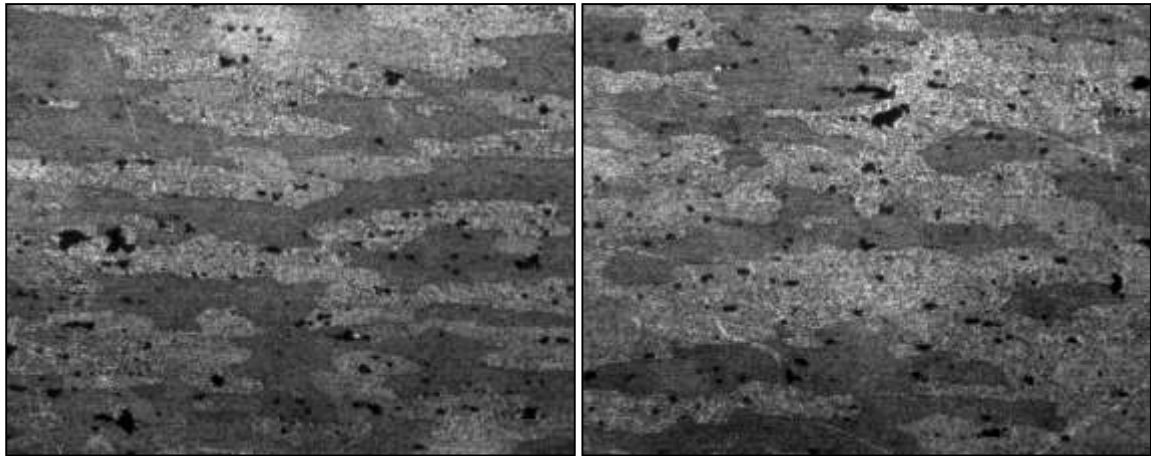


Figure 4.3 : Microstructure à l'état brut pour des épaisseurs respectives de 3 et 5mm X-200.

IV.2.1.2. Essai de dureté :

Les résultats de l'essai de dureté Vickers sont représentés dans le tableau 4.1

| Alliage | Valeur 1 | Valeur 2 | Valeur 3 | Moyenne |
|---------|----------|----------|----------|---------|
| 2024 T3 | 170 | 175 | 171 | 172 |

Tableau 4.1 : Résultats de la dureté Vickers du matériau à l'état brut

IV.2.1.3. Essai de microdureté :

De la même manière, les résultats de l'essai de la microdureté sont représentés dans le tableau 4.2.

| Alliage | Valeur 1 | Valeur 2 | Valeur 3 | Moyenne |
|---------|----------|----------|----------|---------|
| 2024 T3 | 130 | 127 | 129 | 128 ,66 |

Tableau 4.2 : Résultats de la microdureté du matériau à l'état brut

IV.2.2. Etat mise en solution :

IV.2.2.1. Essai de dureté :

Concernant la partie ou nos échantillons ont été traités (mise en solution), les résultats de la dureté Vickers sont représentés dans la figure 4.6 suivante :

| Alliage | Valeur1 | Valeur 2 | Valeur 3 | Moyenne |
|---------|---------|----------|----------|---------|
| 2024 T3 | 143 | 141.70 | 146.10 | 143,6 |

Tableau 4.3 : Résultats de la dureté du matériau à l'état traité

Cette dureté obtenue après la mise en solution est inférieure comparativement à l'état T3, sachant qu'à l'état T3, notre matériau possède les meilleures caractéristiques mécaniques. Ainsi, un autre traitement ne peut que réduire ces caractéristiques du fait de l'existence d'une certaine quantité de phase η qui n'était pas dissoute lors de la mise en solution ; ce qui mène à une petite sursaturation de la phase α .

IV.2.2.2. Essai de microdureté :

Le tableau 4.3 représente les résultats de la microdureté Vickers sur notre matériau à l'état de mise en solution de 495 C°.

| Alliage | Valeur 1 | Valeur 2 | Valeur 3 | Moyenne |
|---------|----------|----------|----------|---------|
| 2024T3 | 119 | 120 | 123 | 120,66 |

Tableau 4.4 : Résultats de la microdureté Vickers à l'état de mise en solution à 495C°

IV.2.2.3. Analyse micrographique :

Les figures suivantes représentent les microstructures de notre matériau traité :

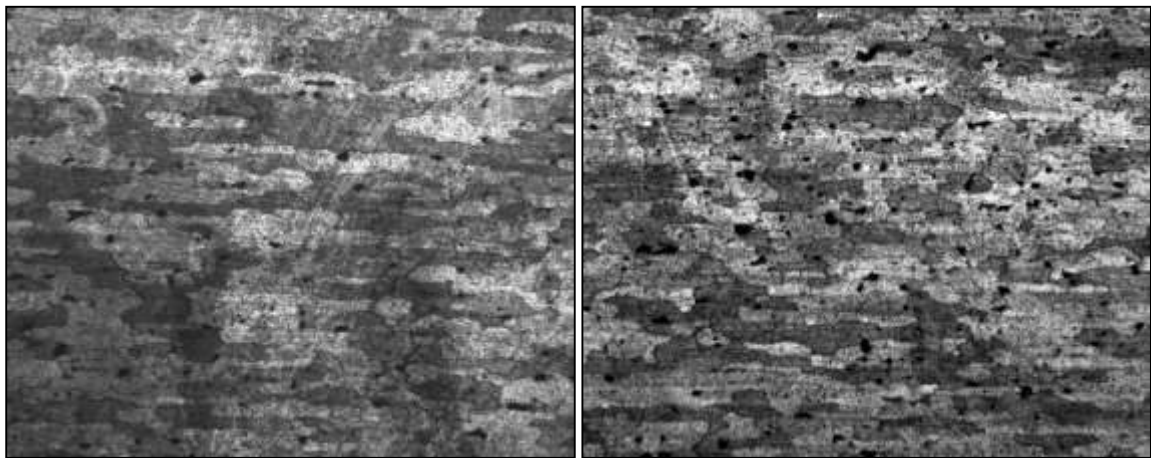


Figure 4.4 : Microstructure à l'état de mise en solution pour des épaisseurs respectives
De 3 et 5 mm X-100

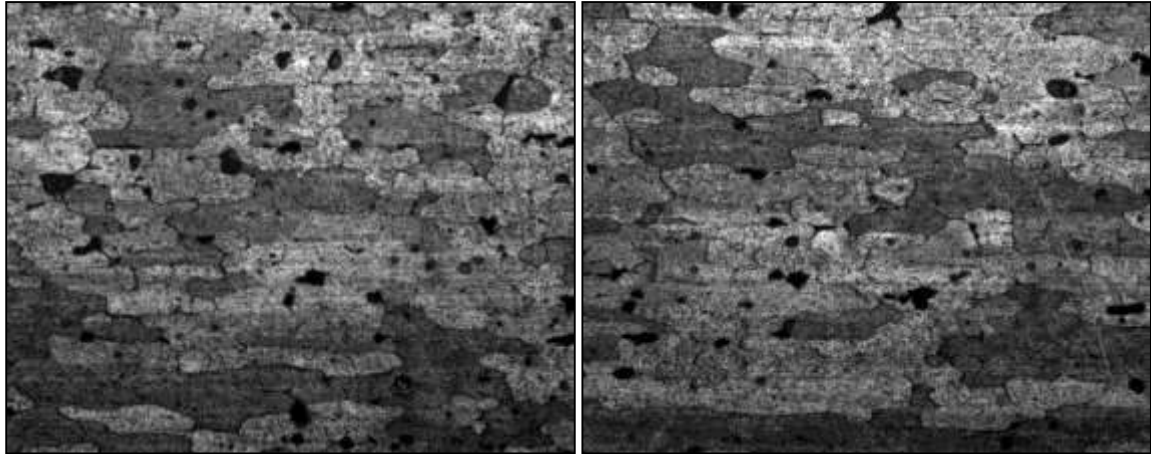


Figure 4.5 : Microstructure à l'état de mise en solution pour des épaisseurs respectives
De 3 et 5 mm X-200

