

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de L'enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة أمحمد بوقرة ببومرداس

Université M'Hamed Bougara de Boumerdès

كلية المحروقات والكيمياء

Faculté des Hydrocarbures et de la Chimie



DEPARTEMENT DE TRANSPORT ET EQUIPEMENTS DES HYDROCARBURES

Mémoire de fin d'études

En vue de l'obtention du diplôme de

Master

Filière : Hydrocarbures

Spécialité : Génie mécanique

Option : Mécanique des chantiers pétroliers (MACP-17)

THEME :

Etude de la soudabilité de l'alliage d'aluminium 7075 soudé par le procédé de soudage par point par friction malaxage FSSW

Réalisé par :

- **BOULHARES Abderrahim**
- **BOUTOUIL Ammar**

Encadreur : GACEB Mohamed

Co-encadreur : HADJI Idir

Boumerdes :2022

REMERCIEMENT

*Nous tenons tout d'abord à remercier **ALLAH** le tout puissant et miséricordieux, qui nous a donné la force et la patience d'accomplir ce travail.*

Nos chers Parents, aucun mot ne pourra décrire la profondeur des sentiments qu'ont éprouvés envers vous.

*Nos remerciements s'adressent à notre encadreur universitaire, le **professeur GACEB MOHAMED** pour l'orientation, la confiance, la patience qui a constitué un apport considérable sans lequel ce travail n'aurait pas pu être menée au bon sent.*

*Nous tenons à exprimer nos sincères gratitudees à notre co-encadreur monsieur **HADJI IDIR** de nous avoir permis à réaliser ce travail au niveau de centre de recherche en technologie et industrielle(CRTI), au sein de la division (mécanique du métallurgie) et pour le soutien continu, pour sa patience, sa motivation, son enthousiasme, son immense connaissance, et le temps consacré pour l'élaboration de ce projet.*

Nous n'oublierons pas de remercier nos enseignants du département transport et Équipements des hydrocarbures.

*Nous remercions le directeur de Centre de recherche en technologie et industrielle(CRTI), **Mr. Riadh BADJI** pour l'opportunité qu'il nous a donné, pour avoir accepté de faire le stage, ainsi qu'à tous ceux qui nous ont accompagné, conseillé, soutenu ou aidé de près ou de loin durant ce travail.*

Enfin, grands merci à nos familles respectives et nos amis qui nous ont aidés.

Nous profitant de l'occasion pour remercier tous ceux qui ont collaboré de près ou de loin à la réalisation de ce mémoire.



DÉDICACE 01

C'est avec plaisir que je dédie ce modeste travail :

*À mes chers **parents** qui m'ont aidé par leur présence et
leur soutien.*

*À mes frères : **Marouane** et **Bilal***

À mes sœurs.

*À mes chers oncles. Et à tous les membres de la famille
BOULHARES et la famille **KHITER**,*

Aussi, je dédie ce travail à tous mes chers amis sur tout :

Cheikh- Taha -Samir -Mehdi -Zaki -Ahmed ...

*Sans oublier tous mes collègues des promotions
Mécaniques des chantiers pétroliers **MACP17***

BOULHARES Abderrahim



إهداء 02

أحمد الله تعالى أولاً وآخراً على نعمه التي لا تحصى
وتوفيقه لي ولإخوتي لبلوغ هذه المرحلة كما أشكر والدي
على دعمهم حتى آخر لحظة وتشجيعهم لي طول مساري
الدراسي كما أقدم شكري إلى كل الناس الذين ساعدوني من
قريب أو بعيد بقليل أو كثير.

