

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



École Nationale Polytechnique

**En collaboration avec : Centre de Recherche en Technologies Industrielles
(Cheraga).**

Département de Métallurgie

Mémoire de projet de fin d'études

Pour l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état en Génie des matériaux

**Optimisation des paramètres de soudage par FSW de
l'alliage aéronautique AL-7075T6**

Réalisé par :

- **BENSAOUDI Aymen Salah Eddine**
- **GUENDOZ Mouaadh**

Présenté et soutenu publiquement le 30/06/2022

Composition du jury :

Président	M. Kamel ABADLI	Dr	ENP
Examineur	M. Abdelmadjid KASSER	MCA	ENP
Promoteurs	M. Mohamed DJEGHLAL	Pr	ENP
	M. Farid BENLAMNOUAR	Dr	CRTI
	M. Larbi HEMMOUCHE	MCA	EMP

ENP 2022

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



École Nationale Polytechnique

**En collaboration avec : Centre de Recherche en Technologies Industrielles
(Cheraga).**

Département de Métallurgie

Mémoire de projet de fin d'études

Pour l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état en Génie des matériaux

**Optimisation des paramètres de soudage par FSW de
l'alliage aéronautique AL-7075T6**

Réalisé par :

- **BENSAOUDI Aymen Salah Eddine**
- **GUENDOZ Mouaadh**

Présenté et soutenu publiquement le 30/06/2022

Composition du jury :

Président	M. Kamel ABADLI	Dr	ENP
Examineur	M. Abdelmadjid KASSER	MCA	ENP
Promoteurs	M. Mohamed DJEGHLAL	Pr	ENP
	M. Farid BENLAMNOUAR	Dr	CRTI
	M. Larbi HEMMOUCHE	MCA	EMP

ENP 2022

في هذا العمل، نحن مهتمون بدراسة الخصائص الميكانيكية والمعدنية للحام بطريقة الاحتكاك المختلط لسبائك ألومنيوم 7075 الذي يستخدم في مجال الطيران، حيث قمنا باستعمال ست معلمات لحام عبر ثلاث شدة عبر سرعتي دوران وثلاثة سرع انتقال

لقد قمنا باستعمال المجهر الضوئي الاختبارات الميكانيكية (الشد، الصلابة، المرونة) وتقنية ترابط الصور أظهرت النتائج التي تم الحصول عليها أن العينات الملحومة باستعمال سرعة دوران 1800 دورة/ دقيقة وسرعة انتقال 40 مم/دقيقة تعطي خصائص ميكانيكية أفضل.

الكلمات الرئيسية: Al 7075 T6 ، تلحيم FSW، البنية المجهرية، الخصائص الميكانيكية، ترابط الصور

Abstract

In this work, we studied the mechanical and metallographic behavior of the FSW welds of an aluminum 7075, welded by 06 parameters: three speeds of translation and two speeds of rotation. For this, we used microstructural, mechanical (traction, hardness, resilience), and optical characterizations. The results obtained show that the samples welded with speed of rotation 1800 rpm and translation of 40 mm/min give better compromise between the mechanical and microstructural behavior.

Key words: Al 7570, FSW welding, microstructure, mechanical property, Image correlation

Résumé

Dans ce travail on a étudié le comportement mécanique, métallographique des soudures FSW d'un aluminium 7075, soudée par 06 paramètres : trois vitesse de translation et deux vitesse de rotation. Pour cela on a utilisé des caractérisations microstructurales, mécaniques (traction, dureté, résilience), et optiques. Les résultats obtenus à montrer que les échantillons soudés avec vitesse de rotation 1800 tr/min et translation de 40 mm/min donnent une meilleure compromis entre les propriétés mécaniques, et microstructurales.

Mots clés: 7075 T6, Soudage FSW, Microstructure, Propriétés mécaniques, corrélation d'image

Remerciements

Tout d'abord, louanges et remerciements au bon Dieu ALLAH le tout puissant qui est à l'origine de toutes les merveilleuses choses dont les plus précieuses « l'amour du savoir »,

Nous tenons à travers ce modeste travail à remercier nos promoteurs Pr Mohammed Elamine DJEGHLAL , Farid BENLAMNOUAR et Larbi HEMMOUCHE qui nous ont apporté leurs expériences avec la plus grande disponibilité tout au long de ces mois et leurs conseils et pertinentes remarques, qui nous ont été d'une très grande utilité

Nous tenons à exprimer notre gratitude au doctorante **Nosseiba Tadjer**, qui nous a orientés dans la bonne voie lors de la réalisation de ce travail.

Nous remercions vivement tous les membres du jury pour le temps qu'ils ont consacré à la lecture de ce mémoire et à l'intérêt qu'ils lui ont apporté. Monsieur ABADLI Kamel en tant que Président et Monsieur KASSER Abdelmadjid en tant qu'examinateur Nous leurs sommes redevables pour leur attention et leur bienveillance.

Un grand merci à nos familles qui nous ont toujours soutenus dans les meilleurs moments comme dans les pires; chers mères et pères.

Nos vifs remerciements à nos chers enseignants qui n'ont cessé de nous prodiguer tout leur savoir en Génie et Sciences des Matériaux .

Nous exprimons nos remerciements les plus sincères et notre profonde gratitude à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce modeste travail.

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail et ma profonde gratitude :

A mes chers parents pour l'éducation qu'ils m'ont prodigué ; avec tous les moyens et au prix de tous les sacrifices qu'ils ont consentis à mon égard, pour le sens du devoir qu'ils m'ont enseigné depuis mon enfance. Qu'ALLAH leurs procure bonne santé et longue vie. Mon cher papa, BENSAOUDI Ameur, et ma chère maman, LAHRACHE Saadia, je tiens à vous remercier

A mon grand frère Ahmed Khalil, et sa femme Lilia et le prince mohamed brahim et la princesse Meriem.

A mon adorable frère Mohamed samir ainsi qu'à ma très chère sœur Dr Aicha et son époux Dr Zemmiri Noerdin et la princesse Ayla ainsi qu'à ma futur femme safa belouadah qui ont toujours crus en moi et encouragé, aucune dédicace ne saurait exprimer l'amour que je porte pour vous.

A la mémoire de mes grands-parents. Qu'ALLAH vous accordez sa clémence, sa miséricorde et vous accueille dans son saint paradis.

A mes chères tantes, chers oncles, cousins et cousines...

Ma chère tante, Sabrina LAHRACHE ,Qu'ALLAH vous accordez sa clémence, sa miséricorde et vous accueille dans son saint paradis.

A tous mes amis : AIMEN MOHAMED, Mohamed ba3li Hamza, louai ,aymen zerouti, Oussama ma , oussama kheiri avec lesquels j'ai partagé mes moments de joie et de bonheur.

A l'équipe de B21 : foudhil , taki eddine ,Dr firas (chef), okba ,younes ,badro avec lesquels j'ai partagé mes moments de joie et de bonheur.

A mon binôme mouaadh avec qui j'ai eu beaucoup de plaisir de travailler avec lui.

A tous ceux qui me sont chers.

A tous ceux qui m'aiment

AYMEN SALAH EDDINE

Dédicaces

Je tiens à dédier cet humble travail à :

Mes très chers parents qui veillent sans cesse sur moi avec leurs prières et leurs soutiens depuis mon enfance. Que dieu les protège.

Toute ma famille.

A mon binôme AYMEN avec lequel j'ai eu beaucoup de plaisir de travailler avec lui.

A tous mes amis :

ZAKARIA, FIRAS, YAHIA, ABDERRAHMEN, PABLO, RAFIK, IDRIS, DJAWED....

A tous mes collègues (l'équipe B21) :

TAKI, FODHIL, OKBA, ELHABRI, SOHAIB...

Avec lesquels j'ai partagé mes moments de joie et de bonheur.

Et à tous ceux qui sont proches de mon cœur

MOUAADH

SOMMAIRE

LISTE DES FIGURES

LISTE DES TABLEAUX

LISTE DES ABREVIATIONS ET SYMBOLES

INTRODUCTION GENERALE	12
CHAPITRE I : GÉNÉRALITÉS SUR L'ALUMINIUM.....	15
I.1. Introduction.....	15
I.2. Principales caractéristiques de l'aluminium pur	15
I.3. Les nuances des alliages d'aluminium	15
I.4. Les familles d'aluminium.....	17
I.4.1. Les alliages d'Aluminium obtenus par corroyage.....	17
I.5. La nuance de la série 7000	18
I.5.1. Eléments d'addition.....	19
I.5.2. Les phases en série 7000	20
I.6. Alliage 7075	22
I.6.1. Durcissement structural.....	23
I.6.2. Soudabilité.....	25
I.7. Conclusion.....	26
CHAPITRE II : SOUDAGE FSW.....	28
II.1. Introduction.....	28
II.3. Les différents procédés de soudage	29
II.4. Le soudage en phase solide	30
II.5. Soudage par friction malaxage(FSW)	30
II.6. Le Soudage FSW des alliages d'aluminium	31
II.7. Les composants d'un procédé FSW	34
II.7.1. Outil FSW :.....	34
II.7.1.1. Epaulement	34
II.7.1.2. Pion.....	34
II.7.1.3 Matériaux d'outil	35
II.8. Les Phases de soudage.....	35
II.9. La formation de cordon de soudure	37
II.10. Aspects macrographie du joint de soudure FSW	37
II.10. Dureté à travers du joint :	38
II.10.1. Durcissement par écrouissage	38
II.10.2. Durcissement par précipitation	39

II.11. Les paramètres de soudage	40
II.11.1. Vitesses de rotation et d'avance	40
II.11.2. Force verticale exercée par l'outil	41
II.11.3. Angle d'inclinaison de l'outil	41
II.12. Les défauts dans les soudures FSW	42
II.13. Relation entre les défauts et les paramètres de soudage	46
II.14. Conclusion	46
CHAPITRE III : TECHNIQUES EXPÉRIMENTALES.....	48
III.1. Introduction	48
III.2. Les matériaux utilisés	48
III.3. Procédure de soudage	49
III.3.1. Réalisation de l'outil	49
III.3.2. Préparation des tôles	53
III.3.3. Soudage	53
III.3.1. Les étapes	54
III.4. Métallographie optique	55
III.4.1. Préparation des échantillons	55
III.4.2. Attaque chimique	57
III.4.3. Microscopie optique	57
III.5. Caractérisations mécaniques	58
III.5.1. Essai de dureté Vickers	58
III.5.2. Essai de traction	59
III.5.3. Corrélation d'image numérique	60
III.5.4. Essai de résilience	62
III.6. Conclusion	62
IV.1. Introduction	64
IV.2. Paramètres de soudage FSW	65
IV.3. Examen macrographique	65
IV.4. Examen micrographique	67
IV.5. Examen de la dureté	70
IV.6. Examen de la résilience	71
IV.7. TEST DE TRACTION	72
IV.8. Corrélation d'image :	73
IV.9. Conclusion	78
CONCLUSION GENERALE.....	80
RÉFÉRENCES	82

LISTE DES FIGURES

Figure I.1. principaux stades et flux dans la fabrication d'aluminium [4].	16
Figure I.2. diagramme d'équilibre AL-ZN	19
Figure I.3. (b)diagramme ternaire Al-Zn-Mg ; (a) projection d'une partie de diagramme [9].	20
Figure I.4. (a) représentation d'une solution solide sursaturée (b) représentation de GP dans la matrice d'aluminium [11].	21
Figure I.5. contournement des précipites par précipitation [13].	22
Figure I.6. traitement thermique T6	23
Figure I.7. diagramme TTT [15].	24
Figure I.8. diagramme TRC [15].	24
Figure I.9. Séquence de précipitation dans la série 7xxx	25
Figure I.10. schématisation de l'évolution de la micro dureté au cours d'un traitement thermique [16].	25
Figure II.1. les différents procédés de soudage	29
Figure II.2. manipulation FSW	33
Figure II.3. les différentes technologies de l'outil [21].	34
Figure II.4. les phases de soudage [23].	36
Figure II.5. les variations de la force axiale et du couple appliqué sur l'outil au cours de ces phases en fonction du temps [23].	36
Figure II.6 (a)Profils de dureté d'un joint soudé par FSW d'un alliage AA5454 soit dans un état écroui (symbole H) soit dans un état recuit (symbole O) . (b) Profil de dureté d'un joint soudé par FSW à deux vitesses de soudage différentes pour un AA7050-T74 [29].	39
Figure II.7. Effet de la vitesse de rotation et la vitesse d'avance de l'outil sur la taille des grains pour AA7075-T651: (a) 350 rpm, 152 mm/min (b) 400 rpm,102 mm/min[30]	41
Figure II.8. L'angle d'inclinaison de l'outil	42
Figure II.9. Présence de défauts de surface de type éraillures [26].	43
Figure II.10. Effondrement du noyau [26].	43
Figure II.11. Défaut à la racine du cordon [26].	44
Figure II.12. Manque de consolidation de la matière en surface [26].	44
Figure II.13. Soudure comportant un défaut tunnel interne [26].	45
Figure II.14. Soudure comportant un défaut de pénétration.	45
Figure II.15. Soudure contenant un film d'oxyde [26].	46
Figure III.1. Plaque brute d'aluminium 7075 T6	48
Figure III.2. l'alliage Z200C12 a l'Etat brut	50
Figure III.3. l'alliage Z200C12 a l'Etat brut	51
Figure III.4. l'outil de soudage après l'usinage	52
Figure III.5. traitement thermique d'outil .	52
Figure III.6. Découpage de la tôle	53
Figure III.7. La fraiseuse utilisée au niveau de l'atelier	53
Figure III.8 Paramètres de la machine de fraisage (a) vitesse de rotation (b)vitesse d'avance	54
Figure III.9 soudage des 3 echantillon	54
Figure III.10. Tronçonneuse utilisé pour découpage.	55
Figure III.11. Les échantillons après l'enrobage	56
Figure III.12. Polisseuse à disque tournant	56
Figure III.13. Microscope optique.	57
Figure III.14. Le Duromètre utilisé	58
Figure III.15. conception des éprouvettes de traction selon la norme.	59
Figure III.16. les outils utilise pour l'obtention de mouchetis	60

Figure III.17 les éprouvettes apres mouchetis.....	61
Figure III.18. conception des éprouvettes de résilience selon la norme.....	62
Figure IV.1 Les défauts de la vitesse (1120 tr/min) pour les différentes vitesses d’avance	65
Figure IV.2 Les défauts la vitesse (1800 tr/min) pour les différentes vitesses d’avance	66
Figure IV.3 La microstructure du matériau de base, (a) sens perpendiculaire, b) le sens de laminage	67
Figure IV.4 La microstructure des soudures FSW (1120 tr/min) pour la vitesse pour les différentes vitesses d’avance	67
Figure IV.5 Microfissures au sein des échantillons soudés.....	68
Figure IV.6 La microstructure des soudures FSW (1800 tr/min) pour la vitesse pour les différentes vitesses d’avance	69
Figure IV.7 Test de dureté des différentes zones des échantillons soudés.....	70
Figure IV.8 La ZAT des deux échantillons E3 et E6	70
Figure IV.9 La résilience des échantillons soudés	71
Figure IV.10 Les courbes de traction	72
Figure IV.11 histogramme de contrainte-echantillon.....	73
Figure IV.12 Corrélation de l’échantillon 1	74
Figure IV.13 Corélation de l’échantillon 2	75
Figure IV.14 Corealation de l’échantillon 6.....	75
Figure IV.15 Corrélation de l’échantillon 5	76
Figure IV.16 Corrélation de l’échantillon 4	77

LISTE DES TABLEAUX

Tableau I.1. les éléments d’addition des alliages d'aluminum [2].....	16
Tableau I.2. composition chimique de l'alliage 7075.....	23
Tableau II.1. Année d’apparition des principaux procédés de soudage [17].	28
Tableau II.2. les différents matériaux d’outil selon les matériaux à souder[22].	35
Tableau III.1. Composition chimique du matériau de base (en pourcentage massique)	49
Tableau III.2. Caracteristiques du matériau de base (en pourcentage massique).....	49
Tableau III.3. Composition chimique de l'alliage Z200C12	49
Tableau III.4. Caractéristiques mécaniques moyennes de l'alliage Z200C12	49
Tableau IV.1 Les paramètres de soudage choisis.....	65
Tableau IV.2 Résultats de test de traction	73

LISTE DES ABREVIATIONS ET SYMBOLES

FSW	Friction Stir Welding
η	Précipité durcissant Mg Zn ₂ .
η'	Phase métastable.
GP	Zone Guinier Preston.
ZAT	Zone Affectée Thermiquement
ZATM	Zone Affecté Thermo-Mécaniquement
MB	Métal de Base
ZM	Zone malaxée
ZF	Zone Fondue
R_e	Résistance de l'électrolyte
Hv	Dureté vickers

INTRODUCTION GENERALE

INTRODUCTION GENERALE

compte tenu des multiples contraintes du soudage par fusion des alliages d'aluminium, principalement les défauts de soudage ou on relève des dégradations considérables dans les propriétés mécaniques des joints soudés notamment le manque de pénétration, la porosité, l'effondrement, le manque de solidification et la fissuration à chaud ainsi que la baisse et la chute de résistance mécanique. ce dernier défaut est d'une importance primordiale étant donné qu'il est le facteur principal pour l'évaluation de la résistance d'une structure est de définir un paramètre qui caractérise les contraintes auxquelles la structure va être soumise, et par conséquent fixer une limite à ce paramètre à partir de laquelle la sécurité n'est plus garantie lors d'une sollicitation mécanique. le but est donc de limiter le plus possible les conditions de l'apparition de ces défauts. Ces difficultés ont été à la base pour trouver de nouveaux procédés alternatifs pour remédier à ces problèmes et améliorer ainsi les caractéristiques des joints soudés ; il s'agit d'assemblage des pièces d'aluminium et ses alliages par des processus d'assemblage à l'état solide, à savoir: soudage par friction, soudage sous pression et soudage par ultrasons.

Le soudage par friction-malaxage (FSW) étant une technique récente de soudage, issue du soudage par friction, et semble être une des meilleures alternatives pour remédier aux contraintes résultant du soudage par fusion

C'est un procédé qui a été adopté pour l'assemblage des alliages légers, d'où sa vaste utilisation et son emploi dans de multiples applications relevant des industries, aérospatiale, navale, automobile, marine et ferroviaire.

Le procédé de soudage FSW a été inventé et breveté par The Welding Institute (UK) au début des années 90 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 et a progressé durant les années 2000 pour répondre aux besoins de l'industrie aéronautique par une méthode d'assemblage du Magnésium, Aluminium, Cuivre, Titan et plus tard les aciers.

C'est un procédé qui suscite beaucoup d'intérêt tant sur le volet industriel que celui des applications dans l'aérospatiale, il a permis le soudage de matériaux jusqu'alors considérés comme difficilement soudables, voire non soudables, tels que certains alliages d'aluminium à hautes performances des séries 2xxx et 7xxx il s'agit d'un procédé de soudage en phase solide, l'impact thermique et la dégradation des propriétés mécaniques des métaux de base sont limités. Ceci est le résultat d'étude des paramètres de soudage par friction malaxage des joints soudés en alliage d'aluminium 7075 T6; ou l'objectif de cette étude est l'évaluer des paramètres de

soudage et leurs impacts sur les caractéristiques mécaniques et métallurgiques des joints des soudures. particulièrement, les paramètres mécaniques et structuraux des cordons de soudure ;et c'est dans ce contexte que se focalise notre travail reparti selon ce qui suit:

Premier chapitre : notions détaillées sur l'aluminium et les différentes classes des alliages de ce metal.

Second chapitre : les soudage FSW, ainsi que leurs paramètres ayant effet sur les propriétés d'un joint soudé et les phénomènes engendrés par le soudage.

Troisième chapitre :description des différentes techniques expérimentales utilisées et mise en application dans notre étude.

Quatrième chapitre :Les résultats obtenus par observation métallographique, traction,microdureté. ou l'ensemble de ces résultats nous ont permis de déterminer le meilleur paramètre obtenu et qui est le meilleur compromis des différentes caractéristiques mécanique, métallurgique ainsi que microstructurale.

Il est à noter que les chapitres finissent par des conclusions intermédiaires, qui seront regroupées à la fin du document dans une conclusion générale ou il y aura aussi quelques perspectives.

Chapitre I : GENERALITES SUR L'ALUMINIUM

CHAPITRE I : GENERALITES SUR L'ALUMINIUM

I.1. Introduction

Les caractéristiques d'Aluminium rendent ses alliages plus utilisés pour la fabrication mécanique en deuxième classe après les alliages ferreux. La légèreté de l'aluminium, sa maniabilité et usinabilité, sa durabilité font que les alliages d'aluminium ont plusieurs applications dans de nombreux domaines économiques et secteurs stratégiques. On a de nombreux composants dans l'industrie automobile, aéronautique et de la construction mécanique.

I.2. Principales caractéristiques de l'aluminium pur

La popularité de l'aluminium ne cesse de s'accroître de plus en plus par les multiples propriétés et qualités de ce métal; à savoir : malléabilité, couleur argentée, résistance à l'oxydation, densité (faible), il possède : un bas point de fusion (658°C), une ductilité élevée ($A\% \approx 40\%$), une légèreté (Densité 2,7) et un module d'élasticité de l'aluminium est $E =$ environ 70 GPa [1].

A l'échelle atomique l'aluminium possède une structure cristalline et cubique à faces centrées (CFC) ($a = 0,404$ nm à Température ambiante).

I.3. Les nuances des alliages d'aluminium

L'aluminium pur possède des propriétés mécaniques très médiocres qui font contrainte importante pour son emploi dans certaines applications. Cette contrainte a conduit à la possibilité de l'augmentation de ces propriétés vues que l'aluminium est capable de se combiner avec un grand nombre d'autres éléments pour donner naissance à de multiples alliages ayant des propriétés très larges pour satisfaire un grand nombre d'applications [2].

Les éléments d'additions principalement connus sont le zinc « Zn », le silicium « Si », le magnésium « Mg », le manganèse « Mn » et le cuivre « Cu » (Voir tableau I .1).