IV.3. Procédé de soudage :

Dans cette partie, nous avons utilisé le procédé de soudage par friction malaxage FSW. Nous rappelons que ce procédé exige un outil spécial pour réaliser ce type d'assemblage. Ce dernier a été réalisé au niveau de notre atelier et l'atelier d'UFI. (ERM'AERO)

Lors de l'application :

- Le pion a le rôle de malaxer la matière des deux plaques à souder,
- L'épaulement a le rôle de chauffer les plaques à souder jusqu'à l'état pâteux, et de remplir le vide (trous) dégagé par le pion,
- Les paramètres de soudage utilisés sont choisis de telle manière à obtenir un bon soudage.

Pour procéder au soudage, on a :

- En plaçant l'outil, la tête de la fraiseuse a été inclinée de 2° et $1,8^\circ$
- Utilisé le système de bridage,
- Utilisé des vitesses de rotation de 1625 tr/min et 1125tr/min. La rotation de l'outil permet de chauffer la phase de contact par frottement.

Ces étapes sont illustrées dans la figure suivante :

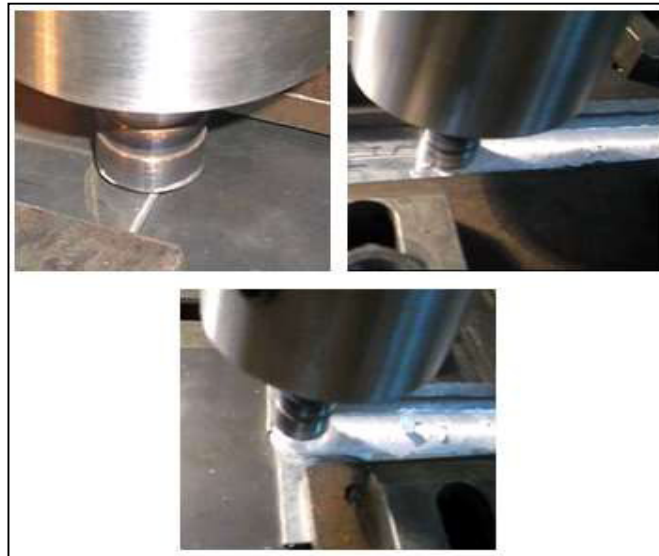


Figure 4.6 : Etapes de soudage

Les plaques soudées par FSW sont illustrées dans la figure suivante :

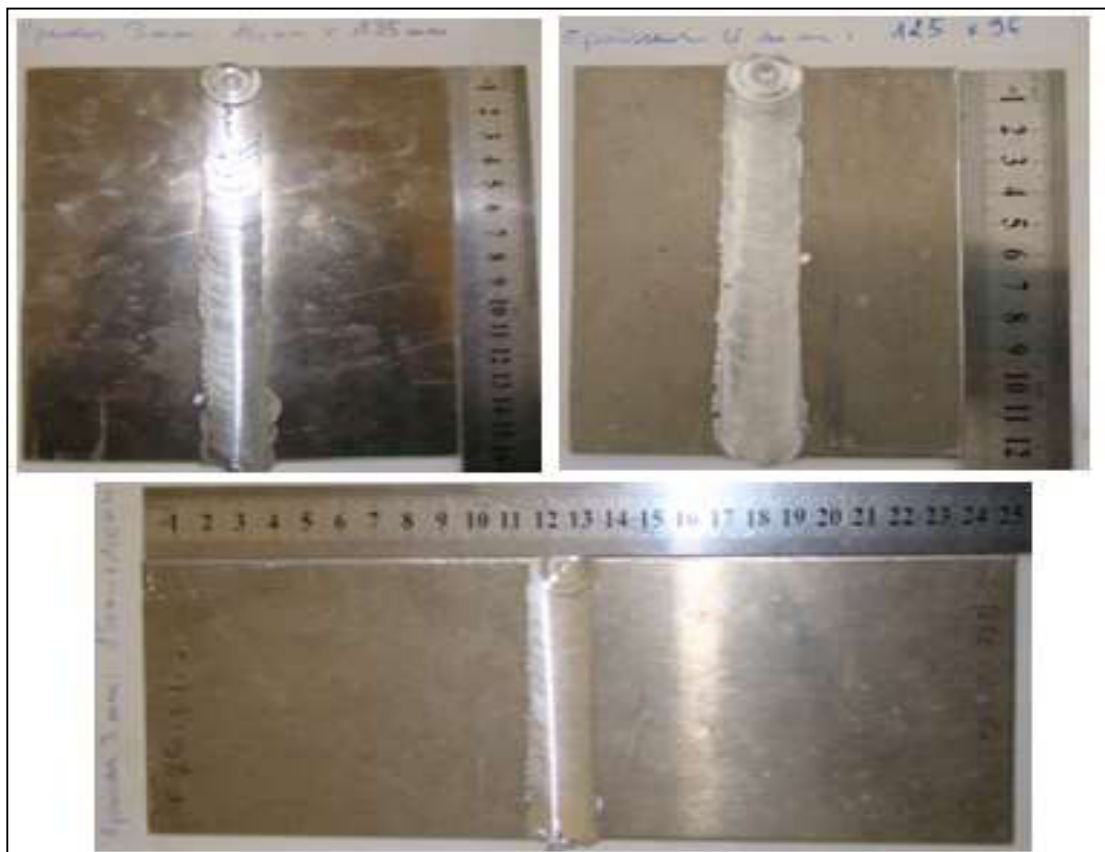


Figure 4.7 : Plaques soudées par le procédé FSW

IV.4 Résultat du contrôle non destructif des tôles soudées :

IV.4.1 Radiographie :

L'interprétation des images demande de l'expertise, et la réalisation des clichés nécessite des conditions de sécurité pour l'opérateur et l'environnement.

Dans notre travail le contrôle s'est déroulé dans un milieu fermé pour assurer la sécurité de propagation des rayons dans l'environnement.