بوطويل عمار

ملخص

إن التجميع بالتحليم للإنشاءات الميكانيكية والهياكل المعدنية المستعملة في مختلف القطاعات الصناعية، يتجه نحو الاستخدام الكثيف لعمليات اللحام الحديثة مثل اللحام بالاحتكاك الخلطي. و الهدف هو تقليل وزن المعدات تلك الهياكل و استبدال طريقة التجميع بالمسامير الميكانيكية بالتحليم، في بحثنا هذا سنهتم بدراسة اللحام النقطي بالاحتكاك الخلطي للألومينيوم المسمى 7075، الصفائح لحمت باستعمال سرعات دوران مختلفة و عمق الغطس، لقد استخدمنا عدة طرق تحليلية بسيطة و لكنها فعالة و ملائمة لهذا النوع من البحوث ، كالاختبارات الميكانيكية مثل تجربة الشد و اختبار الصلابة وذلك من اجل تحديد افضل الخصائص لتحليم جيد والتي تستطيع الحفاظ على الخصائص الميكانيكية للمواد الاساسية كما اجرينا دراسة مجهرية من اجل الكشف على مختلف المناطق في موضع اللحام وقد توصلنا الى ثلاثة مناطق هي ZM ZAT ZATM هذه المناطق نتجت عن طريق الحرارة المولدة بواسطة الاحتكاك الذي يحدث بين الاداة و صفائح الالمنيوم لاحضنا ان الزيادة في سرعة الدوران و معدل اختراق الدبوس تزيد من قوة مفصل اللحام بحيث تحصلنا على قوة شد تساوي 2 ك ن عند سرعة 1800 دورة بالدقيقة وقيمة اختراق 3.4

ABSTRACT

The welding of metal structures and constructions in various industrial sectors is tending towards the intensive use of modernized welding processes such as FSSW. In order to reduce the weight of metallic devices and structures, the replacement of riveting by welding is considered in the current research. In the present work, the interest will be focused on the study of this process. Sheets in AA7075-T6 are welded using different speeds of rotation and depth of penetration, we have used several simple but effective analytical methods suitable for this type of research, such as mechanical tests, such as tensile tests and hardness tests, to determine the best properties for a good weld that can maintain the mechanical properties of the base materials. We also conducted a microscopic study to detect the different zones in welding position, and we reached zones, which are ZM ZAT ZATM These zones result from the heat generated by the friction that occurs between the welding tool and the aluminum plates. We show that increasing the speed of rotation and the depth of penetration of pawn increases the resistance of the weld joint. So we obtain a tensile force equal to 2.03 kN at a speed of 1800 rpm and a penetration value of 3.4

RÉSUMÉ

L'assemblage par soudage des constructions et des structures métalliques dans divers secteurs industriels, tend vers l'utilisation intense de procédés de soudage modernisés tels que le soudage par point par friction malaxage FSSW. Pour réduire le poids des appareils et des structures métalliques, il est envisagé dans les recherches actuelles de remplacer le rivetage par le soudage. Dans le présent travail, l'intérêt sera porté sur l'étude de ce procédé. Des tôles en AA7075-T6 sont soudées en utilisant différentes vitesses de rotation et profondeur de pénétration, Nous avons utilisé plusieurs méthodes analytiques simples mais efficaces adaptées à ce type de recherche, Tels que des tests mécaniques, comme les essais de traction et des essais de dureté, afin de déterminer les meilleures propriétés pour une bonne soudure qui peut maintenir les propriétés mécaniques des matériaux de base. Nous avons également mené une étude microscopique afin de détecter les différentes zones en position de soudage, et nous avons atteint trait zones, qui sont ZM ZAT ZATM Ces zones résultent de la chaleur générée par le frottement qui se produit entre l'outil de soudage et les plaques d'aluminium. Nous montrons que l'augmentation de la vitesse de rotation et de la profondeur de pénétration de pion augmente la résistance du joint de soudure Pour que nous obtenions une force de traction égale à 2.03 kN à une vitesse de 1800 tours par minute et une valeur de pénétration de 3,4

SOMMAIRE

Remerciement

Dédicace

Résumé

Sommaire

Liste des figures

Liste des tableaux

Nomenclature

Centre de recherche en technologie et industrielle(CRTI)