Série 1000	99% d'aluminium au minimum	-
Série 2000	Cuivre (Cu)	Al ₂ Cu - Al ₂ CuMg
Série 3000	Manganèse (Mn)	Al ₆ Mn
Série 4000	Silicium (Si)	-
Série 5000	Magnésium (Mg)	Al ₃ Mg ₂
Série 6000	Magnésium (Mg) et Silicium (Si)	Mg ₂ Si
Série 7000	Zinc (Zn)	MgZn ₂
Série 8000	8xxx Autres éléments	-

Tableau I.1. Les éléments d'addition des alliages d'aluminium [2].

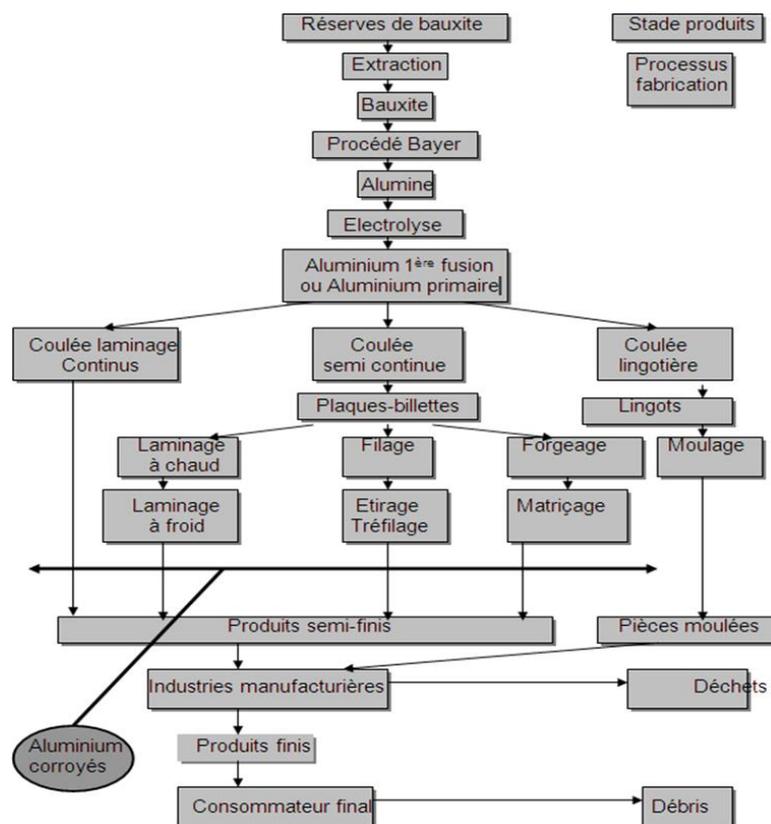


Figure I.1. principaux stades et flux dans la fabrication d'aluminium [4].

Parmi les métaux, l'aluminium se classe au 2ème rang après le silicium comme métal plus abondant de la croûte terrestre mais qui n'est pas à l'état natif.

La roche sédimentaire appelée « BAUXITE » étant la roche principale contenant plus de 50% d'oxyde d'aluminium ou alumine. (Al₂O₃), il s'y trouve sous forme combinée.

retient également la présence de notre métal dans d'autres minéraux tels que la néphéline ou la leucite [3].

On relève la commodité et l'aisance de l'extraction de la « BAUXITE », mais sa transformation en aluminium est complexe, et s'effectue en deux phases : la première consiste à l'extraction de l'alumine de la bauxite par un procédé chimique. La seconde, à réduire l'alumine en aluminium par un procédé électrolytique pour produire ainsi l'aluminium de première fusion [1].

La production d'aluminium de seconde fusion concerne le recyclage et la fin de vie de l'aluminium.

I.4. Les familles d'aluminium

L'ensemble des alliages d'aluminium issu de la combinaison de l'aluminium pur avec d'autres éléments se fait distinguer par deux familles :

- Les alliages pour corroyage, destinés à être mis en forme.
- Les alliages de fonderie, possédant une bonne coulabilité.

Les alliages de corroyage sont multiples et se font diversifier en fonction de leur élément d'alliage prépondérant, comme précisé dans la figure I.1., sachant bien entendu que l'élément d'alliage vise à changer les propriétés initiales du métal ou à lui conférer de nouvelles propriétés [4].

Dans notre cas on s'intéresse sur l'aluminium corroyé

I.4.1. Les alliages d'Aluminium obtenus par corroyage

Les processus de durcissement (Chauffe + Trempe) sont utilisés pour obtenir les propriétés mécaniques spécifiques d'un composant, requises pour son utilisation.

Un revenu est un traitement thermique à basse température (150 à 650 °C) destiné à éliminer les contraintes et la fragilisation provoquées par la trempe et obtenir les propriétés mécaniques requises [5].

I.4.1.1. Les alliages d'Aluminium obtenus par écrouissage

Les traitements thermiques de trempe revenu des alliages non trempant sont sans aucun effet, du fait que l'élément d'alliage n'agit pas lors du processus du revenu (absence d'agitations et de précipitations sous forme suffisamment dispersée pour empêcher le

déplacement des dislocations). Le durcissement pourrait être obtenu par écrouissage (laminage, étirage).

En effet, le durcissement par écrouissage est largement utilisé pour augmenter les caractéristiques mécaniques de nombreux alliages, ce dernier confère aux alliages leurs propriétés essentielles de ténacité.

Ce durcissement est obtenu sous l'effet de déformation plastique à froid (état H) de la matière. Cette opération procure une augmentation de la limite d'élasticité, de la dureté et une diminution de la ductilité (allongement à rupture, coefficient de striction) [6].

I.4.1.2. Les alliages d'Aluminium obtenus par trempe

Les traitements thermiques des alliages d'aluminium dits trempant s'effectuent dans le but de conserver un élément en sursaturation pour améliorer les propriétés mécaniques et en augmenter la résistance ou préparer un durcissement ultérieur par revenu, ce qui est la base du traitement de durcissement par précipitation d'un grand nombre d'alliages. Ces alliages peuvent alors être durcis par la présence de particules finement dispersées (les précipités) dans les grains.

Ces alliages se caractérisent par une solubilité très élevée à haute température des éléments d'alliages impliqués dans le durcissement et au contraire, la solubilité serait très faible à une basse température [7].

I.5. La nuance de la série 7000

La caractéristique du rapport poids/résistance de l'aluminium rend ce métal très approprié pour de multiples emplois industriels notamment, la conception et la construction de structures robustes et légères avec de nombreux avantages pour les structures mobiles, telles que les navires, les véhicules et les avions. La faible densité de l'aluminium fait de ces alliages un métal naturellement destiné aux applications nécessitant des propriétés mécaniques élevées pour un moindre poids.

Les alliages d'aluminium ayant la plus forte réponse au durcissement par vieillissement sont basés sur le système Al-Zn-Mg (alliages 7xxx). Ces alliages bénéficient d'un bon renforcement par précipitation, grâce à des processus de décomposition complexes impliquant des phases stables et métastables.

I.5.1. Eléments d'addition

I.5.1.1. Le Zinc (Zn)

A une haute température le zinc possède une solubilité importante dans l'aluminium, alors qu'à une température ambiante, la solubilité diminue jusqu'à 2 %, ceci pourrait favoriser augmenter et avoir une bonne tendance de durcissement par vieillissement. Toutefois, les précipités formés étaient essentiellement du zinc pur d'où une étendue du durcissement relativement faible, ce qui a entraîné un durcissement limité de l'alliage [8].

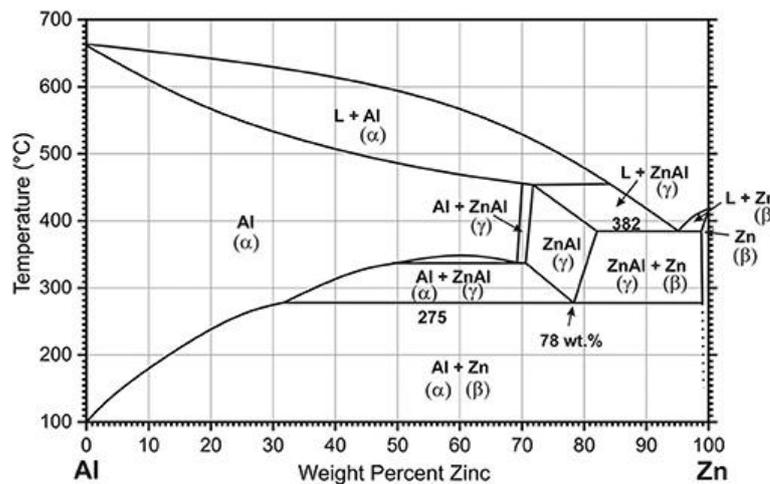


Figure I.2. Diagramme d'équilibré Al-Zn

I.5.1.2. Le Magnésium

Le diagramme de phase (voir Figure I.3.) indique clairement que les additions de magnésium influent considérablement sur l'étendue des phases de durcissement [8]. Une interaction préférentielle entre les additions (Zinc et Magnésium) sur le réseau d'aluminium, entraîne un certain regroupement qui ont un rôle important dans les processus de décomposition au cours du vieillissement.

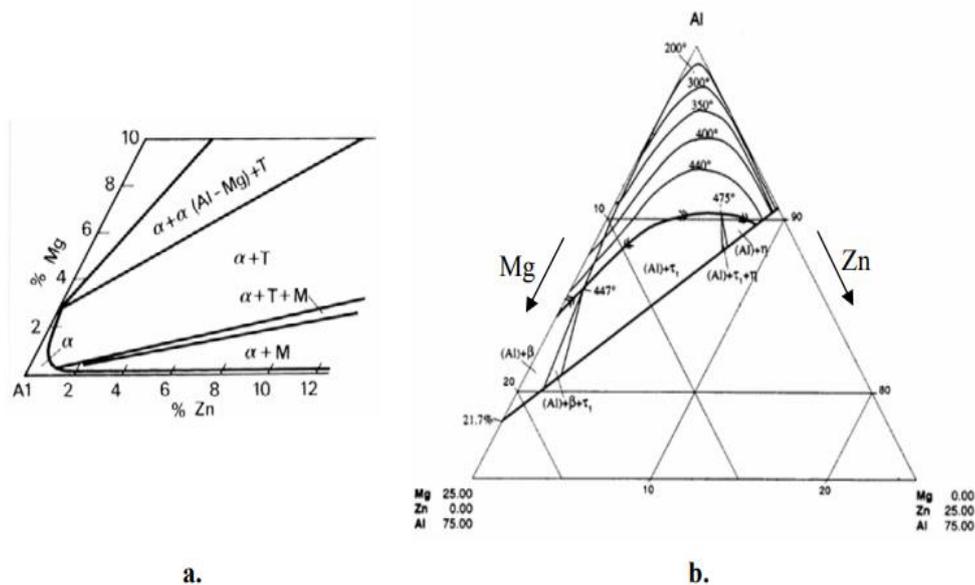


Figure I.3. (b) diagramme ternaire Al-Zn-Mg ; (a) projection d'une partie de diagramme [9].

I.5.1.3. Le Cuivre

L'addition de cuivre est normalement considérée comme favorable pour réduire ou prévenir la fissuration par corrosion sous contrainte

I.5.2. Les phases en série 7000

Les traitements thermiques habituels des alliages Al-Zn-Mg comprennent plusieurs phases qui peuvent être regroupées en deux classes :

- Les phases d'équilibre,
- Les précipités métastables

La nature de ces phases dépend de leur symétrie cristalline et de leurs relations d'orientation avec la matrice.

I.5.2.1. Les phases d'équilibre

Le diagramme de phase ternaire Al-Zn-Mg (voir figure), montre clairement que dans la partie riche en aluminium on distingue deux phases d'équilibre [10].

La phase η (MgZn_2) : Structure hexagonale, Maille: $a=5.23\text{\AA}$ et $c=8.57\text{\AA}$, Incohérence des précipités avec la matrice.

La phase T ($\text{Al}_2\text{Mg}_3\text{Zn}_3$) : Qui n'est pas couramment observée lors de traitements thermiques habituels alliages commerciaux.

I.5.2.2. Les précipités métastables :

Contrairement à l'incohérence des particules η avec la matrice (énergie interraciale relativement élevée), avec un niveau de cohérence élevé (énergie interraciale plus faible), il pourrait y avoir une formation de précipités métastables, préférentiellement à une température basse en raison d'une barrière d'activation plus faible pour la nucléation.

Les phases métastables les plus courantes dans le système Al-Zn-Mg sont les zones de Guinier-Preston (zones GP) et les particules η' .

Les zones de Guinier-Preston (zones GP) :

Les zones GP se forment à basse température, voire à température ambiante, et sont totalement cohérentes avec la matrice d'aluminium. Elles sont constituées de couches parallèles aux plans de la matrice (100) enrichies alternativement en zinc et en magnésium, en raison de l'effet de taille opposé des deux éléments d'alliage [11].

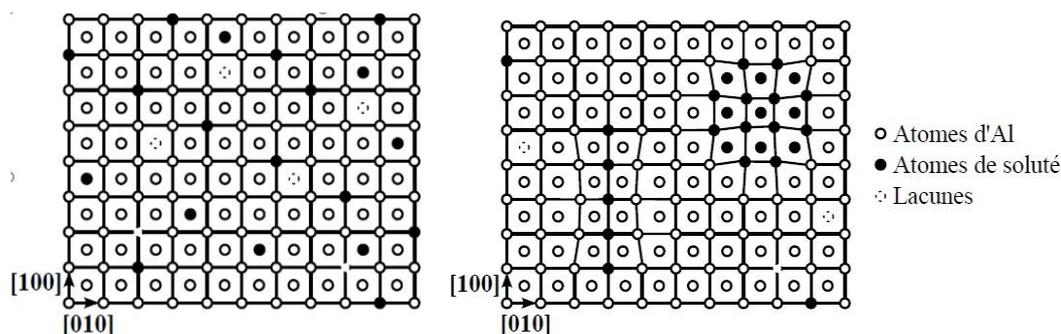


Figure I.4. (a) représentation d'une solution solide sursaturée (b) représentation de GP dans la matrice d'aluminium [11].

Les zones GP(II) apparaissent sur les plans $\{111\}$ α et ont une épaisseur de quelques couches atomiques. Elles ne se forment qu'après une trempe à partir de températures supérieures à 450°C.

I.5.2.3. Phase métastable η'

Elle apparaît pour des températures de revenu allant de 120 à 180°C et reste stable jusqu'à 250°C [12], cette phase est considérée comme la principale phase de durcissement ; sa structure est hexagonale, semi-cohérente avec la matrice. Sa composition est difficile à établir, ceci pourrait être dû à son évolution durant le revenu.

Il est impérativement nécessaire d'empêcher la création de nouvelles dislocations ou au déplacement des dislocations existantes à l'intérieur du métal par la précipitation des nouvelles

phases à partir d'une solution solide sursaturée consistant à créer des obstacles qui s'opposent à leur déplacements.

I.5.2.4. Contournement des précipités

Lorsque s'agit d'une solution solide résiduelle ou Al presque pour les particules sont plus dures que la matrice, les dislocations ne peuvent pas pénétrer les précipités. Elles sont obligées de les contourner (Mécanisme d'Orowan figure) [13].

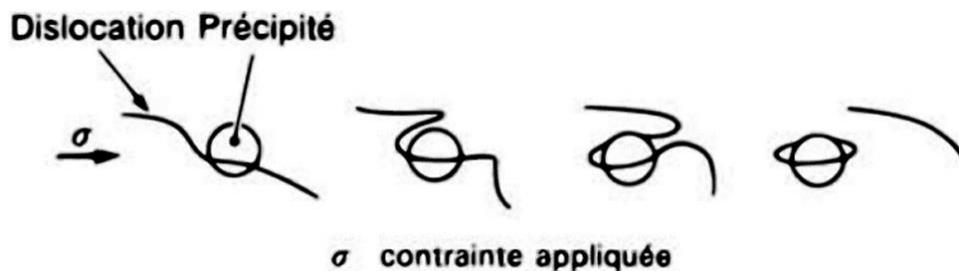


Figure I.5. Contournement des précipités par précipitation [13].

I.5.2.5. Cisaillement des précipités

Lors du début de la précipitation, des zones GP naissent, ces dernières sont encore très petites et leur cohérence avec le réseau de la matrice rend possible un glissement sans déviation, sur un seul plan cristallographique. Leur résistance étant faible et elles ne peuvent résister au cisaillement (figure I.5) mais, cette résistance augmente avec leur taille ainsi qu'avec la progression de la transformation en particules semi-cohérentes (η') et incohérentes (η).

L'accroissement du durcissement continue jusqu'à ce que le contournement devienne le même et $\tau_c = \tau_p$. (Durcissement Optimal). En effet, le revenu prolongé aboutit à une coalescence des zones GP, et l'apparition de nouvelles phases avec des grains plus gros.

Bien que cela fasse augmenter leur résistance, l'agrandissement de la séparation facilite le contournement et adoucit le métal (sur-vieillessement)

I.6. Alliage 7075

Il existe un alliage (aluminium - zinc) destiné essentiellement pour l'application dans le domaine de l'aéronautique, et plus particulièrement dans les parties structurales ; en bénéficiant ainsi d'une caractéristique principale et importante dans le domaine industriel qu'est le rapport poids/résistance, et ce d'un point de vue mécanique, ainsi que de sa résistance considérable aux

chocs, aux efforts du poids et de torsion. Il est également l'alliage d'aluminium le moins soumis à «terme expansion» et par conséquent le plus adéquat à une utilisation dans des environnements extérieurs et exposés aux conditions climatiques auxquelles il résiste parfaitement mieux, notamment aux changements de température

Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Al
max 0,40	max 0,50	1,2 à 2,0	max 0,30	2,1 à 2,9	0,18 à 0,28	5,1 à 6,1	max 0,20	Solde

Tableau I.2. composition chimique de l'alliage 7075

I.6.1. Durcissement structural

Un traitement de mise en solution suivi d'une trempe, puis une maturation et un revenu sont des procédés nécessaires pour atteindre le durcissement structural dans l'alliage considéré (Figure I.6.).

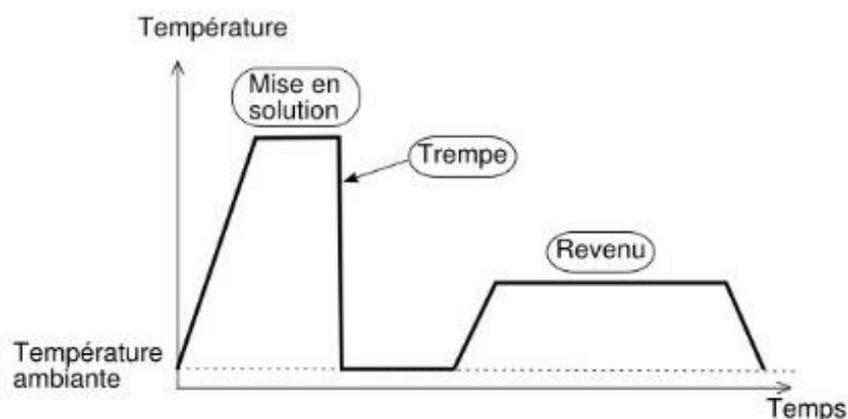


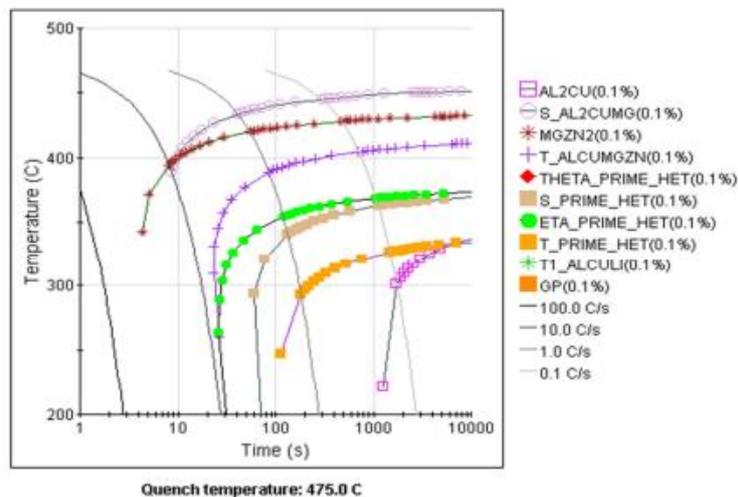
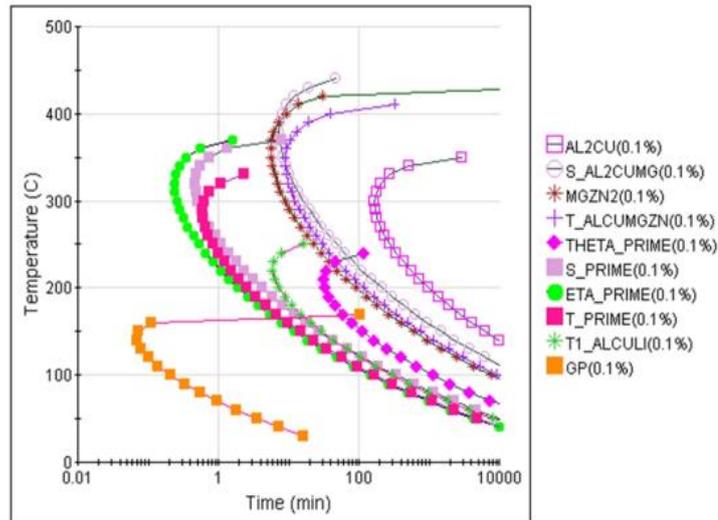
Figure I.6. Traitement thermique T6

I.6.1.1. Mise en solution

En vue d'obtenir une dissolution parfaite, les composés entrants dans la précipitation durcissant doivent être soumis des températures de mise en solution recommandées comprises entre 450 et 475°C [14].