Pour l'interprétation des clichés obtenus, on remarque qu'il y a moins des défauts pour les plaques 3 et 4 selon l'absence de vide sur le centre de cordon de soudure par contre pour les plaques 1, 2 et 5 le vide sur le cordon de soudure des trois plaques est visible donc considéré comme défaut. Les clichés des photos obtenus sont représentés dans la figure suivante :

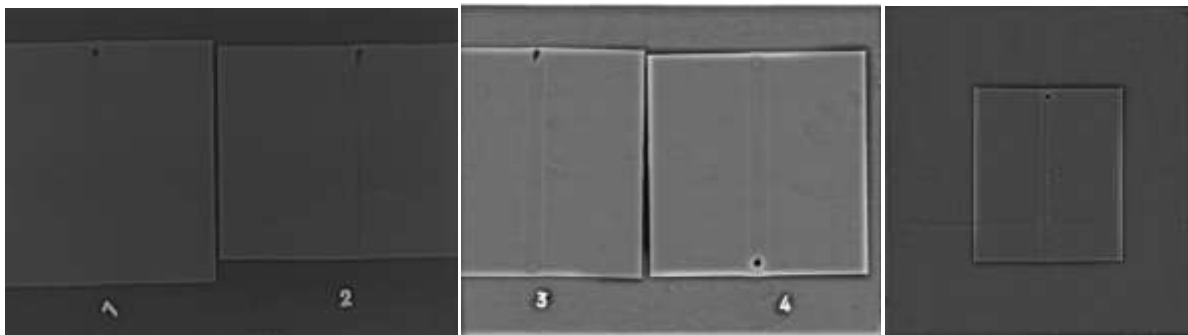


Figure 4.8 : Clichés des tôles soudées

* IV.4.2 Ultrason :

Comme on a mentionné dans le chapitre précédent, ce contrôle 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.

Le traducteur reçoit des différents signaux en même temps lors de faire glisser le palpeur le long de cordon de soudure avec un angle de 45° en suite émet d'autre signaux, qui montrent les défauts liés au cordon comme il est mentionné dans la figure suivante.



Figure 4.9 : contrôle par ultrason des plaques soudées

IV.5. Caractérisation du durcissement structural:

La micro dureté est la technique idéale pour caractériser les cinétiques de durcissement structural. Les essais ont été réalisés sur des échantillons enrobés puis polis et ou une force de 250 gr fut appliquée. Cette charge a été choisie pour obtenir un maximum de résultats précis.

Cette micro dureté a été mesurée sur de nombreux points du long des différentes zones : métal de base, zone affectée thermiquement, zone affectée thermo mécaniquement et zone fondue.

Les mesures ont été effectuées sur la section transversale de chaque échantillon.

Cet essai est illustré dans la figure suivante :

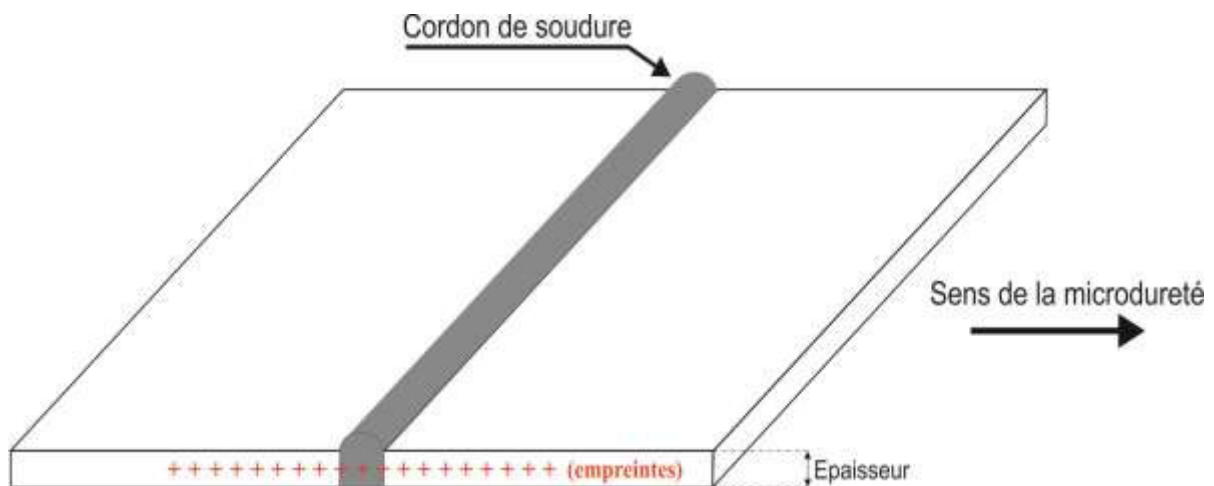


Figure 4.10:Essai de microdureté

Lors de notre expérience et lors de l'utilisation du soudage FSW, on constate que la structure de solidification en zone de fusion se produit à partir de la structure du métal des zones environnantes. Cette solidification s'établit au niveau de l'interface solide-liquide à partir des grains existants dans cette interface et qui servent de substrats à partir desquels débute et se développe la croissance. Cette dernière se développe selon la direction du gradient maximum de température. Elle forme l'avancée de la structure globale de solidification permettant la dissipation de la chaleur latente de solidification comme le montre dans la figure suivante vers le métal solide avoisinant.

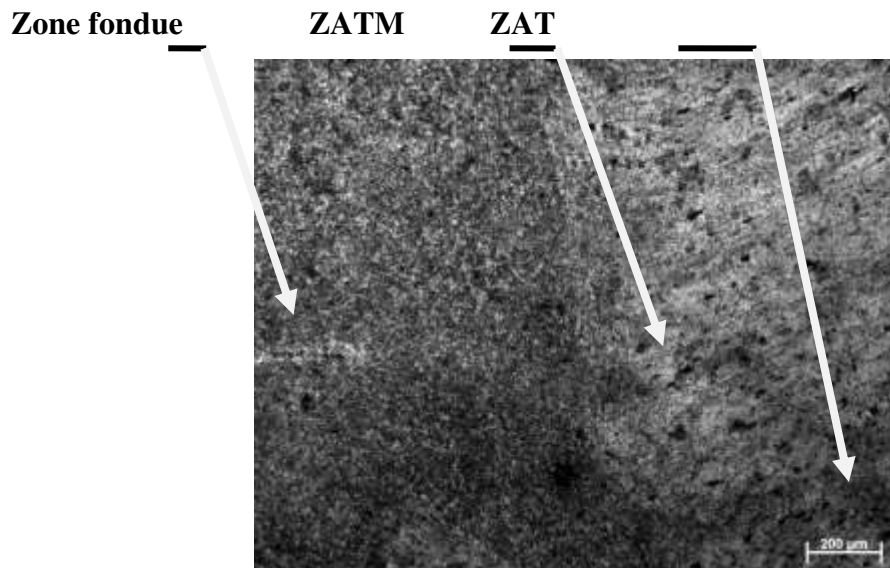


Figure 4.11: Micrographie de l'échantillon soudé

Dans cette figure, on peut distinguer les différentes zones créées après le procédé de soudage FSW :

Le métal de base, la zone affectée thermiquement, la zone affectée thermo mécaniquement et la zone fondue.

On constate que :

- La structure de la soudure est fortement influencée par des cycles thermiques du procédé de soudage FSW,
- Le procédé de soudage appliqué n'a pas engendré de défauts géométriques non-conformes,
- Le choix des vitesses de soudage n'a pas entraîné de grandes variations des dimensions des cordons de soudure, justifiant ainsi le choix des paramètres de soudure,
- Pour les trois épaisseurs utilisées, 2, 3 et 5 mm, le bain de fusion de la soudure garde un profil homogène.

IV.5.1. Analyse micrographique :

On utilise cette analyse micrographique pour déterminer les microstructures pour les échantillons : Traités et non traités.

Après une observation sur le microscope optique, on a constaté des changements dans la microstructure, causé par l'effet du soudage FSW. Ce dernier a des effets positifs et négatifs, on constate les changements dans la microstructure qui créent plusieurs zones de fragilisation dans les pièces soudées.

La zone la plus affectée est celle le noyau.

IV.5.1.1. Etat soudé et non traité :

Lors de cette étape, nous avons prélevé des échantillons de plaques soudées pour une analyse micrographique et un essai de micro dureté. Le but est de comparer les résultats obtenus avant et après les traitements appliqués.

Les figures suivantes représentent les différentes microstructures.

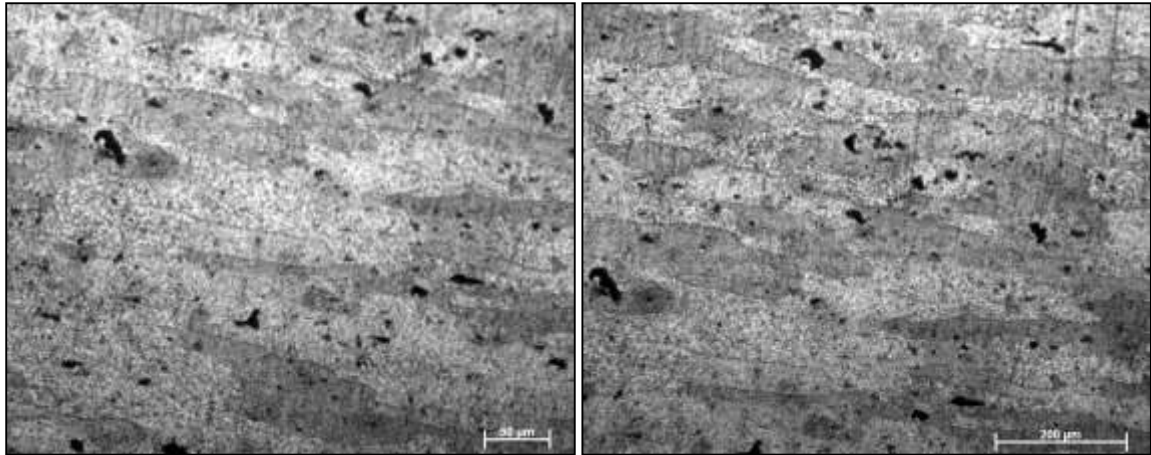


Figure 4.12 : Microstructure du MB du matériau non traité
Pour une épaisseur de 5 mm

On remarque que le métal de base ne subit aucun changement micrographique.

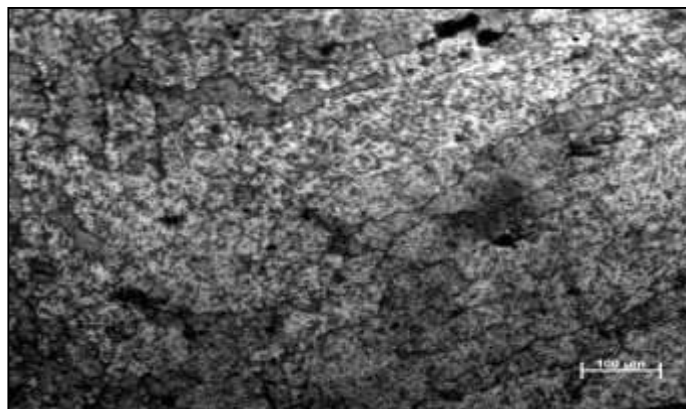


Figure 4.13: Microstructure de la ZAT du matériau non traité pour une épaisseur 5 mm

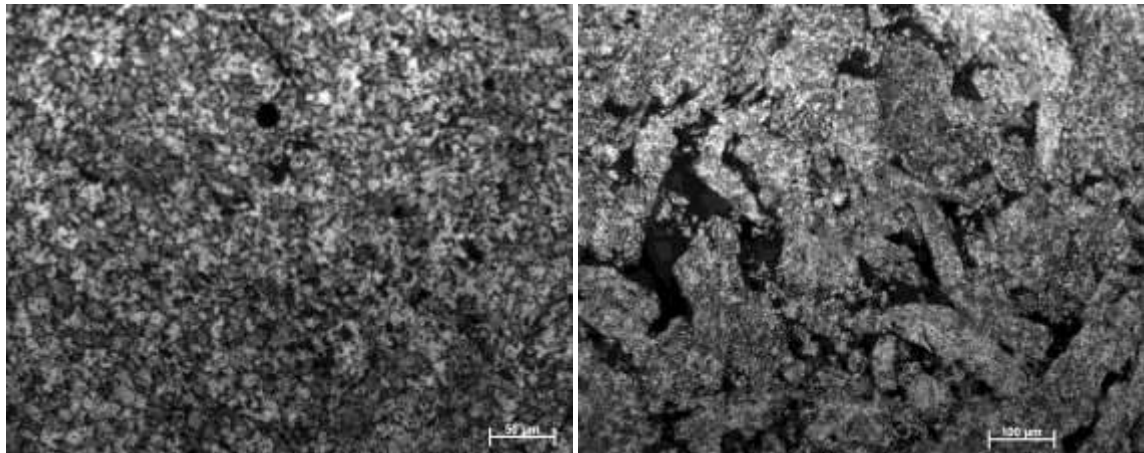


Figure 4.14 : Microstructure du noyau du matériau non traité
Pour une épaisseur de 5 mm

4.6 Résultats des essais mécaniques :

- **Essai de dureté :**

Les résultats de l'essai de dureté Vickers sont représentés dans les tableaux suivants :

| | Valeur 1 | Valeur 2 | Valeur 3 | Moyenne |
|--------|----------|----------|----------|---------|
| 2024T3 | 133 | 141 | 129 | 134,33 |

Tableau 4.5: Résultats de la dureté Vickers du matériau à l'état brut(MB)

| Alliage | Valeur 1 | Valeur 2 | Valeur 3 | Moyenne |
|---------|----------|----------|----------|---------|
| 2024T3 | 121 | 125 | 118 | 121,33 |

Tableau 4.6: Résultats de la dureté Vickers du matériau à l'état brut(ZAT)

| Alliage | Valeur 1 | Valeur 2 | Valeur 3 | Moyenne |
|---------|----------|----------|----------|---------|
| 2024T3 | 110 | 108 | 112 | 110 |

Tableau 4.7: Résultats de la dureté Vickers du matériau à l'état brut(Noyau)

Essai de microdureté :

De la même manière, les résultats de l'essai de la microdureté sont représentés dans les tableaux suivants.

| Alliage | Valeur 1 | Valeur 2 | Valeur 3 | Moyenne |
|---------|----------|----------|----------|---------|
| 2024T3 | 120 | 116 | 112 | 116 |