I.6.1.2. Trempe

Après la mise en solution c'est « la trempe », qui est une étape qui consiste en un refroidissement suffisamment rapide de cette solution solide visant à éviter la formation de précipités intermétalliques stables. L'état résultant estimé stable: c'est une solution solide sursaturée en éléments d'alliages et en lacunes. Après la trempe, des contraintes résiduelles peuvent apparaître au sein du matériau, d'autant plus que le produit est épais [14].



I.6.1.3. Revenu

Le dit traitement de revenu est un procédé qui consiste en un vieillissement artificiel, c'est un traitement thermique qui succède à la trempe, à température modérée (100–200°C), le

traitement vise un maximum de durcissement qui se manifeste par l'apparition de phases métastables (η' dans le système Al-Zn-Mg).

Dans le cas où le maintien du revenu dure trop longtemps, la phase stable (η) apparaît et la dureté décroît progressivement : on parle alors de sur-revenu. La Figure I.9. illustre la séquence de précipitation typique d'un alliage de la série 7xxx lors d'un traitement thermique.

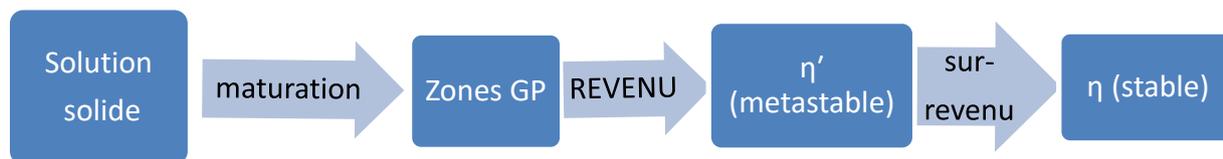


Figure I.9. Séquence de précipitation dans la série 7xxx

Les modifications microstructurales, s'accompagnent d'une évolution des propriétés mécaniques. La figure I.10 schématise l'évolution de la micro dureté au cours d'un traitement thermique

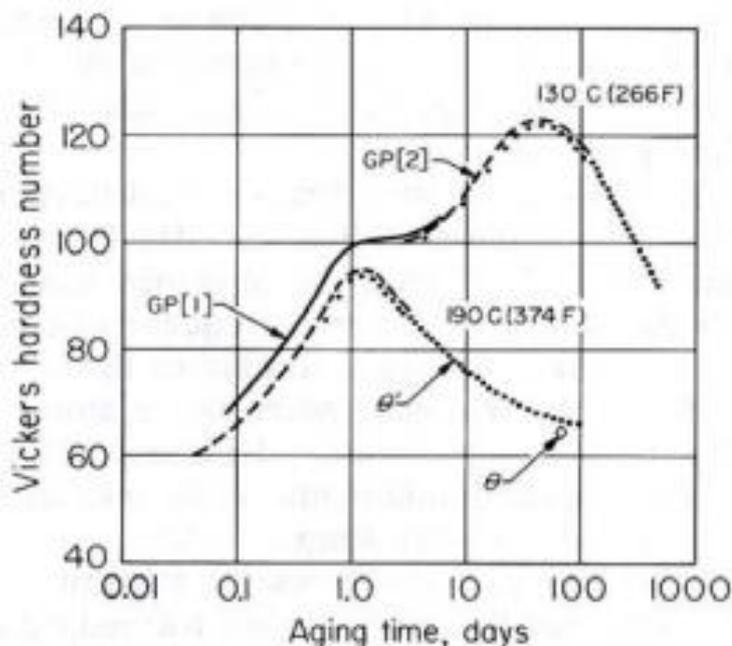


Figure I.10. Schématise l'évolution de la micro dureté au cours d'un traitement thermique [16].

I.6.2. Soudabilité

La soudabilité par fusion telle est le problème majeur qui s'impose pour cet alliage. En raison de la présence de cuivre, cet alliage est d'une extrême sensibilité à la fissuration de solidification des soudures ainsi qu'à la fissuration de la zone affectée thermiquement (ZAT). Parmi les moyens pour faire face à ce problème, l'utilisation d'un alliage d'aluminium d'apport

approprié non traitable à la chaleur (par exemple, Al-Mg ou Al-Si), cet alliage semble rendre possible de surmonter le problème de la fissuration de solidification des soudures ; les efficacités de joint qui en résultent sont intolérables (très faibles).

Additivement à ce qui précède l'oxydation et/ou la vaporisation du zinc pendant le soudage, relèvent le problème de la porosité, le manque de fusion et les fumées dangereuses, ce qui fait restreindre l'utilisation de l'alliage AA7075 aux applications qui n'impliquent pas de soudage.

I.7. Conclusion

De ce qui précède on s'aperçoit que Le choix des matériaux semble avoir été optimisé (aluminium et alliage). Ainsi les innovations technologiques se focalisent maintenant vers les procédés d'assemblage. En effet, et dans l'objectif diminuer du poids et par conséquent construire de plus gros avions, une méthode serait d'éliminer les rivets servant à joindre les tôles entre elles. Jusqu'à une époque récente, le rivetage et le boulonnage étaient les seuls procédés utilisés en tant que moyens d'assemblage. Bien que, le rivetage présente des problèmes a savoir

- Augmentation de masse
- Concentrations de contraintes (néfastes à la tenue des assemblages)
- Mauvaise résistance à la corrosion des structures rivetées
- Difficultés d'automatisation (influence sur le cout)

Compte tenu de ces problèmes, l'utilisation de procédés de soudage à l'état solide s'impose, comme le soudage par friction et le soudage par friction-malaxage, est intéressante pour l'alliage AA7075. Étant donné que la fusion et la solidification sont à exclure dans ces procédés, d'où l'absence de problèmes de soudabilités, ce qui permet d'élargir leur gamme d'utilisation dans l'aéronautique.

CHAPITRE II : SOUDAGE FSW

Chapitre II : SOUDAGE FSW

II.1. Introduction

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 le Tableau II.1, une grande variété de procédés de soudage a été développée à ce jour (voir Tableau II.1) [17].

	Date d'apparition	Apparition des procédés	Types de procédé
1880			
	1886	Soudage par Résistance	Electrique
1900	1895	Aluminothermie	Chimique
	1902	Soudage au chalumeau oxyacétylénique	Flamme
	1907	Soudage à l'électrode enrobe	Electrique
	1924	Soudage TIG	Electrique
	1930	Soudage à arc sous flux submergé	Electrique
1950	1943	Soudage MIG	Electrique
	1955	Soudage MAG	Electrique
	1956	Soudage par faisceaux d'électrons	Faisceaux a haute énergie
	1956	Soudage par friction rotative	Mécanique
1960	1957	Soudage par explosion	Chimique
	1965	Soudage laser	Faisceaux à haute énergie
1990			
	1991	Soudage par friction malaxage	Mécanique

Tableau II.1. Année d'apparition des principaux procédés de soudage [17].

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 [17].

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)

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) (Figure II.1).

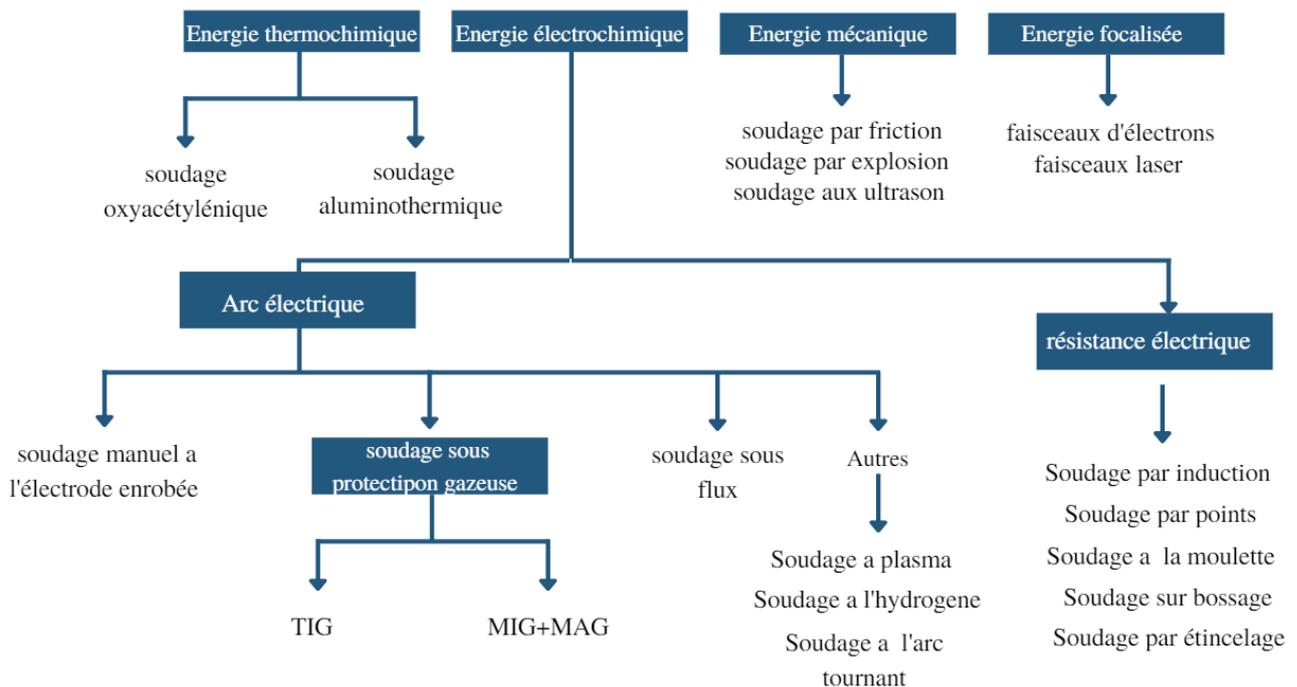


Figure II.1. les différents procédés de soudage

II.4. Le soudage en phase solide

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 :

- Un mouvement relatif une déformation ou 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 ultrasons.
- 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 [18].

II.5. Soudage par friction malaxage(FSW)

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 WeldingInstitute, 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 adaptés à plusieurs matériaux : Acier, Titanium, le cuivre et plus particulièrement aux alliages d'aluminium a durcissement structural (série 2000, 6000, 7000), difficilement soudable par voie classique [19].

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 [19]:

- 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... ;

II.6. Le Soudage FSW des alliages d'aluminium

Le procédé de Friction Stir Welding est particulièrement bien adapté au soudage de certaines séries d'alliages d'aluminium réputées non soudables par des méthodes conventionnelles (par fusion). C'est le cas pour certains alliages de la série 2000 ou 7000. En effet, outre la nécessité de bien protéger le bain fondu avec un gaz neutre pour éviter tout contact de l'aluminium avec l'air, ces alliages ont une très forte sensibilité à la fissuration à cause des retraits de solidification. Le soudage FSW se faisant sans passer par la fusion, il permet d'éviter ces fissurations.

Plus globalement, ce procédé de soudage peut permettre d'obtenir de meilleures propriétés mécaniques au sein du joint par comparaison avec les procédés de soudages dits classiques, du fait des températures plus basses atteintes en cours de soudage. En effet, lors de l'opération de soudage FSW, la température la plus élevée se situe en dessous de la température de fusion des matériaux : Il n'y a pas de passage à l'état liquide, et donc de nombreux défauts tels que les pores ou les soufflures sont évités. Par ailleurs, on peut s'attendre à diminuer le niveau des contraintes résiduelles dans les tôles car les gradients thermiques sont plus faibles.

Les spécificités du soudage par friction malaxage lui confèrent les avantages suivants [20]

:

- Pas de fusion de la matière, donc pas de problèmes liés à la solidification (Fissuration à chaud, Porosités) ;
- Déformations faibles, même pour des grandes longueurs ;
- Conservation de bonnes propriétés mécaniques du joint soudé (en statique et en fatigue) ;
- Procédé propre, respect pour l'environnement (pas d'émanation de fumée, pas de projections, pas de décapage chimique, pas de rayonnement) ;
- Pas de besoin en consommables (outil non consommable, pas de métal d'apport, pas de gaz de protection) ;
- Procédé simple et efficace à mettre en oeuvre au niveau énergétique ;
- Soudage d'alliages difficilement soudables par les procédés classiques (par exemple, les alliages d'aluminium des séries 2xxx et 7xxx) ;
- Qualité des soudures reproductible (procédé automatisé) ;
- Vitesse de soudage élevée (jusqu'à 2m/minutes, cela dépend des matériaux soudés et des épaisseurs) ;
- Possibilité de réaliser des assemblages hétérogènes (Aluminium/Cuivre, Aluminium/Acier...) ;
- Pas de métal d'apport, ainsi le cordon de soudure est constitué du même métal que les parties soudées (maîtrise de la composition du cordon de soudure) ;
- Zone affectée thermiquement généralement plus étroite qu'en soudage à l'arc ;
- Ne nécessite pas de personnel hautement qualifié (pas de nécessité de soudeur qualifié) ;
- Ne nécessite pas obligatoirement d'usinage post-soudage (en fonction des contraintes imposées par le cahier des charges) ;
- Les inconvénients relatifs à cette technologie de soudage proviennent pour une grande part des efforts mécaniques à mettre en oeuvre pour réaliser l'assemblage ;

- Les parties à souder doivent être rigidement maintenues ;
- Les configurations des géométries soudées sont limitées, en raison notamment de l'encombrement de la tête de soudage et du bridage ;
- Nécessité de positionner sur le côté envers des pièces un support très rigide (plaque, barre, enclume, ...) afin de supporter les efforts verticaux appliqués par la tête de soudage ;
- Coût élevé de l'investissement (machine, outillage et bridage) et coût relatif au brevet de la technologie (acquisition des licences et royalties) ;
- Actuellement, seuls les matériaux à bas point de fusion (Al, Cu, Mg) sont soudables industriellement, pour des raisons de durée de vie de l'outil ;
- Pas d'apport de métal pour maîtriser la composition de la zone de liaison ;

Le FSW repose sur le principe d'un échauffement lié au frottement d'un outil en rotation ainsi qu'aux déformations plastiques engendrées par le malaxage. Ces effets combinés amènent la matière dans un état viscoplastique, ce qui crée une soudure de proche en proche lors de l'avance de l'outil (Figure II.2).

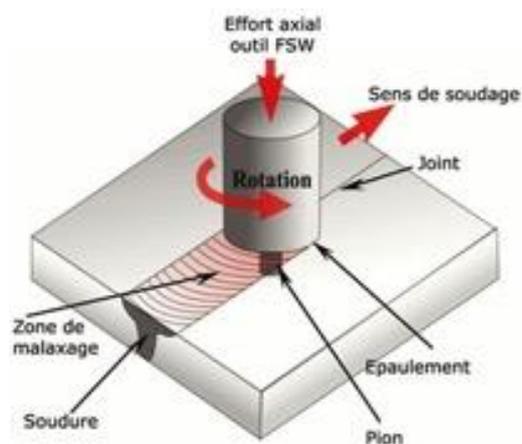


Figure II.2. Manipe FSW

II.7. Les composants d'un procédé FSW

II.7.1. Outil FSW :

L'outil de soudage en FSW a un rôle primordial. Il comporte deux parties : un épaulement et un pion. Il existe trois configurations d'outil possibles qui sont utilisées pour le soudage par friction malaxage (FSW). Ceux sont, l'outil conventionnel, l'outil à pion rétractable et l'outil à double épaulements appelé «bobbin tool» [21] . Ces trois types d'outil sont schématisés sur la Figure II.3.

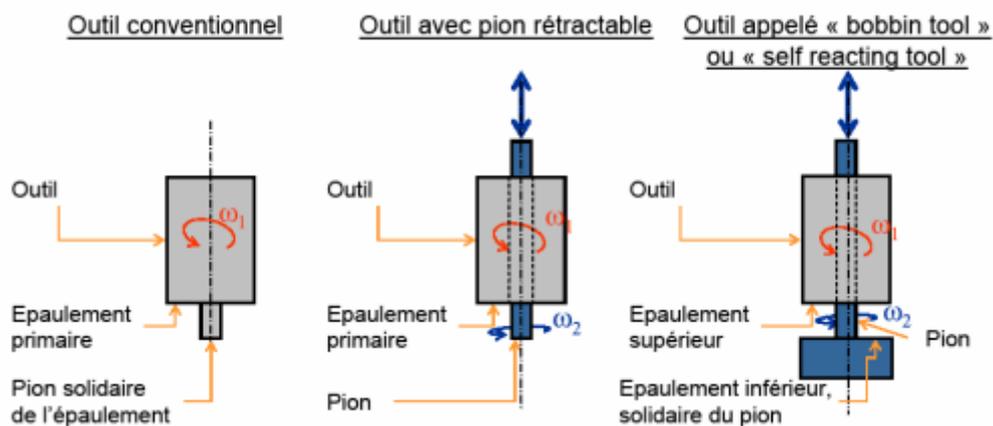


Figure II.3. Les différentes technologies de l'outil [21].

II.7.1.1. Epaulement

Sa forme est globalement plane et perpendiculaire à l'axe de rotation, La chaleur générée par le frottement de l'épaulement de l'outil provoque un ramollissement local qui permet le malaxage de la matière ainsi elle permet de bloquer le reflux de la matière vers le haut.

II.7.1.2. Pion

Le pion est l'élément principal de l'opération de malaxage. Il assure la déformation plastique de la matière en malaxant la matière des pièces à souder. Généralement la géométrie du pion est conçue afin d'assurer à une amélioration de l'écoulement du matériau et de minimiser les efforts appliqués sur l'outil. La longueur du pion doit être adaptée à l'épaisseur des pièces à souder. Une longueur adéquate du pion permet de souder sur toute l'épaisseur sans avoir un défaut de manque de pénétration [21]. Il peut prendre diverses formes simples ou sophistiquées. Il est généralement tronconique et (ou) prismatique a pour rôle de malaxer efficacement le métal dans le joint en générant un minimum d'effort à l'avance de l'outil

II.7.1.3 Matériaux d'outil

Le matériau de l'outil doit résister aux contraintes et aux températures générées lors du soudage FSW [22]. D'autres critères rentrent également en ligne de compte, tels que la résistance à l'usure, la non diffusivité vers le matériau soudé, ses capacités à être usiné, etc. [22]. Ainsi, le matériau de l'outil sera choisi d'après le matériau soudé et l'épaisseur soudée, comme présenté sur le Tableau II.2.

Alliage	Epaisseur	Matériaux d'outil
Alliage d'aluminium	≤ 12	Acier à Outil
	≤ 26	MP159
Alliage de Magnésium	≤ 6	Acier à Outil, WC
Alliage de Cuivre	≤ 50	Alliage de Nickel, PCBN, Alliage W
	≤ 11	Acier à Outil
Alliage de Titane	≤ 6	Alliage W
Acier INOX	≤ 6	Alliage W
Acier Faiblement allié	≤ 10	PCBN, WC
Alliage de Nickel	≤ 6	PCBN, Alliage W

Tableau II.2. les différents matériaux d'outil selon les matériaux à souder [22].

II.8. Les Phases de soudage

La soudure obtenue par friction malaxage est réalisée, en quatre phases distinctes dont chacune a un rôle précis [23], soit :

- Phase de plongée : le pion de l'outil en rotation pénètre dans le joint jusqu'à ce que l'épaulement exerce la force de compression requise pour générer la chaleur.
- Phase d'attente ou de stabilisation : elle correspond au temps requis pour que le frottement produit par l'épaulement chauffe le joint à la température requise.
- Phase d'avance ou de soudage proprement dit : l'outil décolle à vitesse constante le long du joint en exerçant une pression constante sur la surface.
- Phase de retrait de l'outil : l'outil arrête d'avancer et se retire de la surface

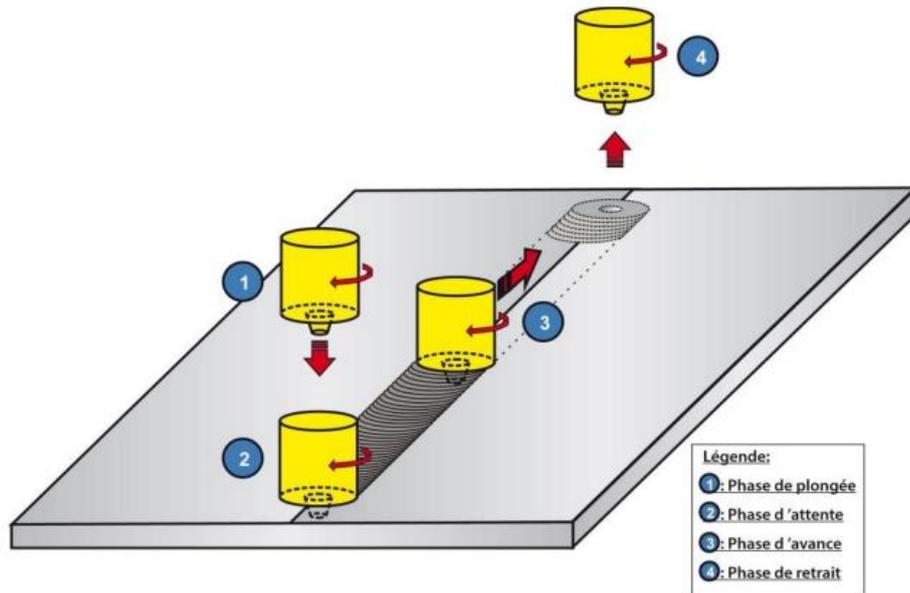


Figure II.4. les phases de soudage [23].

La figure II.5 montre les variations de la force axiale et du couple appliqué sur l'outil au cours de ces phases en fonction de temps. Les valeurs précises de la force et du couple dépendent de la géométrie de l'outil, de celle du joint à souder, des alliages et des paramètres de soudage.