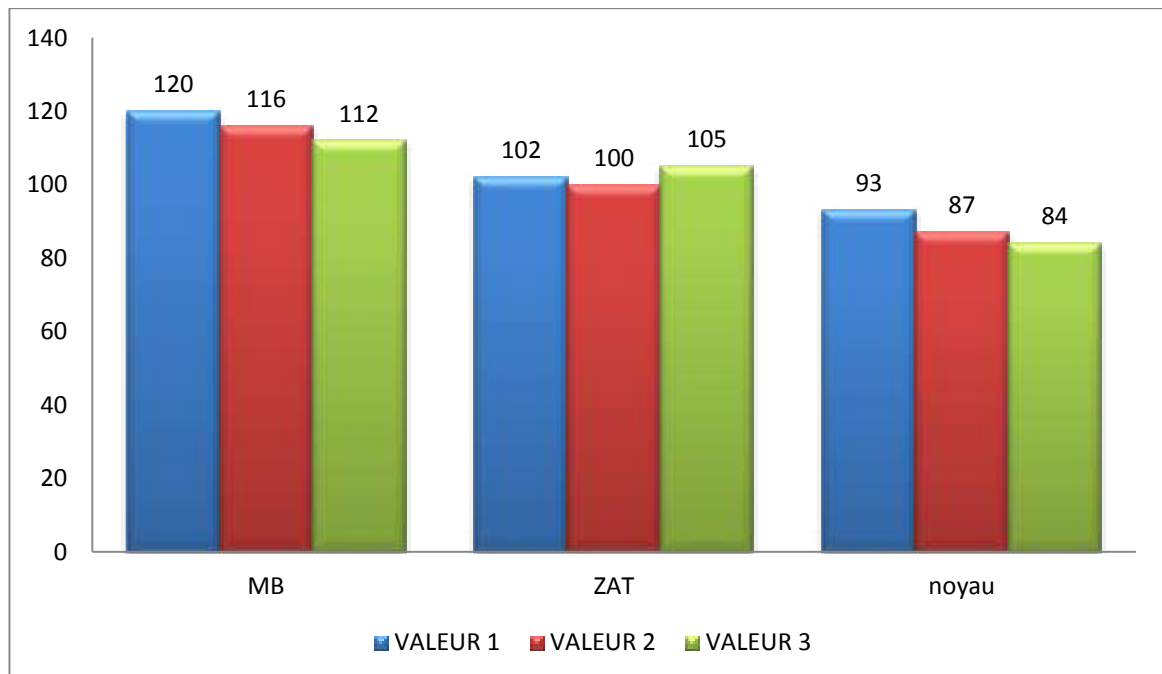
Tableau 4.8 : Résultats de la microdureté du matériau à l'état brut(MB)

| Alliage | Valeur 1 | Valeur 2 | Valeur 3 | Moyenne |
|---------|----------|----------|----------|---------|
| 2024T3 | 102 | 100 | 105 | 102,33 |

Tableau 4.9: Résultats de la microdureté du matériau à l'état brut(ZAT)

| Alliage | Valeur 1 | Valeur 2 | Valeur 3 | Moyenne |
|---------|----------|----------|----------|---------|
| 2024T3 | 93 | 87 | 84 | 88 |

Tableau 4.10 : Résultats de la microdureté du matériau à l'état brut (noyau)



Graphe N° 01 : Résultats de la microdureté du matériau à l'état brut

De la figure, on constate que la micro dureté varie d'une zone à l'autre.

A travers cette figure, les valeurs maximales se situent au niveau de MB et la ZAT.

Les valeurs les plus basses sont celles de noyau. Elles augmentent jusqu'à la ZAT puis jusqu'aux MB.

Cette interprétation peut être définie du fait que le procédé de soudage FSW fragilise le noyau.

Ce phénomène est dû à la structure recristallisée dans laquelle les grains possèdent des dislocations, et à la dissolution des précipités durcissant.

* Etat soudé et traité :

Dans cette partie, nous avons prélevé des échantillons soudés et traités.

Les figures suivantes représentent la microstructure des différentes zones obtenues de notre matériau :