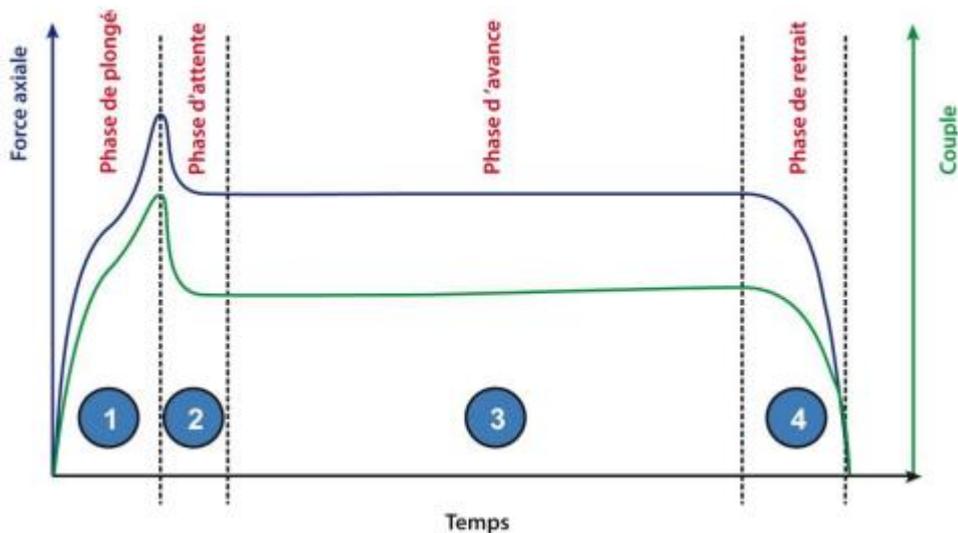


Figure II.5. Les variations de la force axiale et du couple appliqué sur l'outil au cours de ces phases en fonction de temps [23].

II.9. La formation de cordon de soudure

Nombreux sont les travaux de recherche qui se sont penchés sur la formation du cordon de soudure. Les actions mécaniques mises en jeu vont amener la matière dans un état « plastique » générant un mouvement local complexe de la matière autour du pion. Les efforts et les couples générés ainsi que la formation des défauts sont directement liés au flux de matière.

L'origine du flux de matière provient d'un phénomène d'extrusion de la matière autour du pion. La matière chauffée, ayant atteint un état viscoplastique, est mis en mouvement par la cinématique de l'outil. Elle se retrouve alors confinée entre l'épaulement, l'enclume, l'outil et le matériau de base, le flux de matière est alors confiné dans un volume restreint. L'ensemble forme une « matrice mobile » dans laquelle la matière est extrudée.

A partir de l'étude de macrographies, le flux de matière se décompose en trois zones. Leurs interprétations sont principalement basées sur l'analyse cinématique de l'outil et son action sur la matière. Une première zone (I) située juste sous l'épaulement [25]. Ce mouvement de matière résulte du frottement de l'épaulement sur la surface des pièces. Cette zone est généralement nommée « flow arm zone ». Une deuxième zone (II) défini comme étant un flux de matière essentiellement lié à la cinématique du pion [25], cette zone est la « zone d'extrusion ». Dans cette zone, à l'avant du pion, la matière est entraînée du côté recul vers le côté avance de la soudure [26]. La troisième zone (III) est celle où le flux de matière résulte de l'action combinée du pion et de l'épaulement. Il faut ajouter à cela un quatrième flux de matière entre le pion et l'enclume [26]. Celui-ci est important car il permet d'assurer une pénétration totale du cordon de soudure.

II.10. Aspects macrographie du joint de soudure FSW

La microstructure des joints soudés par friction malaxage a été découpée selon les régions suivantes :

- Métal de base (MB) : 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 [27].
- 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.

Cependant aucune déformation notable (observable à l'échelle de la microscopie optique notamment) n'a lieu dans cette région. 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 [27].

- **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. L'évolution de la précipitation se traduit dans la ZATM par une dissolution partielle des précipités durcissant et par une précipitation hétérogène des précipités non durcissant. Dans le cas des alliages d'aluminium, les températures atteintes dans cette région s'échelonnent entre 300 °C et 400 °C [27].
- **Zone malaxe :** 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 de l'alliage et des paramètres du procédé [27].

II.10. Dureté à 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 [28].

II.10.1. 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 (figure II.6(a)). Elle présente le profil de dureté de deux joints soudés dans les mêmes conditions d'un alliage AA5454 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 [28].

II.10.2. Durcissement par précipitation

Les soudures par FSW de matériaux à durcissement structural présentent un profil caractéristique en « W » (figure II.6(b)). Dans le noyau, il est admise que le cycle thermique remet en solution toute la précipitation durcissant, une fraction de celle-ci précipite 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.

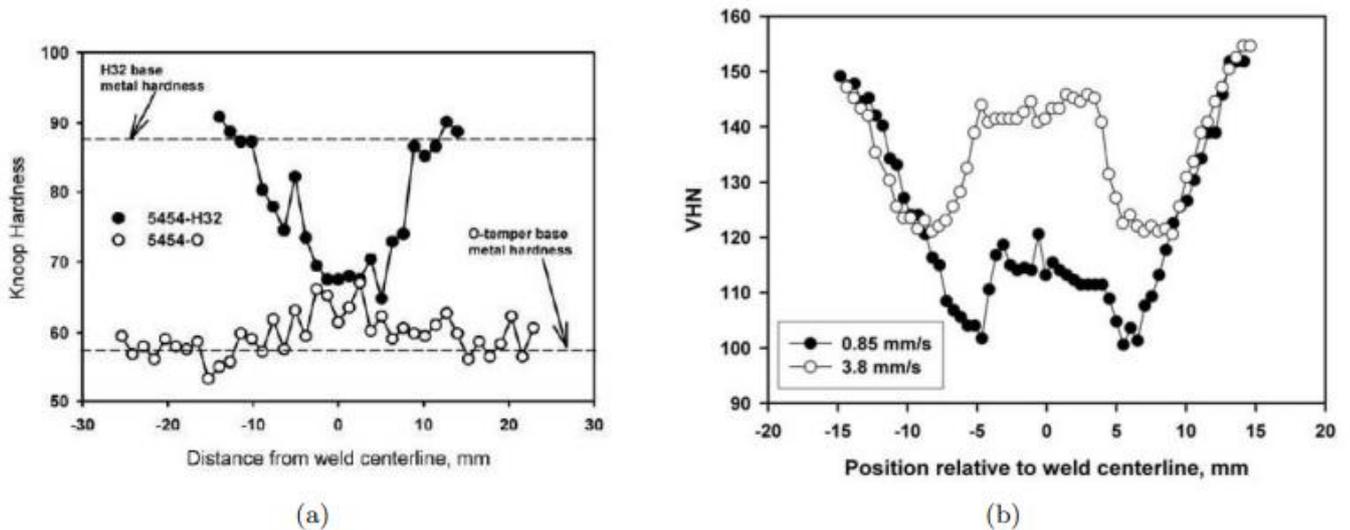


Figure II.6 (a) Profils de dureté d'un joint soudé par FSW d'un alliage AA5454 soit dans un état écroui (symbole H) soit dans un état recuit (symbole O). (b) Profil de dureté d'un joint soudé par FSW à deux vitesses de soudage différentes pour un AA7050-T74 [29].

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 AA2024-T3 [29]. 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.

II.11. Les paramètres de soudage

La qualité du joint de soudage par friction-malaxage est liée à l'apport chaleur et le taux de déformation du joint. Plusieurs paramètres affectent la quantité de la chaleur générée et le taux de déformation dans le joint : la vitesse de rotation de l'outil (tr/min), la vitesse d'avance de l'outil (mm/min) le long de la ligne du joint, l'angle d'inclinaison de l'outil et l'effort de plongée de l'outil dans la matière à souder [30]. En contrôlant ces paramètres, on contrôle la microstructure et la dureté d'un joint FSW. Les propriétés mécaniques (résistance en traction et en fatigue) sont grandement affectées par la microstructure, la dureté et le fini de surface du joint, et donc les propriétés mécaniques (résistance en traction et en fatigue) du joint soudé par le biais du cycle thermomécanique qu'il engendre. Leurs valeurs optimales varient selon l'outil à utiliser et la nature des matériaux soudés des épaisseurs soudées ainsi que de la configuration de soudage (bout à bout, par recouvrement, etc.) [31].

II.11.1. Vitesses de rotation et d'avance

C'est la vitesse de rotation de l'outil de soudage et la vitesse d'avance est la vitesse de déplacement de l'outil dans la plaque à soudé, la combinaison deux vitesses assurer le malaxage de matériaux. De même pour la génération de la quantité de chaleur entrante. Il est dépendent de la nature de l'alliage à assembler et des dimensions des plaques. la vitesse d'avance et la vitesse de rotation de l'outil sont des paramètres très importants, qui influencent la qualité des joints FSW. L'augmentation de la vitesse de rotation fait croître le coefficient de frottement entre l'outil et matière soudée, donc augmentation de la quantité de chaleur générée. La réduction de la vitesse de rotation réduit le coefficient de frottement, diminue la quantité de chaleur générée et la quantité du métal remué[30].

Une vitesse de rotation optimale mène à une microstructure plus fine et une dureté plus élevée comme le montre la figure

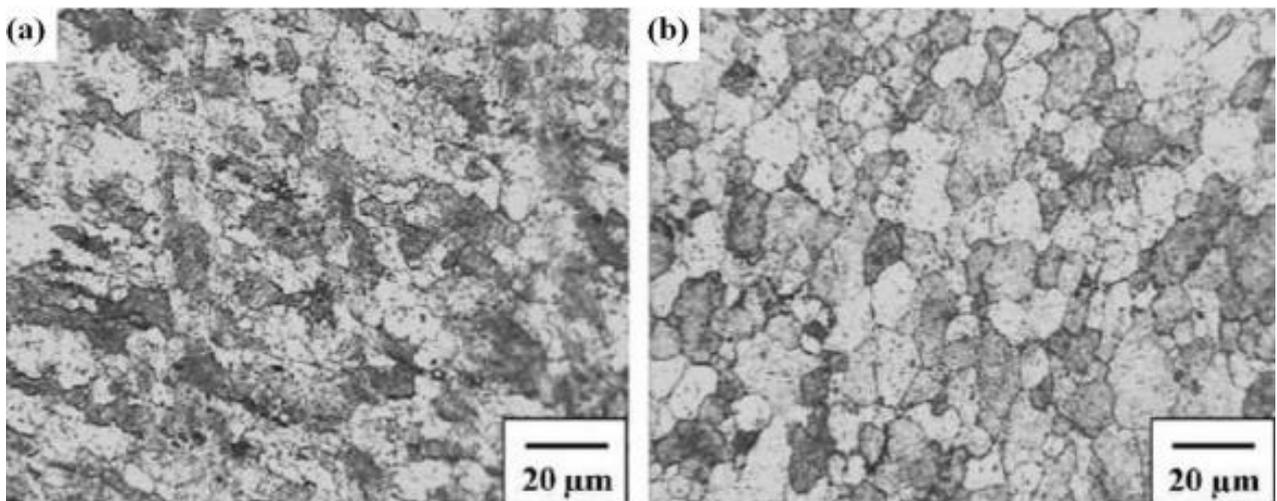


Figure II.7. Effet de la vitesse de rotation et la vitesse d'avance de l'outil sur la taille des grains pour AA7075-T651: (a) 350 rpm, 152 mm/min (b) 400 rpm, 102 mm/min [30]

Le choix de vitesse d'avance est généralement lié directement à la vitesse de rotation. La vitesse de soudage influe sur les caractéristiques mécaniques des joints obtenus par soudage par friction malaxage. La formation de défauts et des discontinuités sont commandés par la vitesse d'avance. Plusieurs chercheurs ont étudié l'effet de la vitesse de soudage sur les caractéristiques mécaniques des joints obtenus par soudage par friction malaxage. L'augmentation excessive de vitesse de soudage risque d'induire des défauts internes de type macropores et des défauts sous forme de tunnel.

II.11.2. Force verticale exercée par l'outil

Pour effectuer un joint soudé, il est nécessaire d'appliquer une force verticale sur l'outil pour maintenir le contact entre l'outil et les pièces à souder ce qui permet d'assurer l'apport d'énergie par frottement et de contenir le matériau malaxé, il est suivi soit par le pilotage de la position verticale de l'outil, soit par le contrôle de l'effort vertical appliqué sur l'outil au cours de la phase de soudage. Dans le cas où l'outil est piloté en position, la force est une résultante elle augmente avec la vitesse d'avance et diminue avec la vitesse de rotation [32].

Lorsque la force axiale augmente, la déformation plastique équivalente augmente dans le noyau, et que la résistance à la traction augmente si la vitesse d'avance, la vitesse de rotation et la force sont élevées. D'un côté, Une force trop faible peut engendrer un manque de compacité de la soudure (film d'oxydes mal broyés, porosités). D'un autre côté, une force trop grande crée des bavures le long du joint de soudure.

II.11.3. Angle d'inclinaison de l'outil

L'orientation de l'outil par rapport à un repère fixe lié au plan de joint des pièces à souder est définie par un angle d'inclinaison θ appelé aussi angle de soudage orienté dans la direction de soudage (Figure II.8.), cette orientation est définie dans le plan du joint. L'angle d'inclinaison (tilt) joue un rôle principal dans le procédé.

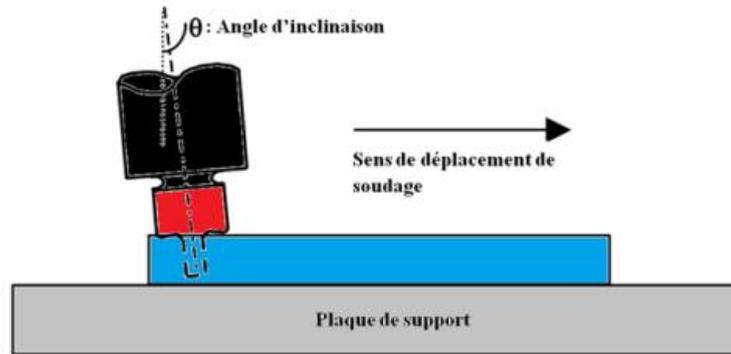


Figure II.8. L'angle d'inclinaison de l'outil

L'angle d'inclinaison de l'outil le plus couramment utilisé est compris entre 1° et 5° , elle est nécessaire pour maintenir une quantité de métal suffisante dans la cavité de l'épaulement et pour permettre à l'arrière de l'outil de maintenir la compression nécessaire pour assurer la consolidation du joint.

II.12. Les défauts dans les soudures FSW

Etant donné la particularité de la formation du cordon de soudure FSW, des défauts spécifiques au procédé vont être identifiés. Elle relève des interactions entre les propriétés du matériau, la géométrie du pion et les paramètres opératoires [21]. Arbegast a étudié la formation des défauts à travers l'étude du flux de matière [21, 26]. D'après lui, les défauts rencontrés en FSW peuvent être classés en deux catégories : les défauts dits « géométriques » et les défauts induits par le flux de matière [26]. Nous allons utiliser cette classification

Ils sont apparentés à un mauvais malaxage ou à des conditions opératoires thermiquement inadaptées, c'est à dire trop chaudes ou trop froides [26].

Bavures excessives (« Ribbon flash ») au niveau du bord de la soudure. Ce défaut est un excès de métal le long du cordon de soudure. Il provient d'un flux de matière trop important sous l'épaulement entraînant l'expulsion de la matière sur les bords du cordon [26]. Ce défaut à une température trop élevée du matériau due à la pénétration excessive d'outil.

On peut observer plusieurs types des défauts tel que :

- Défaut en surface comme la formation d'érailures ou écailles laissées par le passage de l'épaulement (présentées à la Figure II.9) [33].

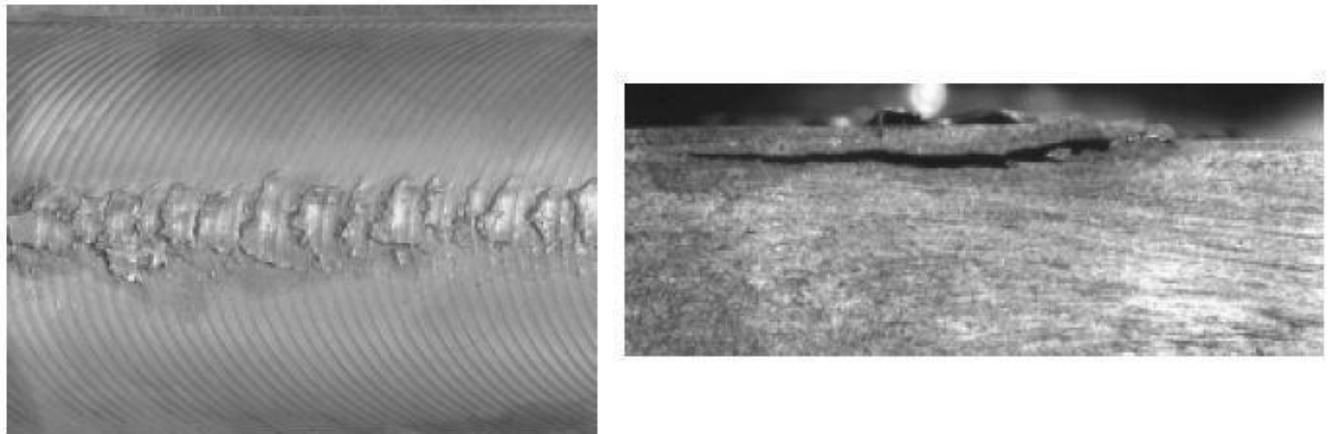


Figure II.9. Présence de défauts de surface de type érailures [26].

- Effondrement du noyau. Il est dû à un flux de matière excessif sous l'épaulement. Ainsi, un surplus de matière se retrouve au sein du noyau dont une macrographie est présentée à la Figure II.10

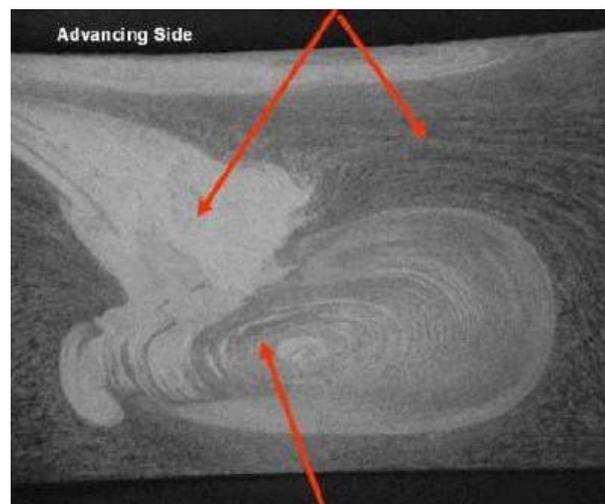


Figure II.10. Effondrement du noyau [26].

- Ces défauts surviennent lorsque les conditions opératoires sont « trop chaudes » ce qui implique un flux de matière trop important. des conditions opératoires « trop chaudes » induisent un abaissement important des propriétés mécaniques dans les zones affectées thermiquement et thermo mécaniquement [26].

- Défaut à la racine du cordon (« root flow ») situé sur la surface des pièces apparaissant lorsque l'outil pénètre trop au sein des pièces [26].

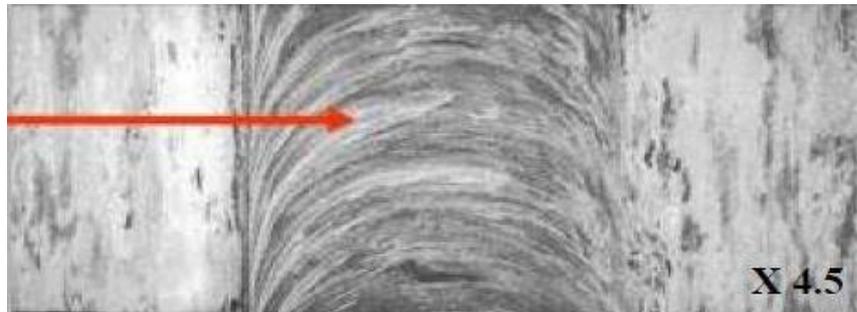


Figure II.11. Défaut à la racine du cordon [26].

- Rainure à la surface du cordon de soudure. Elle est due au manque de consolidation de la matière, voir Figure II.12. ce défaut est généré du côté avance lorsque la profondeur de pénétration est trop faible [53]. Il peut être résorbé en appliquant un effort de forgeage plus élevé [47].

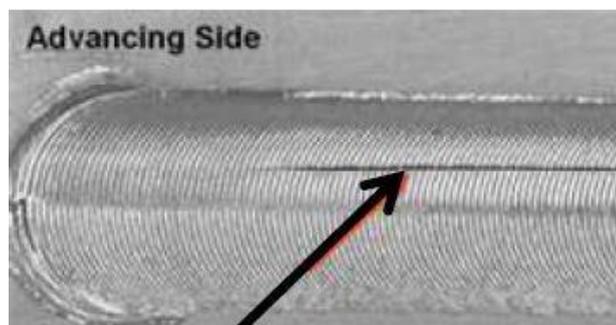


Figure II.12. Manque de consolidation de la matière en surface [26].

- Défaut tunnel interne présenté sur la Figure II.13. C'est un défaut caractéristique du FSW. Il est généralement situé du côté avance du cordon de soudure. Ce défaut provient d'un manque de consolidation de la matière malaxée à l'arrière du joint dû à un flux de matière insuffisant

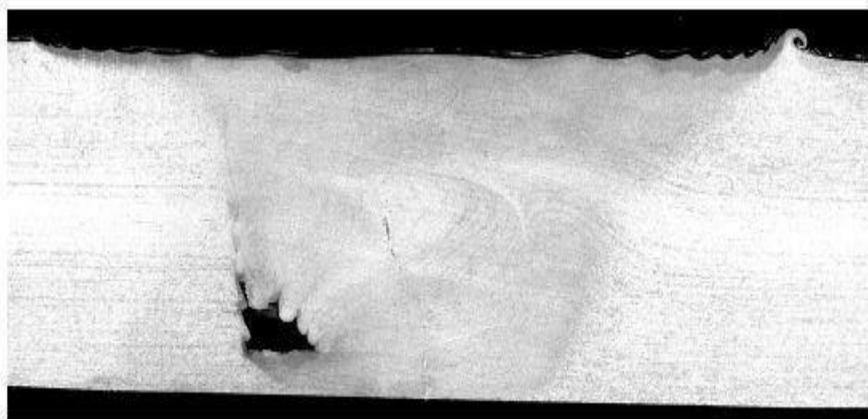


Figure II.13. Soudure comportant un défaut tunnel interne [26].

Le défaut tunnel et la rainure en surface surviennent lorsque les conditions opératoires sont trop « froides » [47] impliquant un malaxage insuffisant de la matière. Défaut tunnels internes peuvent également survenir lorsque la mise en position des pièces, en soudure bout à bout, comporte du jeu ou lorsque le bridage est insuffisant et permet une mobilité de ces dernières.56

- La pénétration partielle (Figure II.14) lorsque les deux pièces ne sont pas soudées sur toute l'épaisseur.

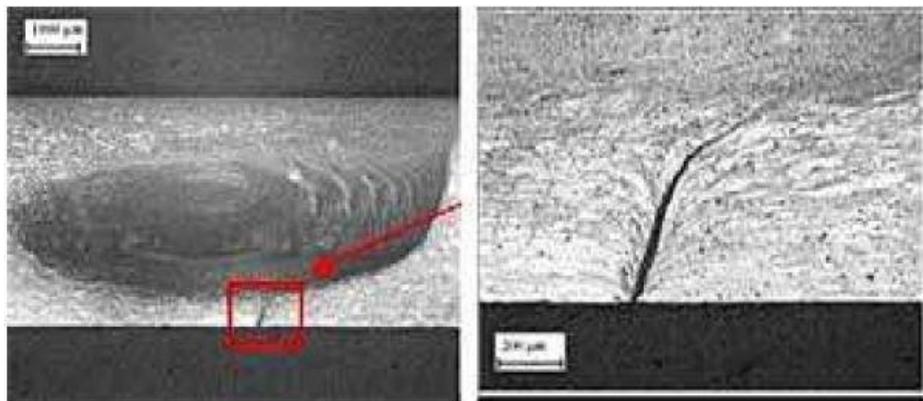


Figure II.14. Soudure comportant un défaut de pénétration

- Inclusion dans la ligne de joint, présenté sur la Figure II.15. La couche superficielle d'alumine n'étant pas suffisamment broyée, elle est emprisonnée dans le cordon de soudure sous la forme d'un film discontinu.

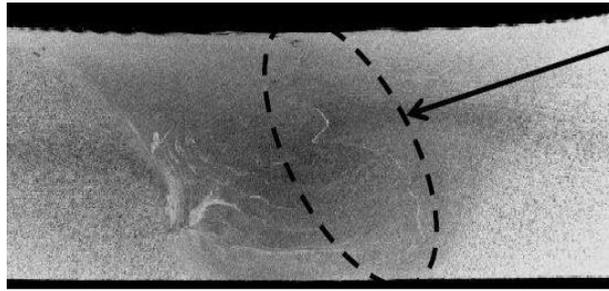


Figure II.15. Soudure contenant un film d'oxyde [26].

II.13. Relation entre les défauts et les paramètres de soudage

La formation de défauts dus à des conditions opératoires non appropriées, c.à.d. « trop chaudes » ou « trop froides », la températures idéales comprises entre 0.7 et 0.8 fois la température de fusion. En dessous ou au-dessus de ces limites les cordons n'étaient pas de qualité satisfaisante.

Des conditions opératoires « trop froides » lorsque la fréquence de rotation est faible et la vitesse d'avance élevée. L'apport d'énergie est alors insuffisant et les défauts apparaissant sont : le défaut tunnel et un défaut de consolidation.

Des conditions opératoires « trop chaudes » lorsque la fréquence de rotation est élevée et la vitesse d'avance faible. L'apport d'énergie est alors important et les défauts apparaissant sont : le flash excessif, l'enfoncement de l'outil, l'effondrement du noyau, les éraillures ou une rainure en surfaces, etc.

II.14. Conclusion

Le soudage par friction est un procédé de soudage multiple et innovateur qui a de nombreuses applications dans différentes branches de l'industrie. Les avantages de ce procédé sont que des assemblages de très haute qualité peuvent être réalisés, que ce procédé est beaucoup plus rapide que les procédés conventionnels et qu'il peut être complètement automatisé de sorte qu'une qualité constante est garantie. De plus, ce procédé de soudage présente d'importants avantages en matière écologique: il n'y a aucune émission de fumées, rayonnements électromagnétiques. Aucun métal d'apport ou gaz de protection ne sont utilisés. Dans la suite de notre travail, nous avons focalisé notre intérêt sur le procédé de soudure par friction-malaxage (FSW).

CHAPITRE III. TECHNIQUES EXPERIMENTALES

Chapitre III : TECHNIQUES EXPERIMENTALES

III.1. Introduction

Ce chapitre présente les conditions expérimentales dans lesquelles les expériences seront réalisées. Les essais expérimentaux sont réalisés aux laboratoires accrédités du centre de recherche CRTI où on a effectué notre stage.

On a commencé par une présentation des compositions chimiques des matériaux utilisés dans notre étude ainsi que les métaux d'apport utilisés pour assemblage. Dans une seconde partie, nous présentons les différentes techniques expérimentales qui sont utilisées pour les tests mécaniques, la caractérisation magnétique et métallurgique des soudures hétérogènes élaborées par procédé friction stir welding «FSW».

III.2. Les matériaux utilisés

Notre choix du matériau a été porté sur un alliage d'aluminium 7075 T6, qui est fréquemment utilisé dans la construction aéronautique.



Figure III.1. Plaque brute d'aluminium 7075 T6

Cet alliage d'aluminium industriel 7075-T6 est notamment utilisé en tant que tôles fortes pour les voilures d'avions et le fuselage. Cet alliage comporte les éléments Zn, Mg et Cu comme principaux éléments d'addition qui sont apportés les caractéristiques mécaniques supérieures de cet alliage.

Le matériau nous a été remis, par le service de maintenance d'air Algérie sous forme de tôle (400*250 mm) et d'épaisseur = 3mm.

Alliage	Zn	Mg	Cu	Fe	Cr	Ti	Mn	Si	V	Autre	Al
7075T6	5.63	2.50	1.53	0.22	0.19	0.04	0.03	0.01	0.01	0.03	89.81

Tableau III.1. Composition chimique du matériau de base (en pourcentage massique)

Al.	P (g/cm ³)	T Fusion	E (MPa)	E (GPa)	ν	C.thermique (W/M°C)	Re0.2 (MPa)	Rm (MPa)	Allongement (%)
7075	2,80	550°C	72 000	71	0,33	État T6 : 130	390	535	7

Tableau III.2. Caractéristiques du matériau de base (en pourcentage massique)

III.3. Procédure de soudage

III.3.1. Réalisation de l'outil

III.3.1.1. Choix de matériaux

Selon les données bibliographiques, les éléments essentiels de l'outil sont fabriqués en acier de même nuance, le matériau est en général un alliage à température de fusion modérée ($T_{fusion} < 1000^{\circ}C$). Dans notre cas, l'outil servira au soudage des alliages d'aluminium dont les températures de fusion (T_{fusion} avoisinent $640^{\circ}C - 660^{\circ}C$).

L'outil est constitué d'acier Z200C12 selon la Norme française (AFNOR), Acier à outil pour travail à froid non allié avec une grande résistance à l'usure et une remarquable capacité de coupe (pour les feuilles de tôle jusqu'à 4 mm d'épaisseur). Haute acceptation de trempe, faible variation dimensionnelle des pièces, ténacité moyenne. Cette nuance est un grand classique parmi les aciers au chrome lédéburitiques à 12 %.

- **Composition chimique**

Elément	C	Si	Mn	P	S	Cr	W
%max	1,9 - 2,2	0,1 - 0,6	0,2 - 0,6	0 - 0,03	0 - 0,03	11,0 - 13,0	≤ 0,8

Tableau III.3. Composition chimique de l'alliage Z200C12

- **Caractéristiques mécaniques moyennes**

Dureté	$R_e(N/mm^2)$
62 HRC	850

Tableau III.4. Caractéristiques mécaniques moyennes de l'alliage Z200C12

- **Application**
 - Outils de découpage, emboutissage
 - outils de frittage
 - Outils d'usinage
 - Instruments de mesure



Figure III.2. l'alliage Z200C12 à l'Etat brut

III.3.1.3. Conception par solidworks

La conception assistée par ordinateur (CAO) comprend l'ensemble des Logiciels et des techniques de modélisation géométrique permettant de concevoir, et de tester virtuellement des produits. La CAO permet de concevoir des systèmes dont la complexité dépasse la capacité de l'être humain, et d'apprécier globalement le comportement de l'objet créé avant même que celui-ci n'existe. En CAO, on ne dessine pas, on construit virtuellement un objet capable de réagir dans son espace réel selon des lois régies par le logiciel. Le résultat, appelé maquette numérique qui constitue un véritable prototype évolutif. Durant notre conception nous avons utilisé le logiciel de conception appelé (SolidWorks). En premier lieu nous avons utilisé les commandes du logiciel SolidWorks tel que : Esquisses, fonctions pour concevoir les différentes pièces de l'outil.

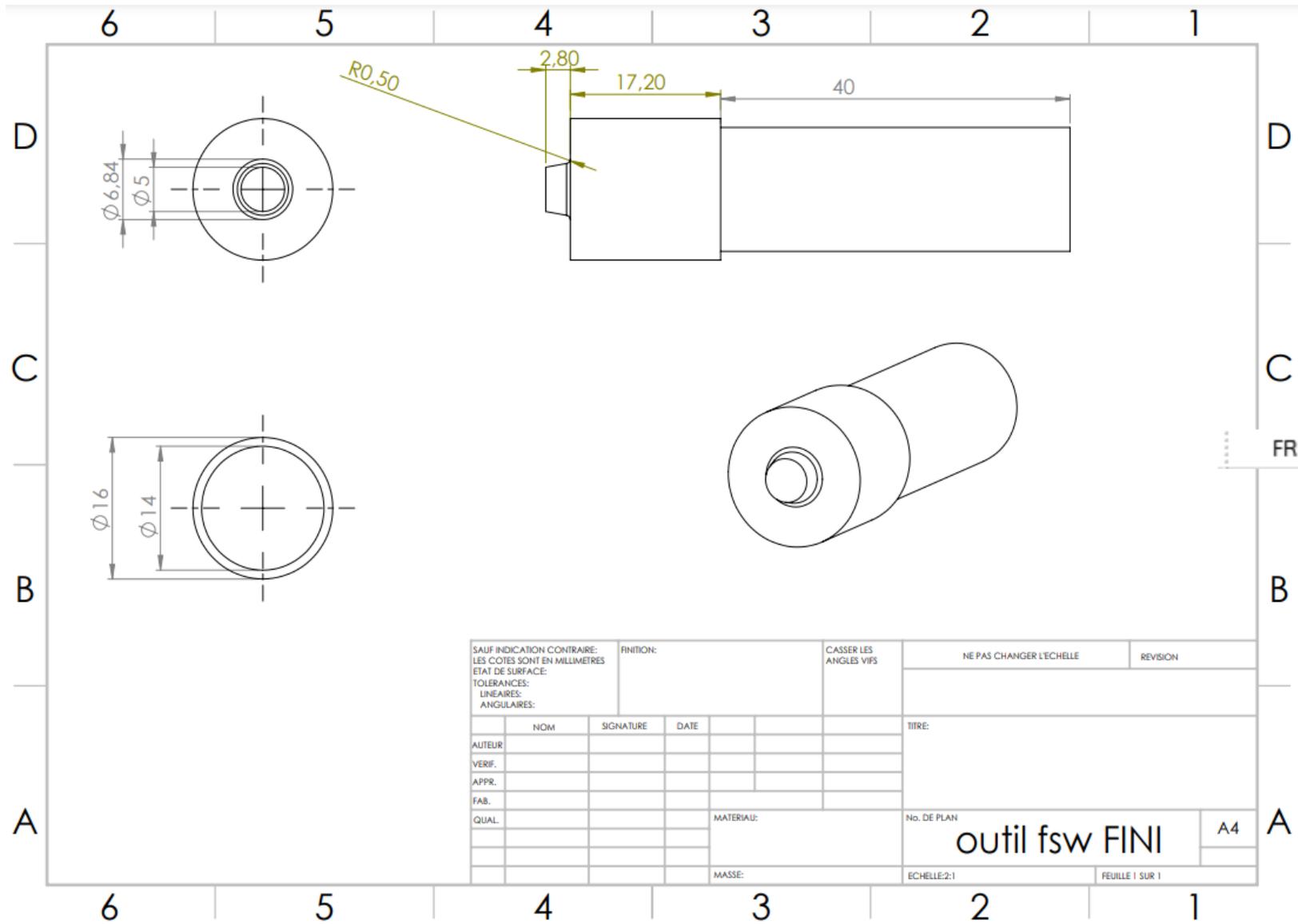


Figure III.3. Conception d'outil FSW

III.3.1.7. Usinage

L'opération de l'usinage de l'outil a été faite par une machine de tour au niveau de l'atelier de fabrication de département de Génie Mécanique à l'Ecole Nationale Polytechnique.



Figure III.4. L'outil de soudage après l'usinage

III.3.1.8. Traitement de l'outil

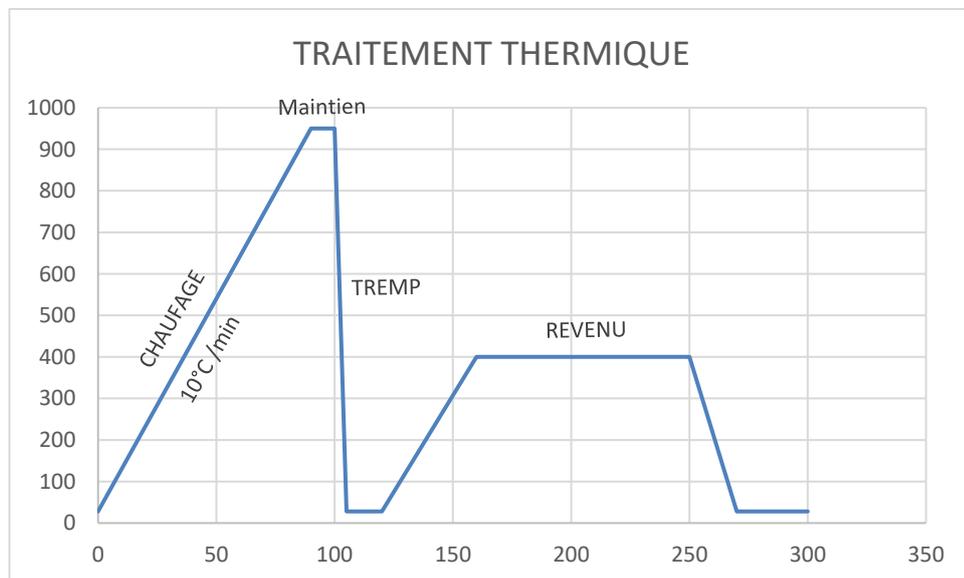


Figure III.5. Traitement thermique de l'outil.

La dureté mesurée avant le traitement thermique est 350HV (35.5HRC), il atteint une valeur de 582Hv (54 HRC) après traitement

III.3.2. Préparation des tôles

Avant de passer au soudage, il faut passer par l'étape de préparation présente sous forme des tôles rectangles avec les dimensions suivantes (15*10*3mm) à l'aide de la cisaille (guillotine) (disponible au niveau de l'atelier du département de mécanique).



Figure III.6. Découpage de la tôle

III.3.3. Soudage

L'opération du soudage par friction malaxage (FSW) a été faite au niveau de l'atelier de fabrication de département mécanique à l'école nationale polytechnique.

La figure 3.3 représente la machine-outil utilisée pour le soudage. Il s'agit d'une fraiseuse verticale 1m gambin. Elle est équipée d'une broche porte-fraise verticale et inclinable. Elle est employée soit pour le surfacage, soit pour l'exécution de rainures et de contours droits ou circulaires.



Figure III.7. La fraiseuse utilisée au niveau de l'atelier

L'outil placé dans une fraiseuse verticale (Figure III-7) est présenté par les caractéristiques sur le tableau suivant :

	1		2	
	II	I	II	I
A	25	100	180	710
C	40	160	280	1.120
B	63	250	450	1.800

	1	II	III
A	10	40	160
C	16	63	250
B	25	100	400

Figure III.8 Paramètres de la machine

de fraisage (a) vitesse de rotation (b) vitesse d'avance .

III.3.1. Les étapes

1. En plaçant l'outil, la tête de la fraiseuse a été inclinée de 2°
2. Positionner les tôles de telle façon que le bord à souder soit bien parallèle à l'avance dupion pendant le soudage,
3. Vérifier la planéité des tôles,
4. Fixer les deux tôles sur la table de la machine à l'aide d'un système de bridage.



Figure III.9 soudage des 3 échantillons

III.4. Métallographie optique

III.4.1. Préparation des échantillons

III.4.1.1. Découpage des échantillons

Pour les besoins de la caractérisation, nous avons prélevé plusieurs éprouvettes à partir de chaque plaquette soudée. Pour cela, nous avons utilisé une tronçonneuse du modèle (StruersDiscotom).



Figure III.10. Tronçonneuse utilisée pour découpage

III.4.1.1. Enrobage

L'enrobage des échantillons sert essentiellement à faciliter la manipulation des pièces dont la forme ou le volume risquent de compliquer les étapes ultérieures de leur préparation ainsi que leur analyse

Pour notre expérience, un enrobage à froid a été utilisé. Ce procédé ne nécessite ni pression ni chaleur externe et est dès lors recommandé pour l'enrobage des échantillons sensibles à ces facteurs. Il consiste à enrober un échantillon de la matière dans une résine époxy avec le durcisseur 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.11. Les échantillons après l'enrobage

III.4.1.2. Polissage

Après l'enrobage, nous passons les éprouvettes sur une surfaceuse à disque abrasif (polisseuse). C'est une opération mécanique qui permet d'avoir des états de surface semblable à celui d'un miroir. Ce polissage s'effectue en plusieurs étapes avec des disques en papiers abrasifs de différentes granulométries des grains abrasif en carbure de silicium (du plus gros au plus fin : (80,180, 220, 320,500, 800, 1000, 1200,2400 et 4000) qui tournent avec des vitesses variables. Cette opération se fait sous aspersion d'eau pour éviter l'échauffement de l'échantillon. Le polissage fin est terminé de finition à répartie sur un feutre fin avec l'addition de l'alumine. Après chaque polissage les échantillons sont nettoyés à l'eau.



Figure III.12. Polisseuse à disque tournant

III.4.2. Attaque chimique

Les examens métallographiques nécessitent au préalable une attaque chimique appropriée à chaque nuance pour améliorer le contraste des phases afin de révéler leurs micro- ou macrostructure et pour mettre en évidence les structures, car elle est directement liée à la différence de vitesse de réaction des constituants

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

L'opération s'est déroulée au niveau du laboratoire du CRTI

III.4.3. Microscopie optique

L'examen métallographique a été effectué au niveau du laboratoire au centre de recherche en technologie industrielle (CRTI). L'appareillage utilisé pour l'acquisition des images est un microscope optique équipé d'une caméra numérique reliée à un micro-ordinateur, équipée d'un logiciel installé pour l'acquisition et le traitement des images (figure III.8). Pour l'observation de l'évolution de la microstructure après chaque réparation dans la zone malaxée (ZM), la zone affectée thermomécaniquement (ZATM), la zone affectée thermiquement (ZAT) et le métal de base (MB), nous avons fait un balayage de ces zones à trois niveaux parallèles équidistants, en commençant par le plus faible grossissement, tel que 100X, suivi progressivement par de plus élevés pour évaluer les caractéristiques de base de la microstructure.

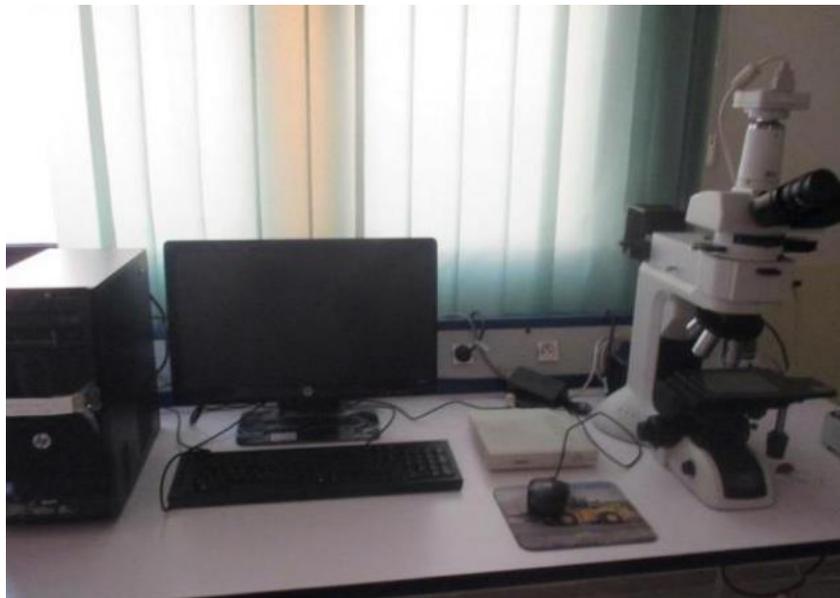


Figure III.13. Microscopie optique

III.5. Caractérisations mécaniques

III.5.1. Essai de dureté Vickers

L'essai de dureté est une technique idéale pour caractériser les cinétiques de durcissement structural car elle est à la fois rapide et peu coûteuse en matériau. Les essais de dureté consistent à imprimer dans la pièce à tester un pénétrateur en forme de pyramide (Vickers) et à mesurer la diagonale d de l'empreinte laissée considérée comme une pyramide droite et on relie cette information à la charge appliquée par la formule :

$$H_V = 0.189 * \frac{F}{d^2}$$

F : Niveau de la charge appliquée.

d : Diamètre de l'empreinte.