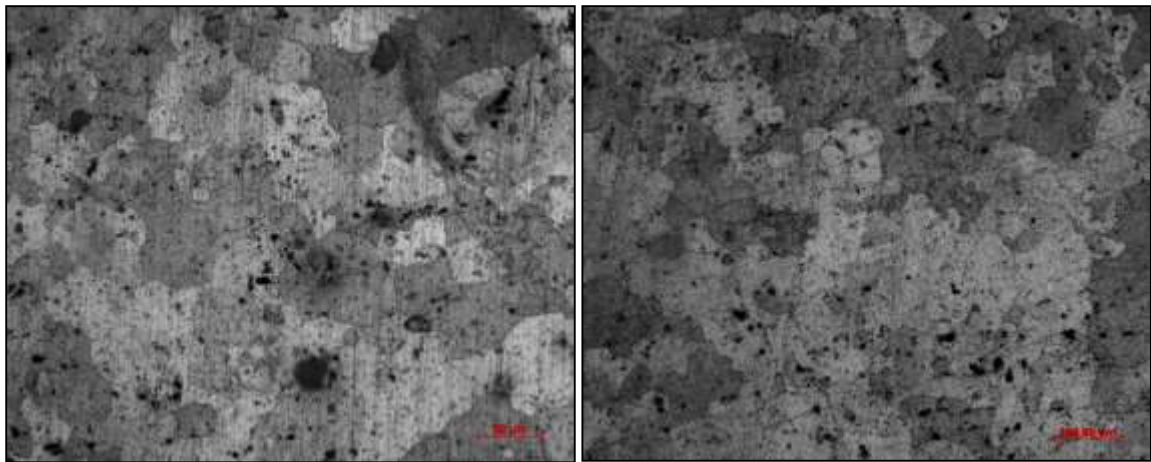


Figure 4.15 : Microstructure du MB pour une épaisseur de 3 mm

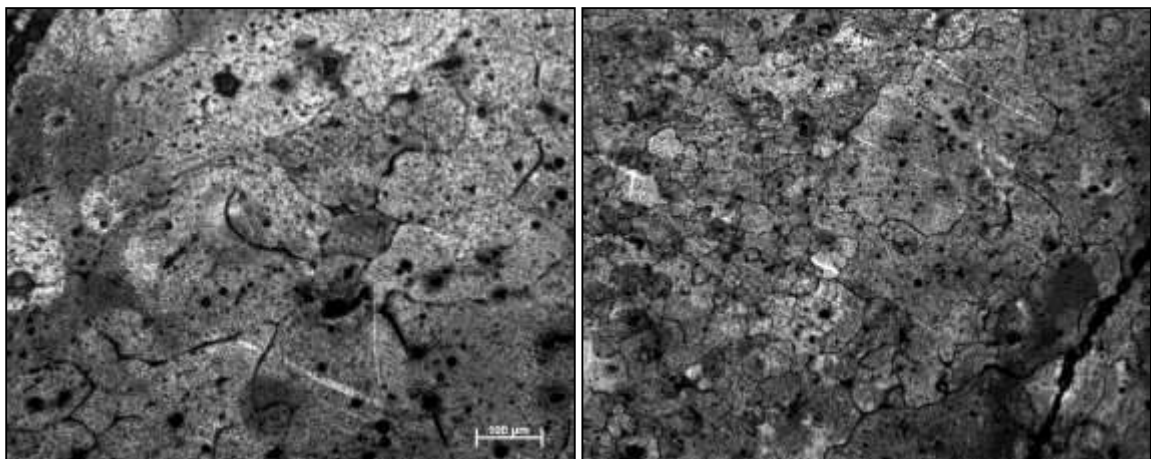


Figure 4.16 : Microstructure de la ZAT pour une épaisseur de 3 mm

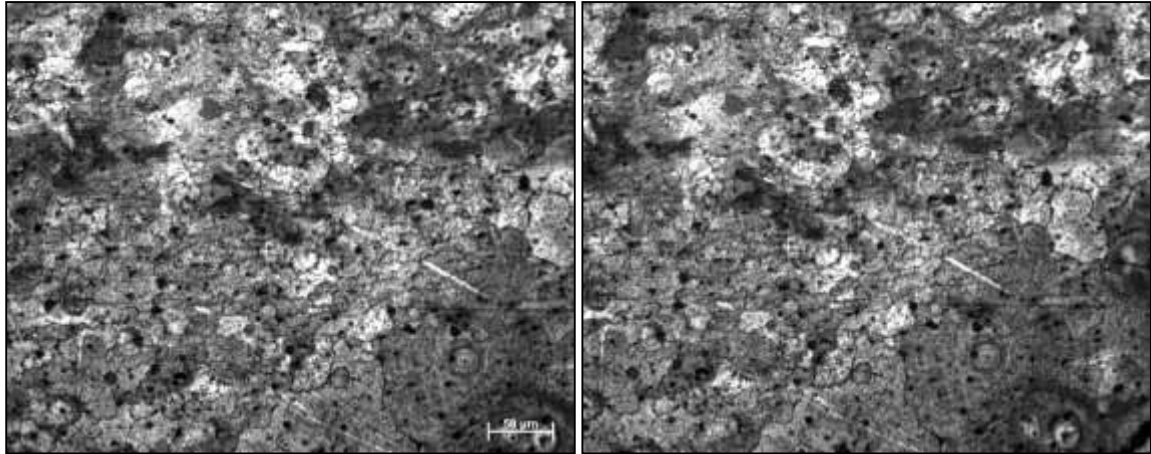


Figure 4.17 : Microstructure du noyau pour une épaisseur de 3 mm

Une comparaison entre les deux états (brut et traité), nous montre bien l'effet des traitements thermiques. Notre matériau, fragilisé lors de l'application du soudage, s'est changé de caractéristiques mécaniques en obtenant un cordon de soudure homogène à la forme initiale.

Essai de dureté :

Les résultats de l'essai de dureté Vickers sont représentés dans les tableaux suivants :

| Alliage | Valeur 1 | Valeur 2 | Valeur 3 | Moyenne |
|---------|----------|----------|----------|---------|
| 2024T3 | 162 | 165 | 172 | 166,33 |

Tableau 4.11: Résultats de la dureté Vickers du matériau à l'état Traité (MB)

| Alliage | Valeur 1 | Valeur 2 | Valeur 3 | Moyenne |
|---------|----------|----------|----------|---------|
| 2024T3 | 161 | 159 | 166 | 162 |

Tableau 4.12: Résultats de la dureté Vickers du matériau à l'état Traité (ZAT)

| Alliage | Valeur 1 | Valeur 2 | Valeur 3 | Moyenne |
|---------|----------|----------|----------|---------|
| 2024T3 | 160 | 163 | 175 | 166 |

Tableau 4.13: Résultats de la dureté Vickers du matériau à l'état Traité (Noyau)

Essai de microdureté :

De la même manière, les résultats de l'essai de la microdureté sont représentés dans les tableaux suivants :

| Alliage | Valeur 1 | Valeur 2 | Valeur 3 | Moyenne |
|---------|----------|----------|----------|---------|
| 2024 T3 | 132 | 130 | 127 | 129,66 |

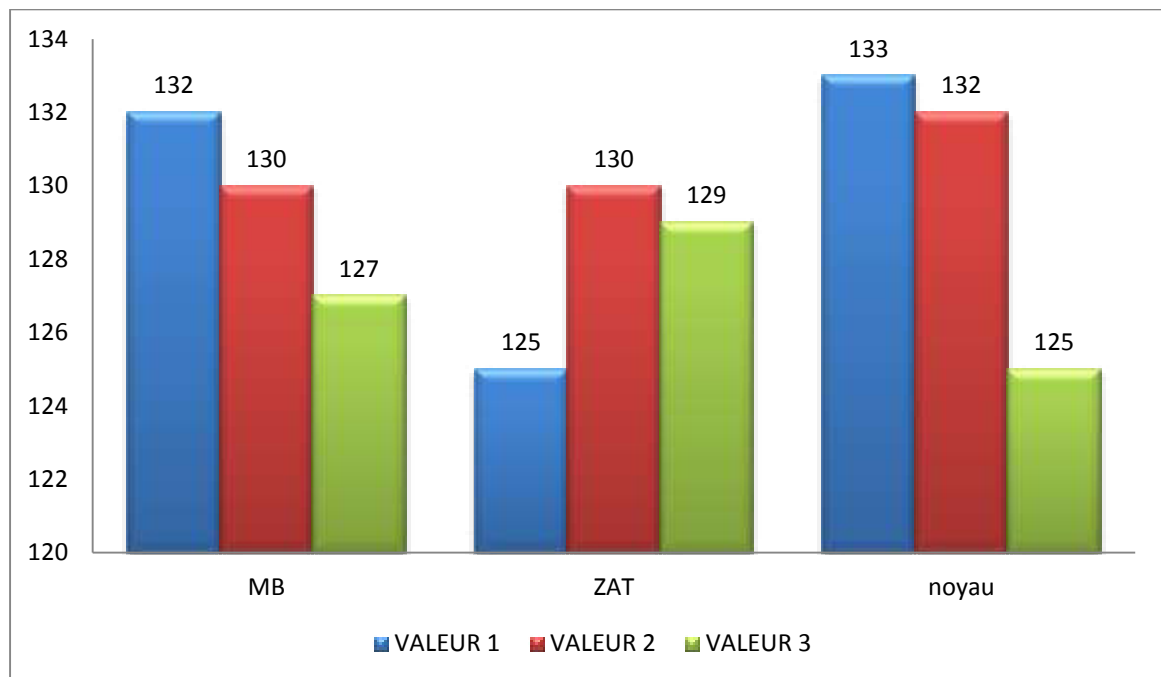
Tableau 4.14 : Résultats de la microdureté du matériau à l'état traité (MB)

| Alliage | Valeur 1 | Valeur 2 | Valeur 3 | Moyenne |
|---------|----------|----------|----------|---------|
| 2024T3 | 125 | 130 | 129 | 128 |

Tableau 4.15 : Résultats de la microdureté du matériau à l'état traité (ZAT)

| Alliage | Valeur 1 | Valeur 2 | Valeur 3 | Moyenne |
|---------|----------|----------|----------|---------|
| 2024 T3 | 133 | 132 | 125 | 130 |

Tableau 4.16: Résultats de la microdureté du matériau à l'état traité (noyau)



Graphe N° 02 : Résultats de la microdureté du matériau à l'état traité

De la même manière, on remarque que la moyenne de la micro dureté varie un peu d'une zone à l'autre, les valeurs sont supérieures par rapport aux valeurs des échantillons non traités.

Des valeurs différentes de dureté furent obtenues signifiant ainsi un changement de microstructures de notre matériau. Dans le noyau, amélioration de dureté dû à la température de traitement thermique, par la suite les moyennes de dureté dans les différentes zones sont presque identiques.

Les essais de dureté ont montré qu'un alliage mis en solution dans des conditions de Température et de temps optimales entraîne une amélioration de la dureté relativement à son état non traitée.

Lorsqu'on fait une comparaison entre les deux états :

*A l'état non traitée : la dureté de métal de base HV=134,33 et au centre (noyau) HV=110

Donc une chute de propriétés au niveau de joint soudé.

* A l'état traité : la dureté de métal de base HV=166,33 et au centre (noyau) HV=166

Donc nous avons obtenu une amélioration au niveau de cordon de soudure.

Essais de traction des échantillons :

Comme il a été mentionné dans le chapitre précédent, 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. . Ces éprouvettes sont découpées par une machine de fraisage (au niveau de l'atelier d'UFI).

La figure suivante représente les éprouvettes normalisées ayant subies l'essai de traction.



Figure 4.18: Epreuves normalisées ayant subies l'essai de traction

a) Pour l'échantillon non traité d'épaisseur = 3 mm, on obtient :

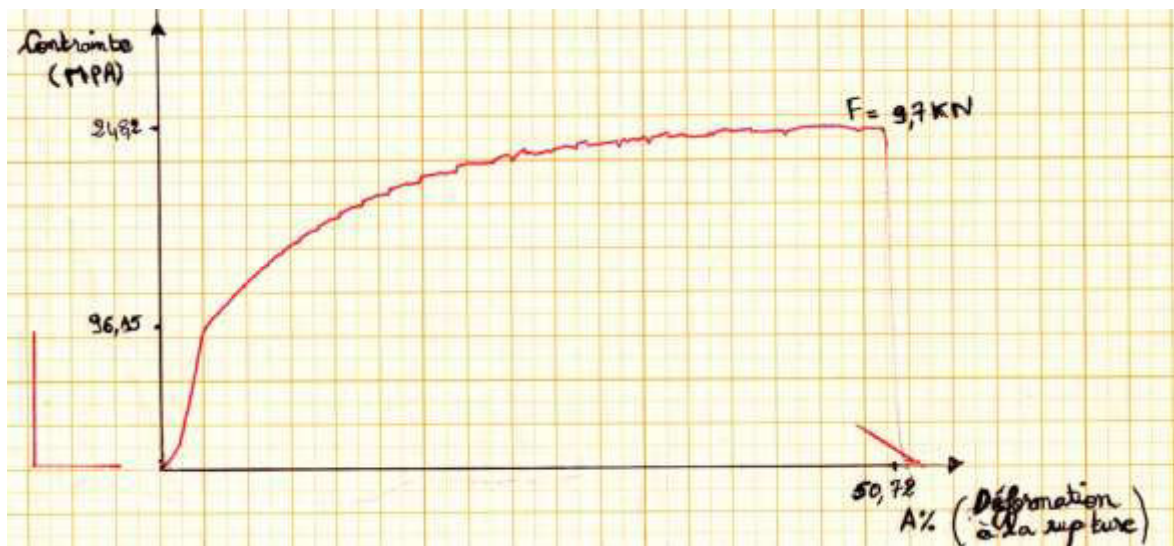


Figure 4.19 : Essai de traction sur une éprouvette de 3 mm (non traité)

| Charge maximale KN | Contrainte maximale MPa | Module de Young Mpa | Limite d'élasticité Mpa | Déformation à la rupture A% |
|-----------------------|-------------------------------|---------------------------|-------------------------------|-----------------------------------|
| 9,7 | 248,7 | 984,72 | 96,15 | 37,72 |

Tableau 4.17: Essai de traction pour une éprouvette soudée (épaisseur de 3 mm à l'état brute)

Pour ce cas, la déchirure s'est produite entre la ZAT et le MB.

A travers les résultats, on remarque que la limite d'élasticité et le A% ont des bonnes valeurs.

Cela est peut être due aux paramètres suivants :

- Le procédé de soudage s'est bien déroulé (bonne pénétration)
- Une bonne préparation (l'absence de jeu entre les deux tôles)
- La ductilité de métal (l'utilisation sans traitement thermique)



Figure 4.20 : Eprouvettes non traitée ayant subies l'essai de traction pour un épaisseur de 3 mm