Les essais de la dureté sont effectués au centre de recherche en technologie industriel (CRTI) à moyen d'un duromètre semi-automatique avec un pénétrateur Pyramide de diamant, placé entre deux lentilles de microscope. Le duromètre est aussi équipé d'un afficheur des résultats d'essai avec la dureté équivalente (figure III.9). Dans notre étude, nous avons réalisé 03 mesures par échantillon, sur chaque zone (ZAT, ZATM, ZM, MB) avec une charge de 10 Kgf. L'essai consiste à mesurer l'enfoncement rémanent d'un pénétrateur sous forme pyramidale en diamant à base carrée. L'angle entre deux faces opposées est de 136°



Figure III.14. Le Duromètre utilisé

III.5.2. Essai de traction

L'essai de traction est le moyen le plus couramment employé pour caractériser le comportement mécanique d'un matériau sous une sollicitation progressive à vitesse de chargement faible ou modérée. L'essai permet, en outre, l'étude et l'identification des mécanismes physiques de déformation plastique. Cette dernière, gouverne le processus majeur de mise en forme, par ou sans enlèvement de matière, des matériaux dans la plupart des procédés de fabrication utilisés dans l'industrie mécanique.

Les essais de traction ont été effectués au niveau du laboratoire de au centre de recherche en technologie industrielle CRTI. La machine de traction illustrée à la figure III.10 est constituée d'un bâti rigide équipé d'un travers fixe à laquelle est fixée l'une des têtes de l'éprouvette l'autre extrémité de l'éprouvette est fixée à une traverse mobile. Le mouvement de la traverse mobile est assuré par une commande hydraulique. La forme et Les dimensions d'éprouvette sont présentées dans la figure III.13

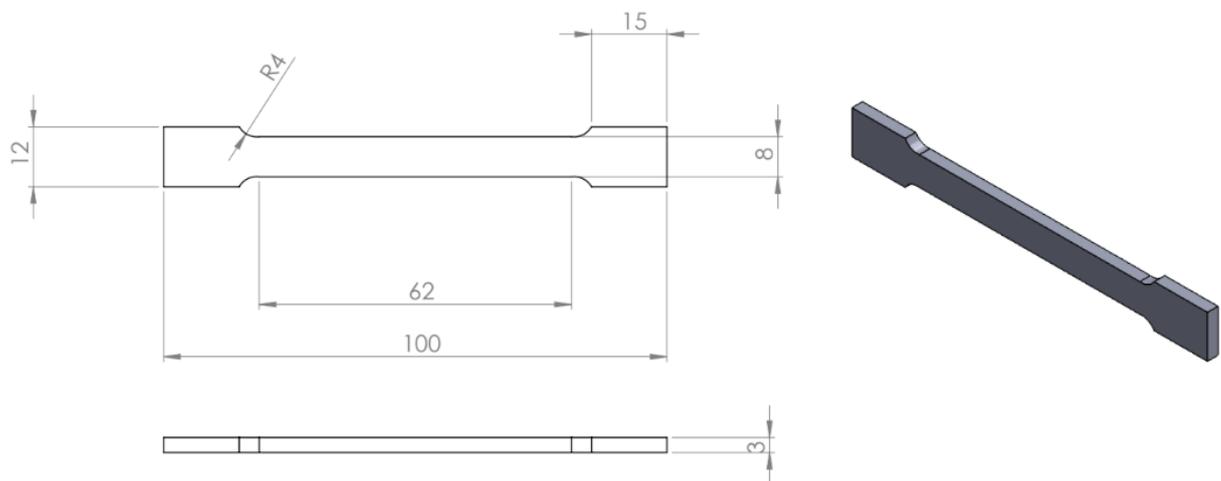


Figure III.15. Conception des éprouvettes de traction selon la norme

III.5.3. Corrélation d'image numérique

Parmi les techniques de mesure de déplacements ou de déformations actuelles, celles basées sur l'analyse d'images numériques font partie des plus intéressantes et aussi des plus faciles à mettre en œuvre. Cette technique nécessite une camera CCD, ou même d'un appareil photographique numérique, reliée à un ordinateur afin de pouvoir acquérir et traiter les prises de vues réalisées.

III.5.3.1. Mode opératoire pour l'obtention du mouchetis

Les essais sont réalisés sur les éprouvettes de traction

L'obtention du mouchetis nécessite plusieurs outils, citons donc

- Les outils de protection (masque, tablier et gants) ;
- Papiers à verre 60 et 120 ;
- Un décapant ;
- Du papier absorbant servant à essuyer le décapant ;
- Peintures à aérosol (blanc mate, noire mate)

Figure III.16. Les outils utilisés pour l'obtention de mouchetis



Les éprouvettes doivent être recouvertes d'un mouchetis afin de permettre un suivi par CIN. Ce mouchetis est effectué manuellement à l'aide de peintures blanches et noires mates.

Pour la réalisation de ce mouchetis nous avons procédé de la manière suivante :

Préparer la surface des éprouvettes par polissage dans un premier temps afin d'enlever toutes les peintures, graisses, corrosion ainsi que toutes rugosités et rainures générées lors de la découpe à jet d'eau pour éliminer tous risques d'initiation et propagation de fissures, qui pourraient fausser les résultats.

- ✓ Un spray de décapant est ensuite nécessaire pour enlever la poussière du polissage et les impuretés pour une meilleure adhérence de la peinture.
- ✓ Une fois l'éprouvette asséchée, une peinture blanche mate très légère est appliquée sur la surface qui nous intéresse pour la corrélation d'images numériques.

- ✓ Une fois l'éprouvette séchée à l'air libre, on disposera notre éprouvette sur des feuilles blanches en masquant les mors comme montré sur la figure
- ✓ Ainsi on arrive à la dernière étape décisive et la plus difficile qui est l'application du mouchetis sur la face blanche initialement préparée.
- ✓ Après avoir bien agité la peinture à aérosol de couleur noire mate, pressez la gâchette de notre bombe aérosol progressivement le plus loin possible de l'éprouvette. Une fois la taille des gouttelettes souhaitée est obtenue et maîtrisant parfaitement la pression d'appui sur la gâchette on ramène progressivement le spray vers notre éprouvette. On maintient la pression jusqu'à l'obtention de la densité désirée (40-60% de noir dans le blanc) et de la distribution de manière la plus homogène possible (figure III.15.).

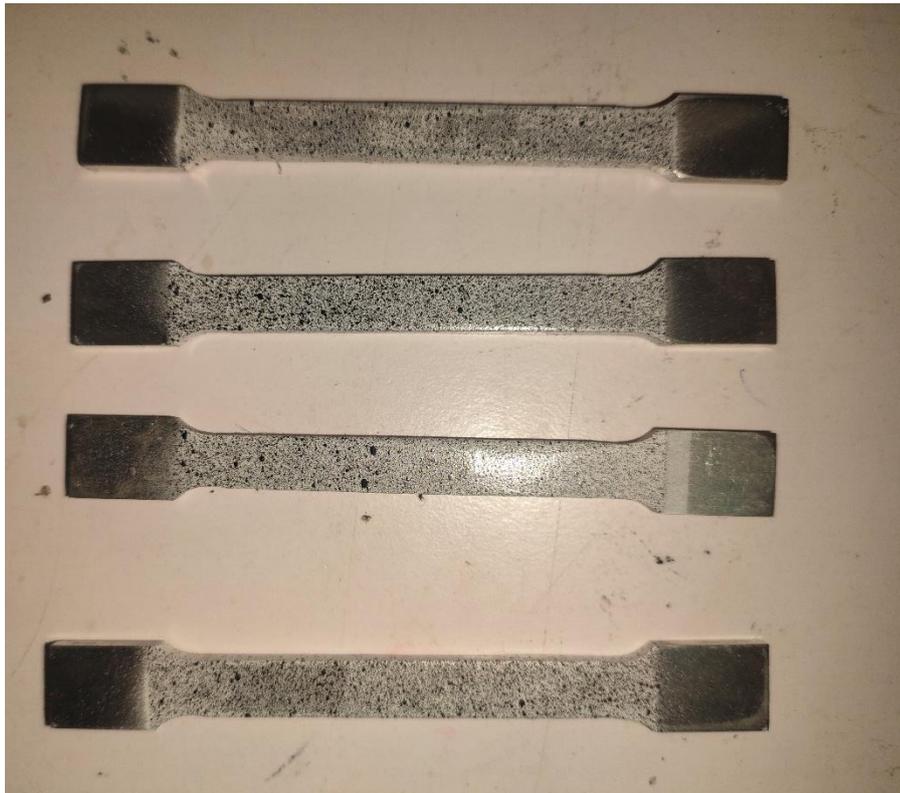


Figure III.17 les éprouvettes après mouchetis

- ✓ Le traitement des données est réalisé par le logiciels de corrélation d'images numériques GOM Corrélat dont la description ainsi que les étapes sont données en annexes A

III.5.4. Essai de résilience

La résilience d'un matériau caractérise sa capacité à absorber un choc sans se rompre ; celle-ci peut être mesurée sur des machines de type Charpy. La résistance au choc Charpy représente l'énergie du choc absorbée par l'éprouvette lors de sa rupture, rapportée à la section initiale de l'éprouvette. Pour réaliser ces essais, des éprouvettes entaillées ont été préparées selon la norme NF A 03-161, avec les dimensions de (55x10x3) mm. Les entailles usinées dans les éprouvettes ont une forme en V de 45° d'ouverture et 2mm de profondeur. Les éprouvettes sont entaillées au niveau de noyau L'essai de résiliences est réalisé à la température ambiante (Figure III.16).

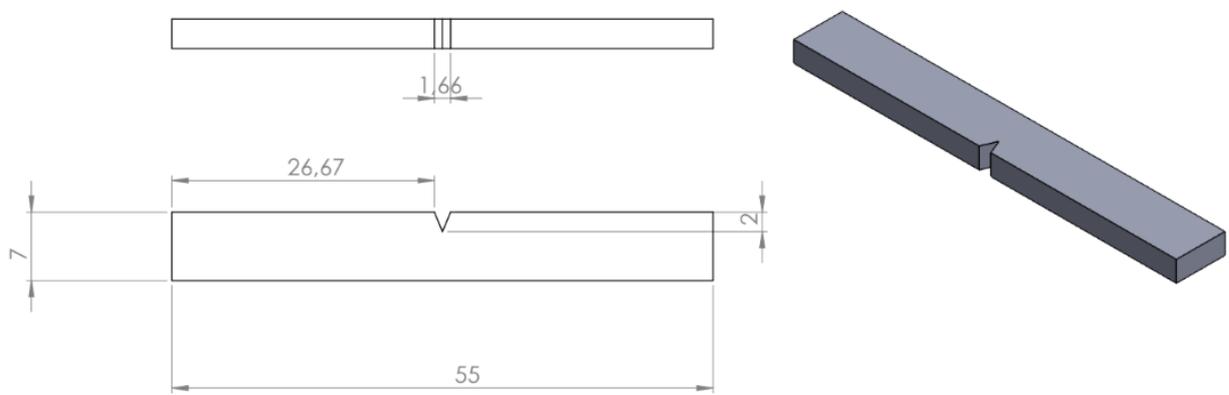


Figure III.18. Conception des éprouvettes de résilience selon la norme

III.6. Conclusion

Dans cette étude nous nous sommes intéressés à la caractérisation du comportement mécanique des matériaux à travers différents tests par l'utilisation des paramètres d'usinage sélectionnés, ce qui a mis en évidence l'importance de maîtriser des paramètres de fonctionnement de la machine utilisée en soudage tels la vitesse de rotation, la vitesse d'avance et la forme d'outil

CHAPITRE IV. RESULTAS ET DISCUSSION

Chapitre IV : RESULTATS ET DISCUSSION

IV.1. Introduction

Dans cette partie de notre travail, on se consacre à la présentation, l'interprétation, la discussion des résultats expérimentaux obtenus dans les différentes expériences des soudures homogène 7075T6

Notre travail s'est déroulé de la manière suivante :

- Microstructure
- Test de dureté
- Essais de résilience
- Test de traction
- Corrélation d'image

Suite à la réalisation de six montages de soudage FSW pour effectuer la caractérisation et les essais de notre étude, ces montages a prennent beaucoup de temps, patience et difficulté et plusieurs essais pour l'adapter à une fraiseuse standard conçue pour usinage des pièces mécaniques dans l'atelier mécanique du ENP.

- D'abord on doit tenir compte des points suivants :
- le rapport entre la dureté de l'outil et la dureté du matériau à souder ;
- Le rapport entre l'épaulement et l'épaisseur des tôles à souder ;
- L'angle d'inclinaison de l'outil ;
- Le mode sécuritaire de fixation des tôles à souder sur la fraise ;

Conformément aux points précédents, les expériences ont été réalisées au niveau de l'atelier mécanique de l'école ENP.

IV.2. Paramètres de soudage FSW

Essai		Vr (tr/min)	Va (mm/min)	Rapport Vr/Va
1	A	1120	63	17.7
	B			
	C			
2	A	1120	100	11.2
	B			
	C			
3	A	1120	160	7
	B			
	C			
4	A	1800	40	45
	B			
	C			
5	A	1800	63	28.6
	B			
	C			
6	A	1800	100	18
	B			
	C			

Tableau IV.1 Les paramètres de soudage choisis

IV.3. Examen macrographique

Les paramètres de soudage FSW ont un grand impact sur l'apport de chaleur fourni au matériau et par conséquent des changements dans la microstructure de celui-ci. Les paramètres les plus importants dans ce procédé est la vitesse d'avance et la vitesse de rotation de l'outil, c'est pour cela les paragraphes qui suivent seront consacrés à l'influence de ces deux paramètres sur métallographie des joints soudés.

L'examen macrographique des échantillons soudés nous permet de voir les différents types de défauts existés dans chaque échantillon, Ainsi de repérer ces défauts par rapport des différentes zones où ils peuvent s'apparaitre.

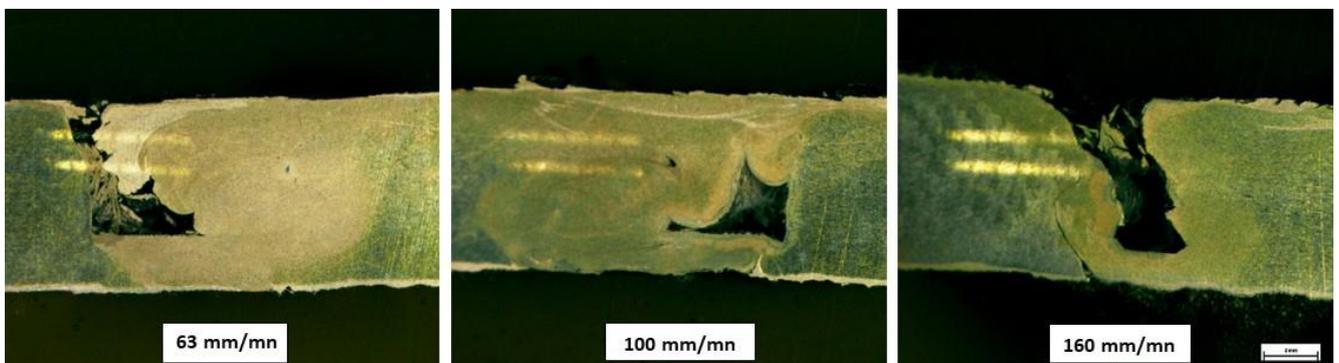


Figure IV.1 Les défauts de la vitesse (1120 tr/min) pour les différentes vitesses d'avance

Dans la vitesse de rotation 1120 tr/min (Figure IV.1), l'examen macrographique de ces trois vitesses d'avance, montre la formation de quelques défauts à l'intérieur de cordon de soudure; pour les 3 essais on observe les défauts tunnel et des cavités, généralement ils sont situés du côté avance du cordon, ces défauts proviennent d'un manque de la matière malaxée due à un flux de matière insuffisant.

L'apport de chaleur est le principal facteur sur le flux de matière lorsque les paramètres opératoires sont trop froids ; ils provoquent un mauvais écoulement de matière ce qui favorise la création de ces défauts.

Aussi si l'apport de chaleur est faible, le malaxage est médiocre ce qui cause la présence des particules d'alumine mal broyées qui ont une forme de ligne de zigzag comme dans l'essai 2 ou une zone complète d'oxyde comme dans l'essai 1 qui correspond la vitesse d'avance du 63 mm/mn.

Dans la vitesse de rotation 1800 tr/min (FigureIV.2)

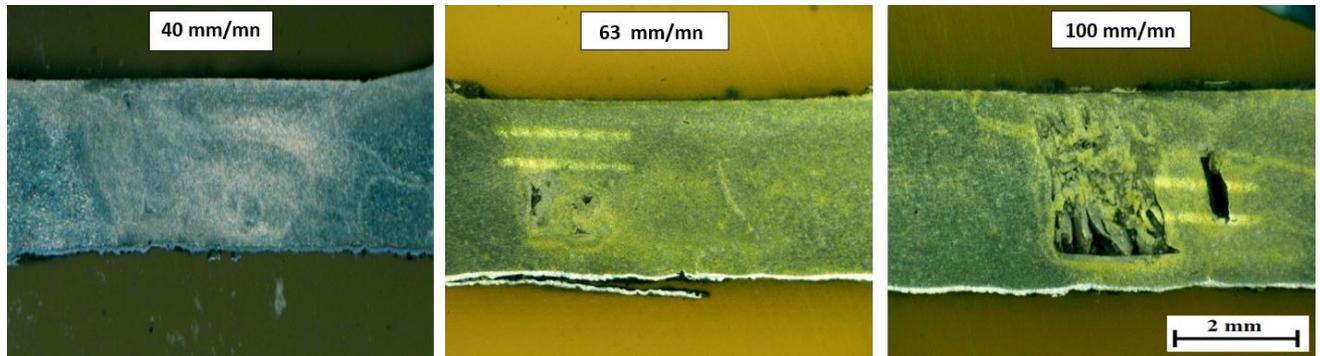


Figure IV.2 Les défauts de la vitesse (1800 tr/min) pour les différentes vitesses d'avance

On remarque que l'essai correspond 160 mm/mn a montré une formation des défauts tunnels et cavités d'un taux très important par rapport à celle des autres vitesses d'avance.

On remarque aussi la diminution significative de taille des cavités au niveau de l'essai 5 qui signifie qu'on est proche de l'apport de chaleur idéal pour éliminer ces défauts. Par contre l'essai 4 ne présente aucun défaut visible.

IV.4. Examen micrographique

L'examen micrographique de métal de base de référence présente une structure granulaire formée principalement par une matrice alpha (solution solide d'aluminium) dans laquelle on trouve la distribution les différents précipités (figure IV.3.a), la figure IV.3.b nous montre des grains écrasés et allongés en sens de laminage.

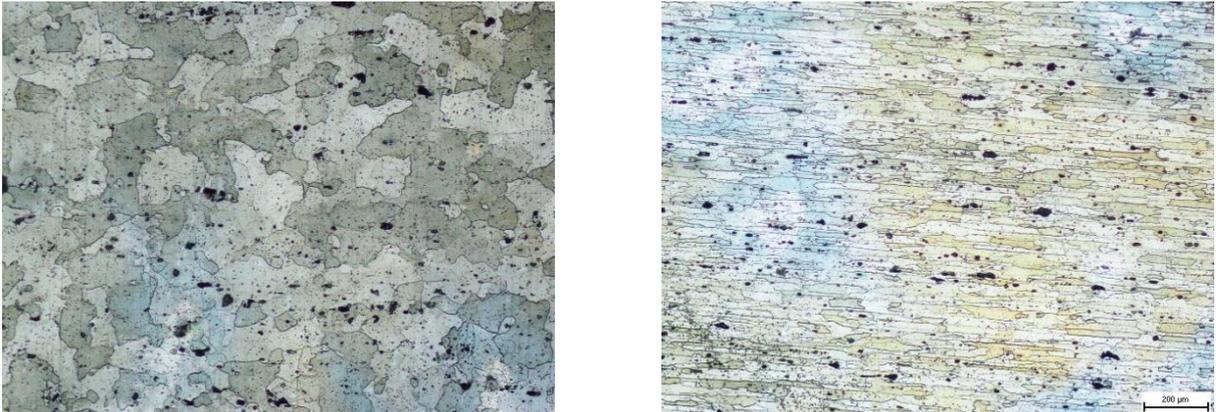


Figure IV.3 La microstructure du matériau de base, (a) sens perpendiculaire, b) le sens de laminage

L'examen micrographique des échantillons soudés nous permet de voir la forme des grains, leurs tailles, leurs distributions dans différentes zones ainsi que les précipitations grossières et les micros défauts existants dans chaque essai.

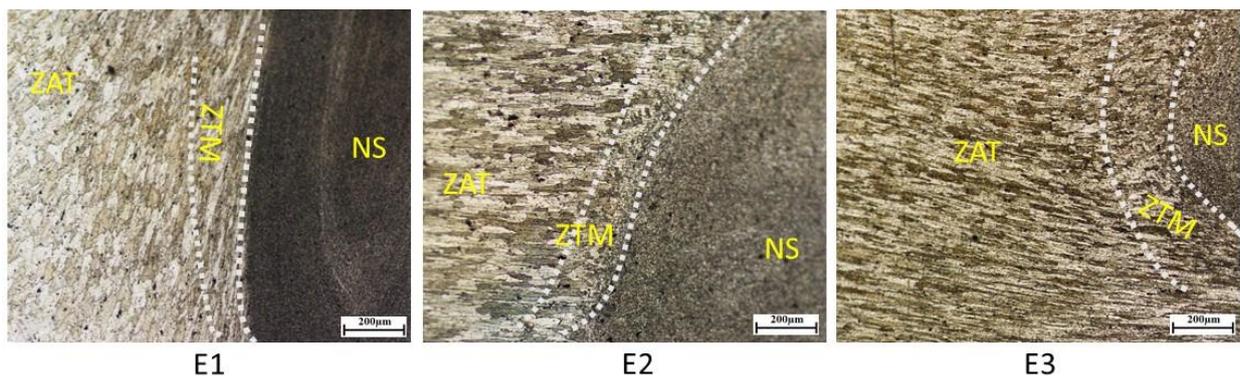


Figure IV.4 La microstructure des soudures FSW (1120 tr/min) pour la vitesse pour les différentes vitesses d'avance

D'après les figures on peut distinguer 3 zones obtenues après soudage qui sont :

Le noyau au centre de la soudure ou la pénétration de pion, elle correspond aux maximums de déformation et des températures jusqu'à 500°C, La taille des noyaux est un peu plus grande que la taille du pion, La microstructure est granulaire très fine et équiaxe.