b) Pour l'échantillon traité d'épaisseur = 3 mm, son obtient : *****

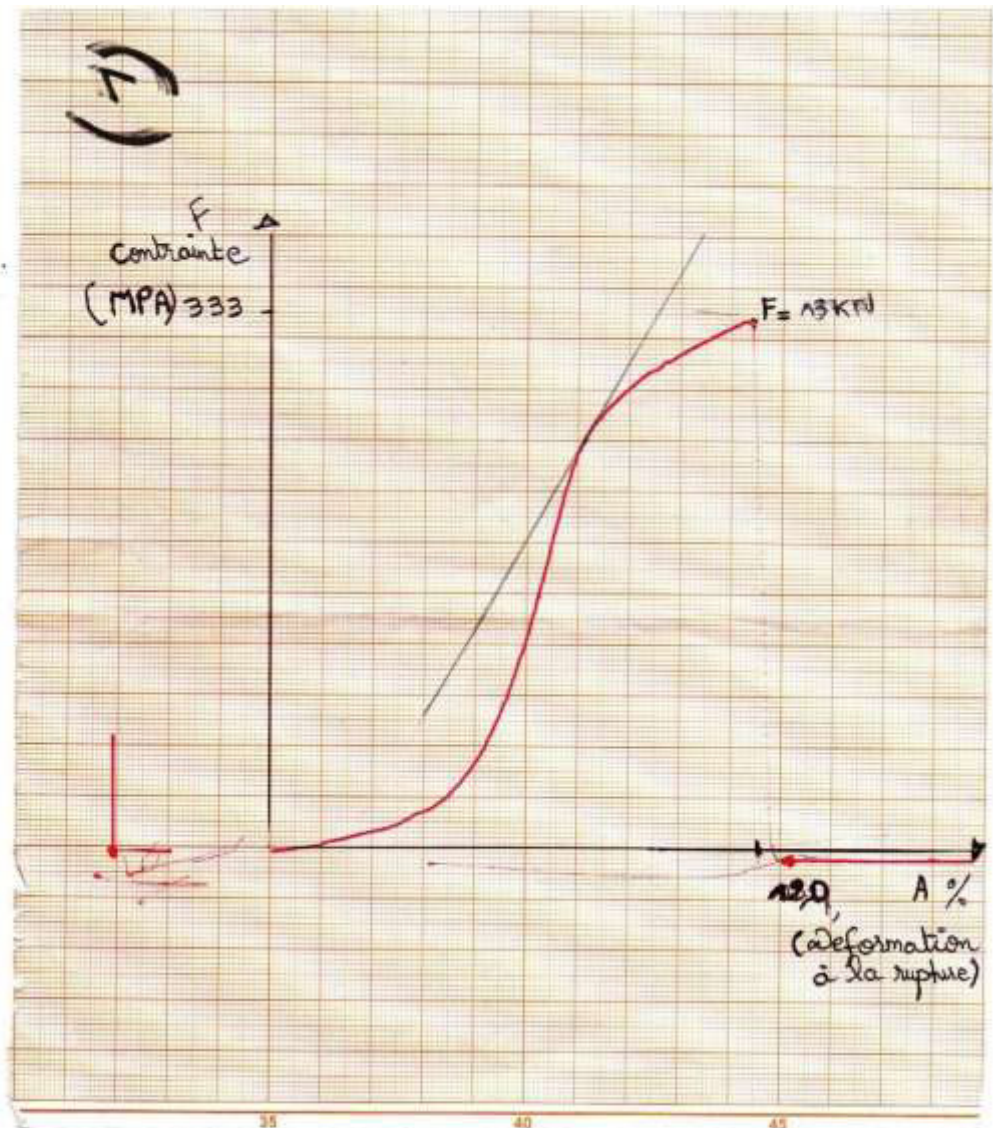


Figure 4.21 : Essai de traction sur une éprouvette de 3mm

| Charge maximale KN | Contrainte maximale MPa | Module de Young MPa | Limite d'élasticité MPa | Déformation à la rupture % |
|-----------------------|-------------------------------|---------------------------|-------------------------------|----------------------------------|
| 13 | 333 | 543.29 | 82.015 | 12 |

Tableau 4.18 : Essai de traction pour une épaisseur de 3 mm

Pour ce cas, la déchirure s'est produite dans le noyau.

A travers les résultats, on remarque que la limite d'élasticité et le A% ont des faibles valeurs.

Cela est peut être due aux paramètres suivants :

- La présence d'un défaut d'étanchéité lors du procédé,
- Un temps de soudage trop long.
- Peut- être l'influence de traitement thermique (manque de ductilité)



Figure 4.22 : Eprouvettes traitées ayant subies l'essai de traction pour un épaisseur de 3 mm

CONCLUSION GENERALE

Notre travail s'est concentré essentiellement à une nouvelle technologie de soudage : le soudage par friction malaxage symbolisé par FSW (Friction Stir Welding).

Ayant obtenu notre matériau par le service de maintenance d'Air Algérie et L'ERMAéro, nous avons commencé la fabrication des différents outils a des différentes formes des pions (avec filetage et sans filetage). La suite, fut la soudure des tôles d'alliage d'aluminium 2024 T3 avec deux épaisseurs différentes : 2 mm, 3 mm et 5mm.

Dans l'ensemble, le procédé de soudage s'est bien déroulé malgré que notre matériau est difficilement soudable. . Les résultats obtenus sont tout à fait encourageant dans certains cas; bonne qualité de la soudure (cordon homogène). Ces derniers ont été confirmés par les essais de traction.

On a constaté qu'après les essais de soudage F.S.W sur des tôles d'aluminium de série 2024 T3 ayant des épaisseurs différentes qu'il existe beaucoup de paramètres pouvant influencer ce procédé comme les vitesses (d'avancement, de rotation), la pression appliquée, le support des tôles à souder et le système de bridage.

Aussi, on peut conclure que :

- Une déformation au niveau des tôles soudées, après l'enlèvement du bridage. Il peut être expliqué par l'effet thermique résiduel et la pression appliquée c'est-à-dire la présence des contraintes résiduelles générée par ce procédé ou par la conductivité thermique du support.
- Le soudage FSW dépend principalement de l'alliage soudé; sa nuance et son épaisseur et des paramètres de soudage (vitesse de rotation, vitesse d'avance et la pression appliquée suivant l'axe z).

Au cours de ce travail, on a eu l'occasion de prendre connaissance de cette nouvelle technologie de soudage qui est totalement différente des anciens procédés classiques utilisés auparavant, ainsi qu'aux facteurs qui influent sur la réalisation d'un bon joint soudé.

Bibliographie

- [1] J.Lanthony, Aluminium et alliages légers, Ed. Presses universitaires de France, Paris, pp 55, 1984
- [2] M.Khatirn, Etude des traitements thermiques et du soudage d'alliage d'aluminium corroyer 2024 T3 et 7075 T6 par le procédé TIG. Thèse d'ingénieur. Université de Blida.2006
- [3] K.Benyelloul, Application du Datamining pour la prédiction et l'optimisation d'un nouvel alliage d'Aluminium de la série 7xxx. Mémoire de Magister, 2008
- [4] jean barralis, gérard maeder. Précis métallurgie. Édition Nathan
- [5] E.Hasnaoui, Influence de traitement thermique sur les caractéristiques mécaniques de l'alliage d'aluminium 7075. Thèse d'ingénieur. Université de Blida
- [6] M.H.Redjaimia, l'Aluminium et ses alliages. Université Mohamed Khider Biskra 2008
- [7] R.Develay, Traitement thermiques des alliages d'aluminium. Techniques de l'ingénieur. M1290, M1291, 1986
- [8] C.Augustin, Prévision des cinétiques de propagation des défauts de corrosion affectant les structures en alliage d'aluminium 2024. Thèse de doctorat. Université de Toulouse. 2008
- [9] M.Hadji, Cours de métallurgie physique. LMD. Université de Blida 2009.
- [10] Y.A.HADEF, Influence de traitement thermique sur la microstructure et les propriétés mécaniques sur l'alliage 2024. Thèse d'ingénieur. Université de Blida.2005
- [11] H.M.Boshaki, Effet des traitements thermiques sur les propriétés mécaniques de l'alliage d'aluminium 2024. Mémoire de magister. Université de Blida
- [12]N.Decultot, Formage incrémental de tôle d'aluminium : étude du procédé à l'aide de la mesure de champs et identification de modèles de comportement. Thèse de doctorat. Université Paul Sabatier Toulouse 3
- [13] B.Dubost and P.Sainfort, Techniques de l'Ingénieur, 1991
- [14] S.Zimmer, Contribution a l'industrialisation du soudage par friction malaxage. École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers. Thèse de doctorat 2009
- [15] E.Hersent, Modélisation intégrée de la précipitation pour le soudage par friction malaxage d'alliages d'aluminium à durcissement structural. École nationale des mines Saint Etienne, Thèse de doctorat 2010.

- [16] A. Robineau. Friction-Malaxage (ou FSW) : un nouveau procédé pour l'obtention de soudures bimétalliques. 2006
- [17] B. Bekache. M. Seghir. Etude de la conception et de la réalisation de l'outil de soudage FSW avec des testes sur des alliages d'aluminium .université de Blida 2007
- [18] H. Mohamed, O. Mohamed. Réalisation et amélioration d'un outil de soudage FSW essais avec différentes formes de pions. Thèse ingéniorat 2010, cote : 3-531-033-2.
- [19]C.Genevois, Genèse des microstructures lors du soudage par friction malaxage d'alliages d'aluminium de la série 2000 & 5000 et comportement mécanique résultant. Thèse de doctorat. 2004
- [20] H.Yalavarthy, Friction Stir Welding process and material microstructure evolution modeling in 2000 AND 5000 series of Aluminum alloy. Thesis of Graduate School of Clemson University 2009
- [21] M.S.Guerdoux, Simulation numérique du soudage par frottement malaxage 2007
- [22] R.Cazes, Soudage par friction-malaxage. Technique de l'ingénieur
- [23] R.S. Mishra. Friction stir welding and processing. 2005