ZATM se trouvant autour du noyau, est propre au FSW. Elle est à la fois déformée plastiquement et affectée thermiquement mais moins que le noyau. La structure initiale subit une déformation importante due aux rotations de l'outil, les grains sont allongés au sens de rotation ils peuvent atteindre 90°.

ZAT à la fin du cordon de soudure, le métal a subi un cycle thermique, dont la température est d'ordre de 250 °C sans aucune déformation notable. La forme des grains est identique à celle rencontrée dans le métal de base main une taille grossière.

On remarque que lors de l'augmentation de la vitesse d'avance la taille des grains de noyau diminuer, ceci est due à la réduction de l'apport de chaleur sur le noyau qui il va refroidir plus rapidement et limite le taux de recristallisation.

Aussi la réduction de l'apport de chaleur limite le grossissement des grains de la zat, plus la Va est grand plus le grossissement est faible. Par contre l'augmentation de Va augmenter le taux de déformation d'où l'allongement et l'orientation des grains de la ZATM est plus intense.

On observe aussi des micro défauts l'intérieur des noyaux au à leur frontière comme des microfissures, ceci est provient d'un manque de consolidation de matière due à un flux de chaleur insuffisante

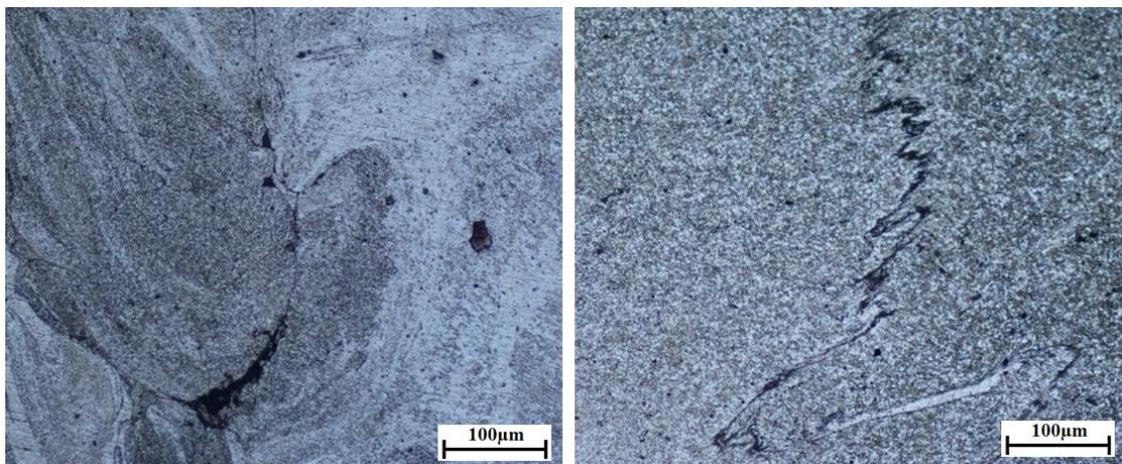


Figure IV.5 Microfissures au sein des échantillons soudés

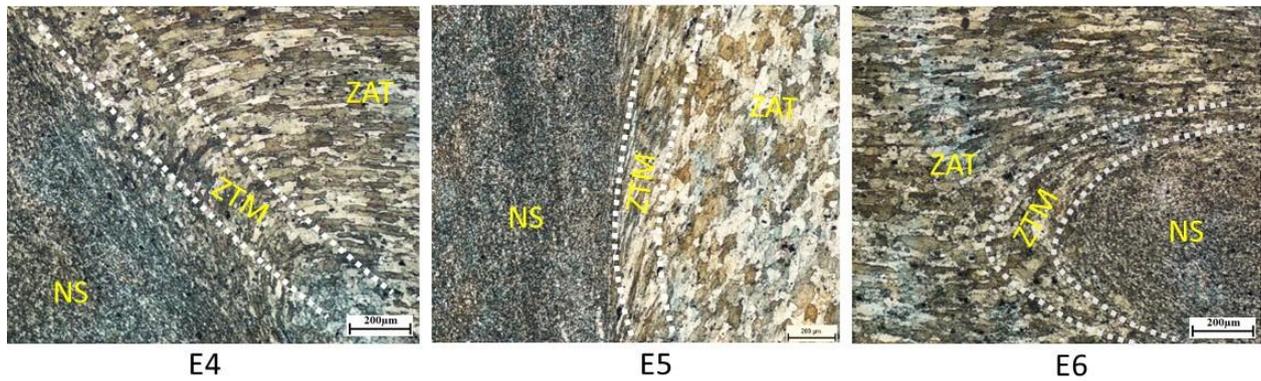


Figure IV.6 La microstructure des soudures FSW (1800 tr/min) pour la vitesse pour les différentes vitesses d'avance

L'apport de chaleur est lié directement à la vitesse de rotation, plus la V_r est grande plus il est grand. Cela traduit par plus des changements structuraux au joint de soudure.

Pour cette vitesse de rotation On observe l'augmentation de taille des grains de noyau avec la réduction de vitesse d'avance à cause de la vitesse de refroidissement lente qui va agrandir le taux de recristallisation la taille de ZATM est croître avec l'augmentation de la vitesse d'avance puisque l'intensité de déformation est plus importante. Pour la ZAT l'apport de chaleur important fait augmenter la taille des grains

On constate que l'apport de chaleur influence directement la microstructure de la soudure, citons la taille des grains, la déformation, le grossissement et la dissolution des précipités, ce qui affecte des propriétés mécaniques du joint soudé.

IV.5. Examen de la dureté

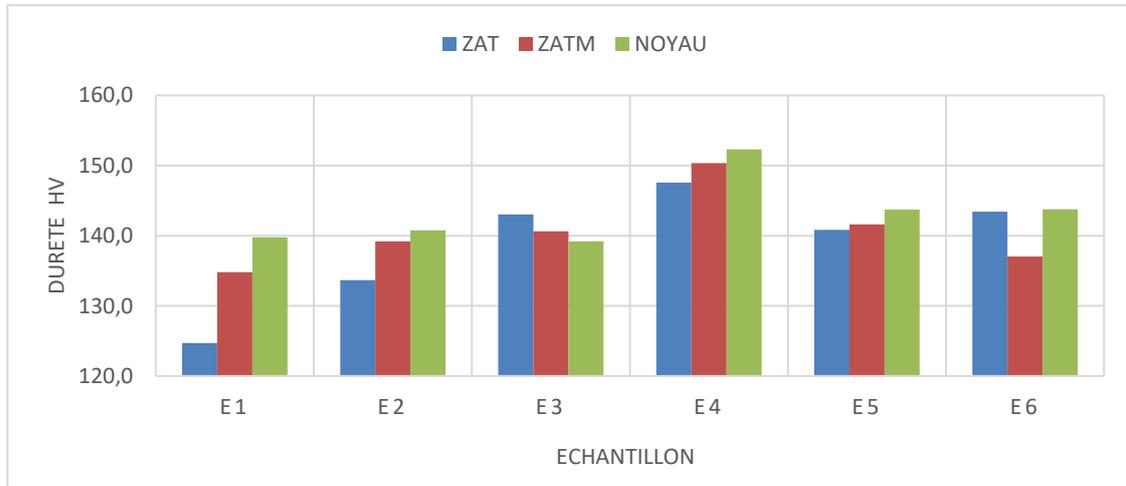


Figure IV.7 Test de dureté des différentes zones des échantillons soudés

La mesure de dureté nous donne une première évaluation des propriétés mécaniques après soudage, nous avons tracé des profils de dureté de chaque zone pour les 6 essais. On remarque que pour l'essai 1245 la valeur de dureté de la zat est inférieure à celle de ZATM et noyau respectivement. Cette résultat est dû aux :

Dans la zat, où la température atteinte lors du soudage est moins élevée, les précipités ne sont pas dissous. Sous l'effet de la chaleur, ils ont plutôt tendance à grossir et à perdre leur cohérence avec la matrice. ce qui réduit La dureté (Figure IV.8).

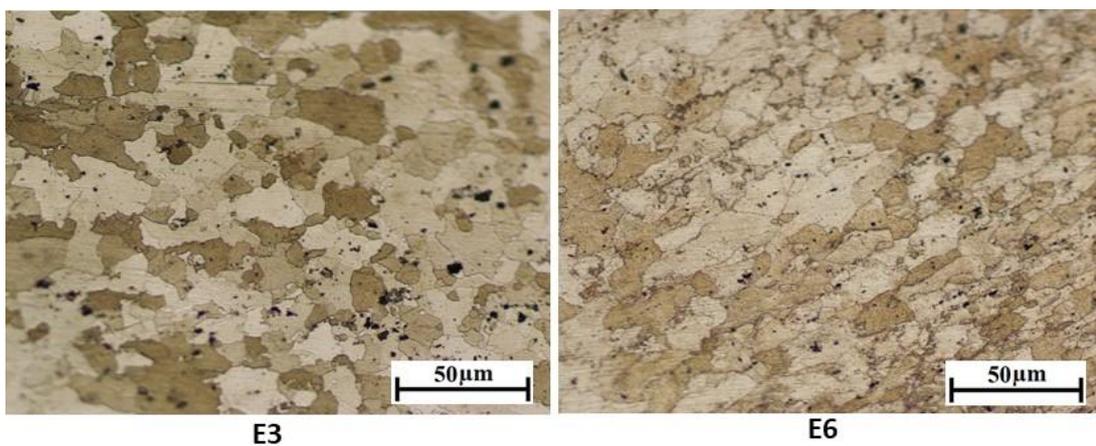


Figure IV.8 La ZAT des deux échantillons E3 et E6

D'ailleurs dans le noyau la combinaison de vitesse de rotation et vitesse d'avance donne la température et la déformation plastique nécessaire pour la naissance des nouveaux grains plus petits et équiaxes ce qui provoque une augmentation de valeur de dureté à celle de zat.

D'autre part, la zatm subit une température est une déformation moins intense que le noyau ce qui augmente la densité des dislocations.

Par contre L'essai 3 montre une chute de dureté de noyau et zatm par apport à la zat due au taux de recristallisation est limite par l'apport de chaleur faible

IV.6. Examen de la résilience

A travers l'essai de résilience, on mesure les énergies nécessaires à la rupture pour chaque essai en joule ce qui montre le tableau suivant :

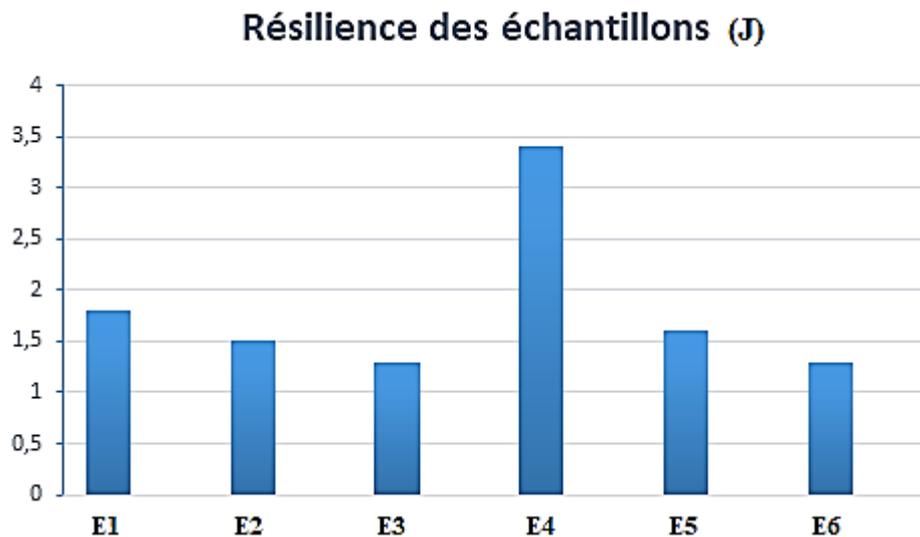


Figure IV.9 La résilience des échantillons soudés

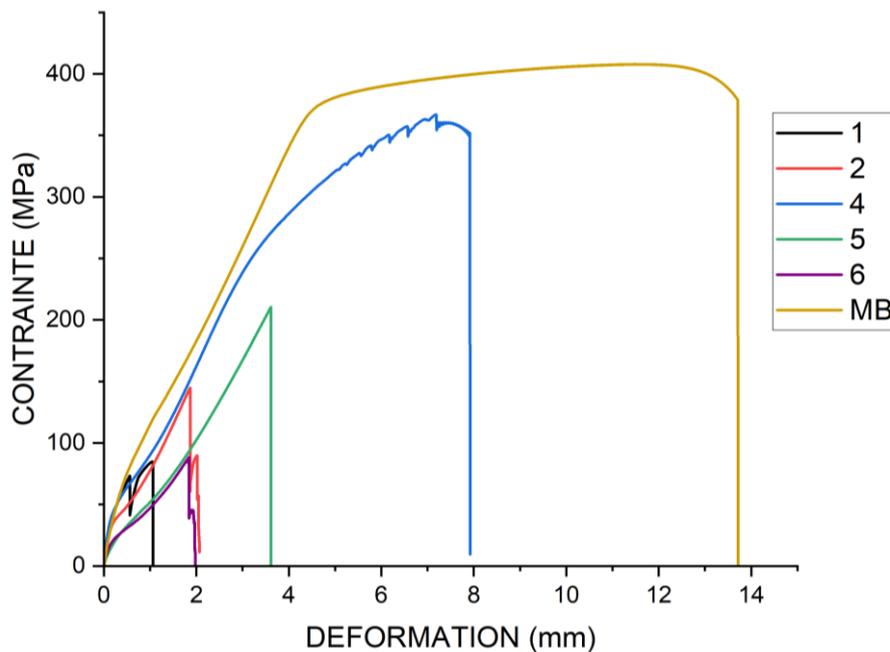
On remarque que pour les 2 vitesses de rotation, la résistance à la propagation des fissures augmente avec la diminution de la vitesse d'avance Car la plupart des essais présentent au niveau des microstructures des défauts qui tendent à diminuer leurs résistances à la propagation de fissure. L'essai 4 montre la meilleure ténacité à la rupture

IV.7. TEST DE TRACTION

Les propriétés métallurgiques des différentes zones du joint varient en fonction de l'apport de chaleur déterminé par les paramètres de soudage. Cette variation, mise en évidence par les mesures de dureté présentées à la section précédente, peut être néfaste pour la résistance en traction et peut engendrer une rupture prématurée dans une de ces zones.

Des essais de test de traction ont été réalisés avec une vitesse de déplacement fixée de 0.2mm/min, En utilisant deux éprouvettes de référence du matériau de base non soudées :

Les résultats obtenus sont représentés dans les figures suivantes :



Pour l'échantillon E1 E2 E6 :

Figure IV.10 Les courbes de traction

On remarque qu'ils ont un faible comportement à la traction, les valeurs de la limite élastique sont comprises entre 20 et 40 MPa tandis que le métal de base, a une limite élastique s'approchant d'une valeur moyenne de 430 MPa. Il y a donc une diminution de la limite élastique de 90% après soudage.

D'autre part la contrainte à rupture de ces 3 échantillons tend vers une valeur moyenne d'environ 105 MPa. À ce niveau de contrainte, on observe une rupture brutale due à la propagation des défauts et des fissures donc il y a une diminution de R_m de 80% après soudage.

Aussi on observe une chute de contrainte aux courbes de traction signifiant qu'il y'a une perte de liaison à l'intérieur des joints sans avoir une rupture totale.

D'après les résultats, on constate que les grandes vitesses d'avances diminuent significativement les propriétés de traction dues à une perte de liaison à cause de la propagation des défauts à l'intérieur du joint. Pour l'échantillon E4 :

Il présente la même allure comparée à celle du métal de base, la limite élastique est de l'ordre de 260Mpa soit une perte de 28% en élasticité

La réduction de la limite élastique est justifiée par présence les aspects des différentes microstructures qui réagissent par différentes manières aux sollicitations de traction contrairement au métal de base qui possède une structure homogène

La contrainte maximale est de l'ordre de 360Mpa, soit une réduction de 30% par rapport au métal de base qui présente une valeur acceptable

ECHAN	LA CHARGE MAX (KN)	CONTRAINTES MAX	Vr/Va	MOYENNE CON MAX	%PROP
0A	13,47	407,00	---	482,50	100,00
0B	14,41	558,00			
1A	2,18	88,80	17,7	122,40	25,37
1C	3,68	156,00			
2A	3,39	144,90	11,2	112,47	23,31
2B	2,14	90,80			
2C	2,36	101,70			
4A	8,90	367,00	45	338,95	70,25
4B	7,10	310,90			
5A	5,00	210,00	28,57	174,77	36,22
5B	3,98	161,80			
5C	3,75	152,52			
6A	2,17	88,62	18	119,71	24,81
6B	2,13	48,00			
6C	5,38	222,50			

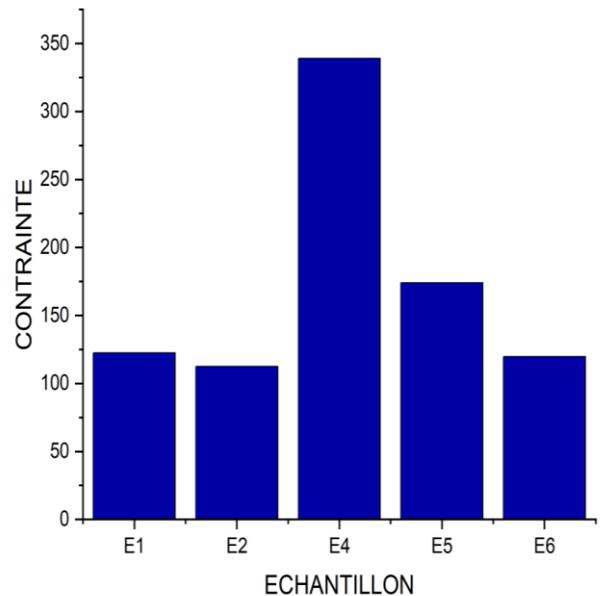


Tableau IV.2 Resultas de test de traction

Figure IV.11 histogramme de contrainte-échantillon

IV.8. Corrélation d'image :

La corrélation d'image numérique nous permet de déterminer le comportement mécanique des différentes zones à la contrainte de traction, La variation de couleur représente la déformation qui s'étend du bleu foncé qui représente une déformation nulle au rouge foncé qui exprime une déformation maximale.

La déformation dépend totalement du déplacement qui se produit au niveau du mouchetis par rapport à une image de référence.

Ainsi dans la partie élastique nous constatons une légère déformation comme on peut aussi le voir sur la courbe de traction, et qui petit à petit prend de l'ampleur jusqu'à l'apparition de la zone de grande intensité de déformation où s'effectue effectivement la rupture de notre éprouvette de traction.

Dans la partie élastique nous remarquons une homogénéité de distribution de la déformation tout au long de l'éprouvette, cette déformation s'accroît et se localise dans la zone la plus fragile où se produit la rupture.

La courbe de déformation indique le pourcentage de déformation locale en fonction de longueur d'éprouvette après la rupture

Pour l'échantillon 1

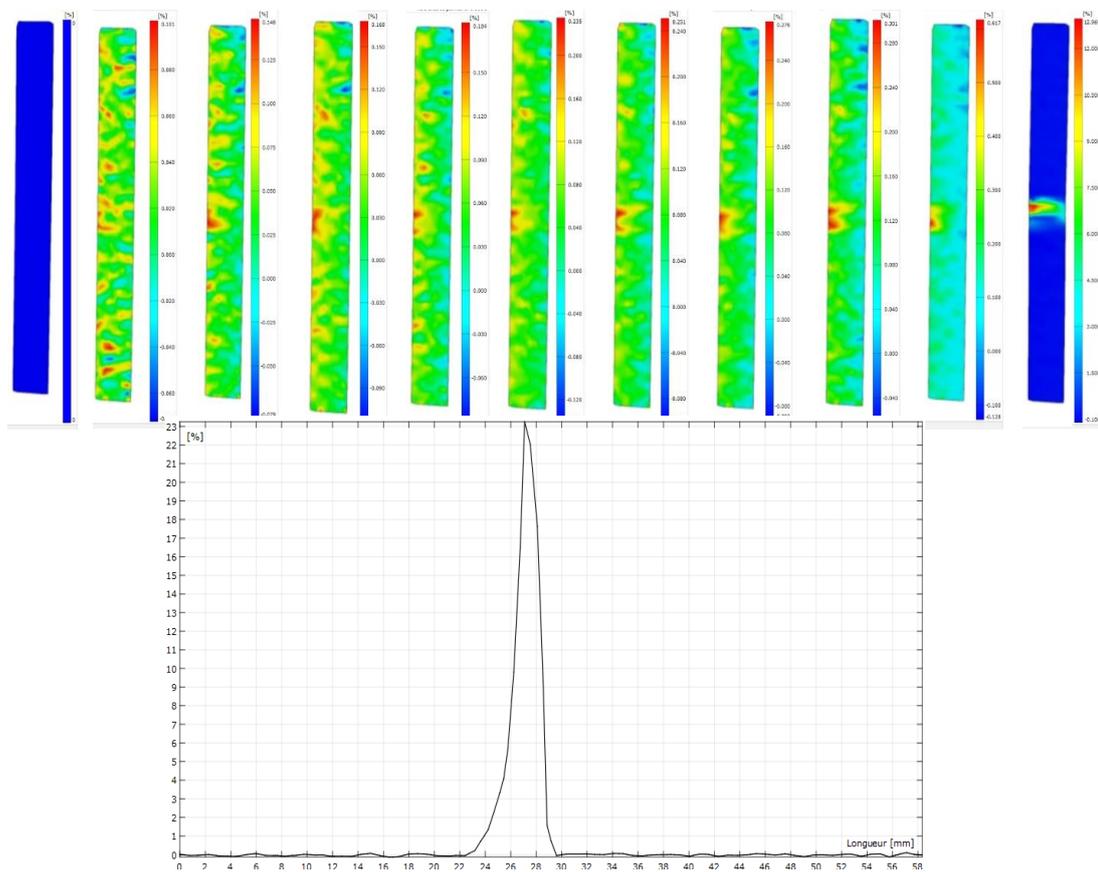


Figure IV.12 Corrélation de l'échantillon 1

Pour l'échantillon 2 :

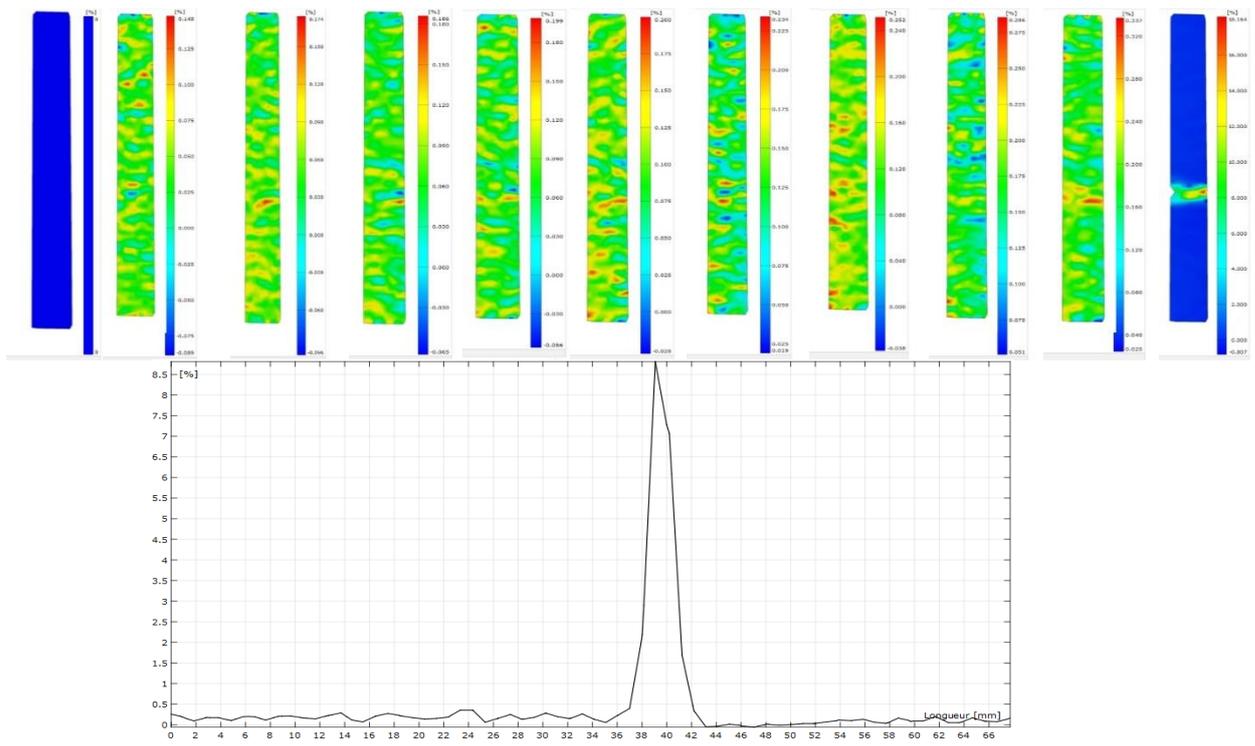


Figure IV.13 Corrélation de lechantillon 2

Pour l'échantillon 6:

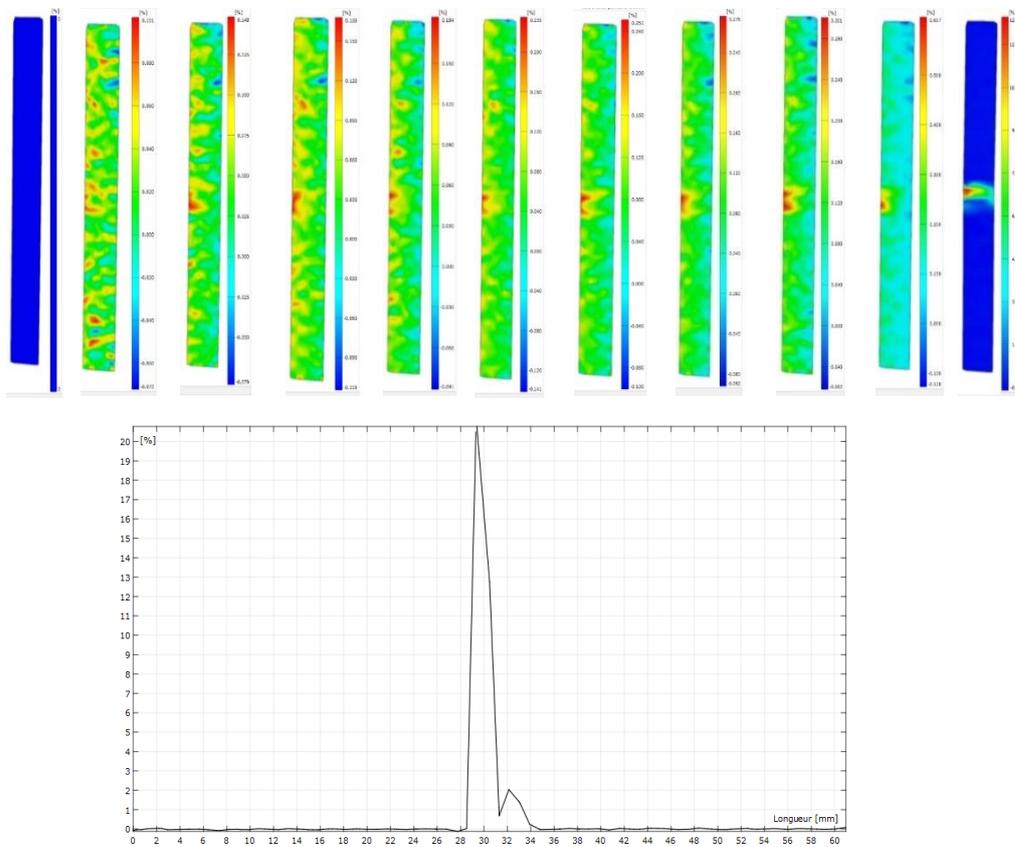


Figure IV.14 Corrélation de lechantillon 6

On remarque une distribution uniforme de déformation dans le domaine élastique au début suivi par une concentration de déformation dans le noyau qui continue vers l'autre extrémité de l'éprouvette jusqu'à la rupture

Pour l'échantillon 5 :

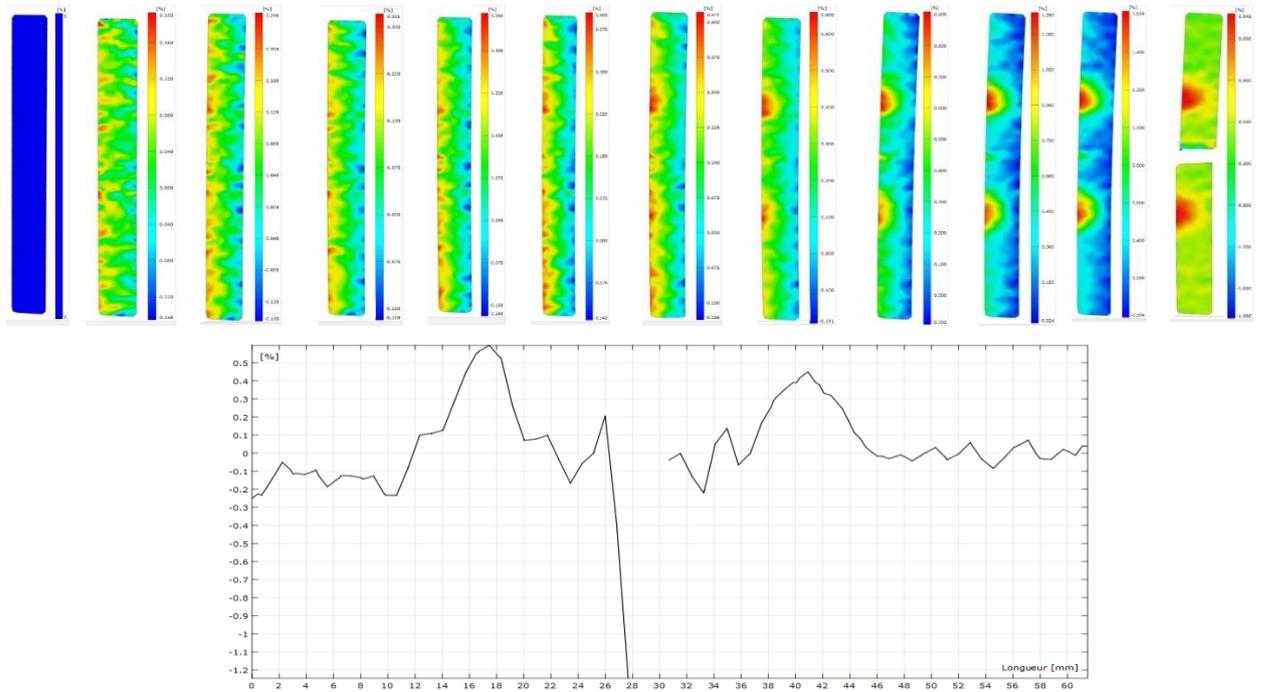


Figure IV.15 Corrélation de l'échantillon 5

On remarque une distribution uniforme de déformation dans le domaine élastique au début suivi par une concentration de déformation symétrique dans la ZAT mais à la fin on a une rupture brutale au niveau du noyau

Pour l'échantillon 4 :

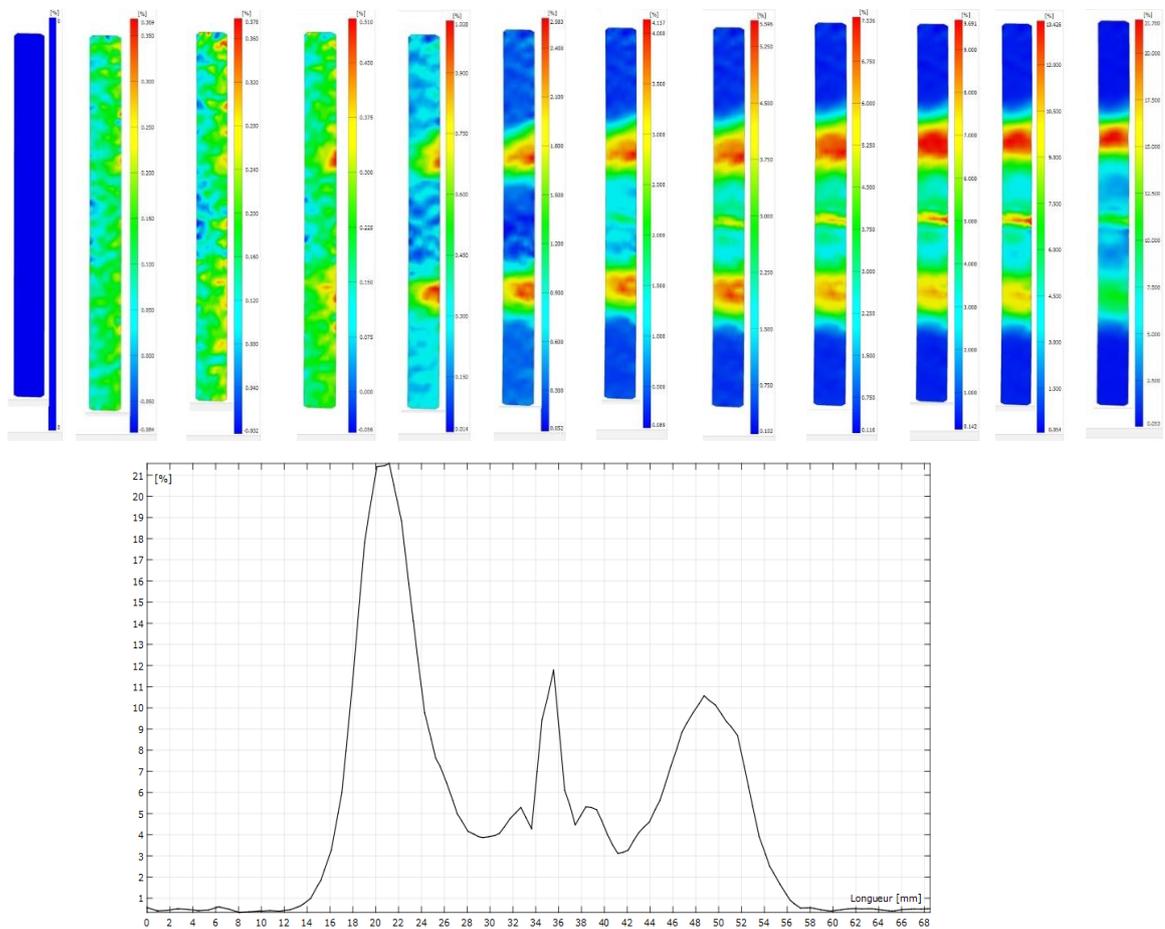


Figure IV.16 Corrélation de l'échantillon 4

On remarque une concentration de déformation symétrique dans la ZAT continue vers l'autre l'extrémité de l'éprouvette seulement dans ZAT1 jusqu'à la rupture

Ce résultat est expliqué par la faible résistance de la ZAT à cause du grossissement des grains et la bonne propriété en traction du noyau due à la distribution uniforme des MgZn₂

IV.9. Conclusion

Dans ce chapitre, les évolutions microstructurales mises en jeu et les changements des propriétés mécaniques dans l'Al7075 et à l'interface ont été investiguées et l'influence des paramètres FSW a été discutée comme suit :

- L'examen micrographique montre que l'augmentation de vitesse d'avance favorise la formation des défauts
- Le durcissement final est en effet étroitement lié aux évolutions de l'état de précipitation. En particulier, en direction du centre de la soudure, les conditions thermomécaniques conditionnent successivement :
 - Dans la ZAT, un grossissement des grains conduisant au minimum de dureté
 - Dans la ZATM, une précipitation fine et durcissant génère une dureté supérieure à celle de la ZAT
 - Dans le noyau, sous l'effet de températures atteintes et la déformation plastique, une microstructure à grains fins et recristallisés est obtenue dans le noyau ce qui génère une dureté maximale.
- Pour la résilience pour une vitesse de rotation fixe l'énergie de résilience augmente pour des vitesses d'avance lente
- Pour l'essai de traction l'augmentation de la vitesse d'avance diminue les propriétés de traction dues à une perte de liaison à cause de la propagation des défauts à l'intérieur du joint.

CONCLUSION GENERALE

CONCLUSION GENERALE

Cette étude s'inscrit dans un projet de compréhension globale des différents phénomènes rencontrés lors du soudage par friction malaxage innovante des alliages pour l'aéronautique. Elle a été conduite selon une démarche purement expérimentale pour optimiser des paramètres de soudage FSW et comprendre les principaux phénomènes, à prendre en compte lors de la réalisation de jonctions soudées par FSW.

Nous nous sommes proposé d'étudier l'interaction entre microstructure, contrôle des défauts, comportement mécanique en utilisant la technique de corrélation des images.

Après la réalisation des jonctions de soudage par le procédé FSW avec six paramètres, notre travail visait en premier lieu la réussite de faire la jonction puis la caractérisation métallurgique des interfaces soudées et enfin leurs caractéristiques mécaniques. L'objectif étant d'optimiser le meilleur paramètre qui possède le bon compromis entre les trois comportements : métallurgique, mécanique, défaut de soudage.

Pour ce faire, la mise en œuvre d'une large gamme de techniques de caractérisation/test par métallographie optique, dureté Vickers, la traction, la résilience ont été indispensables. Les premiers travaux menés consolidés par ces différentes analyses ont confirmé des résultats.

Ce qui nous permet d'obtenir un résultat remarquable dans l'essai 4 avec une combinaison de vitesse de rotation 1800rpm et vitesse d'avance 43mm/min caractérisé par

1. Absence des défauts dans la microstructure
2. La dureté moyenne est de l'ordre de 150HV
3. La résistance à la traction est 367MPa
4. Coefficient d'efficacité du joint est de 70%

En termes des perspective envisagés pour la continuation notre travail :

- l'utilisation des techniques de caractérisation avancée tel que MEB DRX pour interpréter mieux les résultats obtenus
- optimisation de la géométrie de l'outil
- L'amélioration des propriétés mécaniques par traitement thermique
- L'étude de soudage hétérogène par fsw

REFERENCES

- [1] R.Develay, Propriétés de l'aluminium et des alliages d'aluminium corroyés, ENS d'électrochimie et d'électrometallurgie de Grenoble, 1996
- [2] VARGEL, C., *Métallurgie de l'aluminium*. 2010: Ed. Techniques Ingénieur
- [3] J.Barralis et G.Maeder, *Métallurgie, élaboration, structures-propriétés, normalisation*, Afnor, Edition Nathan, Septembre 2004
- [4] Précis de métallurgie (élaboration, structures-propriétés, normalisation) par J. Barralis & J.Maeder.Afnor.Edition Nathan.septembre 2004
- [5] R.Develay, Traitement thermiques des alliages d'aluminium. Techniques de l'ingénieur. M1290, M1291, 1986
- [6] Y.HUNSICKER, La métallurgie des traitements thermiques de l'Aluminium, vol 1, pp109-61, 36 fig., bibl. 29 réf, 1967
- [7] M.Temmar, Etude des effets des traitements thermiques sur les propriétés structurales et mécaniques de l'alliage d'aluminium 7075 T6 soudés par le procédé de soudage TIG, Thèse de Doctorat d'Etat, Université Saad Dahlab de Blida, Janvier 2012
- [8] Polmear IJ: The ageing characteristics of ternary aluminium-zinc-magnesium alloys. Journal of the Institute of Metals, Vol. 86, p.113-120.
- [9] Petrov D: Ternary alloys : Aluminium-Magnesium-Zinc. edited by G. Effenberg, published by MSI, Stuttgart (Germany), Vol.16, 2000, p.456-472
- [10] Mondolfo, L.F., *Aluminum alloys: structure and properties*. 2013: Elsevier.
- [11] Berg, L., et al., *GP-zones in Al-Zn-Mg alloys and their role in artificial aging*. Acta materialia, 2001. **49**(17): p. 3443-3451.
- [12] Werenskiold, J., A. Deschamps, and Y. Bréchet, *Characterization and modeling of precipitation kinetics in an Al-Zn-Mg alloy*. Materials Science and Engineering: A, 2000. **293**(1-2): p. 267-274.
- [13] D. MAISONNETTE, Influences mécaniques et métallurgiques de procédés haute température sur un alliage d'aluminium 6061-T6, INSA de Lyon, 2010
- [14] BOUAFIA, Y. and A. Farid, *Elastic characterization by Ultrasonic waves of the unstandardized polycrystalline alloy 42500*. Journal of Materials and Engineering Structures «JMES», 2017. **4**(2): p. 87-97
- [15] J.R. Davis, Ed., *Aluminum and Aluminum Alloys*, ASM Specialty Handbook, ASM International, 1993.
- [16] Fribourg, G., Couplages entre précipitation et plasticité dans un alliage d'aluminium 7xxx: application à des traitements thermomécaniques de réduction des distorsions dans des composants aéronautiques. 2009, Grenoble INPG.
- [17] S.Zimmer, Contribution à l'industrialisation du soudage par friction malaxage. École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers. Thèse de doctorat 2009
- [18] 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

- [19] R.S. Mishra, Z.Y. Ma, Friction stir welding and processing, *Materials Science and Engineering R* 50 (2005) 1–78
- [20] GHAZI Abdelkader. CARACTERISATION MECANIQUE DES ASSEMBLAGES SOUDES PAR FRICTION MALAXAGE (ETUDE EXPERIMENTALE ET NUMERIQUE), UNIVERSITE DE SIDI BEL ABBES
- [21] Arbegast, W.J., Application of Friction Stir Welding and related technologies. Friction stir welding and processing, 2007: p. 273-308.
- [22] Fuller, C.B., *Friction stir tooling: tool materials and designs*. Friction stir welding and processing, 2007: p. 7-36.
- [23] Le soudage par friction malaxage : principes et applications, Lyne St-Georges, éd. : Les Presses de l'aluminium, Chicoutimi, Québec (2015).
- [24] Okamura, H., *Visualization of material flow in an autogenous friction stir weld*. J Japan Welding Soc, 2000. **69**(7): p. 565-571
- [25] Cui, G., Z. Ma, and S. Li, *Periodical plastic flow pattern in friction stir processed Al–Mg alloy*. Scripta Materialia, 2008. **58**(12): p. 1082-1085
- [26] Arbegast, W.J., *A flow-partitioned deformation zone model for defect formation during friction stir welding*. Scripta Materialia, 2008. **58**(5): p. 372-376.
- [27] Mishra, R.S. and Z. Ma, *Friction stir welding and processing*. Materials Science and Engineering: R: Reports, 2005. **50**(1-2): p. 1-78.
- [28] 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.
- [29] A. P. T. Reynolds (2007). Understanding Process and Property Relationships in Aluminum Alloy Friction Stir Welds. volume 539-543, pages 207–214. Trans Tech Publications.
- [30] Chen, Y. and K. Nakata, Effect of the surface state of steel on the microstructure and mechanical properties of dissimilar metal lap joints of aluminum and steel by friction stir welding. Metallurgical and materials transactions A, 2008. 39(8): p. 1985-1992.
- [31] Taban, E., J.E. Gould, and J.C. Lippold, Dissimilar friction welding of 6061-T6 aluminum and AISI 1018 steel: Properties and microstructural characterization. Materials & Design, 2010. 31(5): p. 2305-2311.
- [32] Movahedi, M., et al., Mechanical and microstructural characterization of Al5083/St-12 lap joints made by friction stir welding. Procedia Engineering, 2011. 10: p. 3297-3303.
- [33] Kooney, A., et al., *Friction Stir Process Mapping Methodology*. 2002.