INTRODUCTION GENERALE	2
I. Chapitre 1 : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE	4
I.1. <i>Partir 1 _le soudage par friction malaxage</i>	5
I.1.1 INTRODUCTION	6
I.1.2 Principe General Du Procède Soudage Par Friction Malaxage	6
I.1.2.1 Les différents types de soudage par friction malaxage	7
a -Soudage bout à bout	7
b -Soudage par point par friction malaxage	10
I.1.3 Différentes Positions De Soudage (FSW)	11
I.1.4 Principaux Paramètres Relatifs Au Procède Fsw	12
I.1.5 Présentation D'un Cordon De Soudure	13
a Aspect d'un cordon de soudure réalisé par FSW	13
b Coupe transversale d'une soudure.....	13
I.2. <i>Partie 2 _le soudage par point par friction malaxage</i>	15
I.2.1 Introduction	16
I.2.2 Le principe général de procédé	16
I.2.3 Avantages et limitations du procédé FSSW	18
I.2.3.1 Avantages liés au procédé	18
I.2.3.2 Avantages liés à la soudure par FSSW	18

I.2.3.3	Avantages économiques et environnementaux	18
I.2.3.4	Avantages liés à l'équipement.....	18
I.2.3.5	Limitations de soudage	19
I.2.4	Couplage thermo-métallo-mécanique.....	19
I.2.5	Le cycle de soudage FSSW	19
I.2.5.1	Descriptions du cycle.....	19
I.2.5.2	Couple et énergie	21
I.2.6	L'outil de soudage par point par friction malaxage	22
I.2.6.1	Différents types de l'outil de soudage	22
I.2.6.1.1	L'outil conventionnel	22
I.2.6.1.2	L'outil à pion rétractable	23
I.2.6.1.3	Outils double épaulements	23
I.2.6.2	Présentation général de l'outil de soudage FSSW	24
I.2.6.2.1	Epaulement d'un outil FSSW	24
I.2.6.2.2	Le pion d'un outil FSSW	25
I.3.	<i>Partie 3 Aluminium et ses alliages</i>	28
I.3.1	Introduction	29
I.3.2	Propriétés physiques et chimiques de l'Aluminium	29
I.3.3	Les éléments d'addition dans les alliages d'aluminium	30
I.3.4	Désignation des différents alliages d'Aluminium	31
I.3.5	L'alliage d'aluminium 7075	32
I.3.5.1	Propriété mécanique et caractéristiques physiques du 7075	33
I.3.5.2	Domaine d'application du 7075	34
I.3.5.3	Avantages et inconvénients	34
I.3.6	Soudage des alliages d'aluminium	35
I.3.6.1	Soudage FSSW des alliages d'aluminium	36
I.3.7	Conclusion	37
II.	Chapitre 2 TECHNIQUES ET PROCEDURES EXPERIMENTALE	38
II.1.	<i>Introduction</i>	39
II.2.	<i>Réalisation de soudure</i>	39
II.2.1	Matériau utilisé	39
II.2.2	Outil de soudage	39
II.2.3	La machine de soudage	40

II.2.4 Paramètres de soudage	42
<i>II.3. Caractérisation de soudure</i>	43
II.3.1 Caractérisation microstructurale.....	43
II.3.2 Caractérisation mécanique	44
II.3.2.1 Essai de traction global	45
II.3.2.1.1 Machine d'essai	45
II.3.2.1.2 Essais de traction-cisaillement sur les éprouvettes soudées	46
II.3.2.2 Les essais de traction : avec Technique de corrélation d'images digitales (DIC)	47
II.3.3 Mesure de microdureté	49
II.3.3.1 Essai de Dureté Vickers	49
III. Chapitre 3 : RESULTATS ET DISCUSSION.....	51
<i>III.1. Introduction</i>	52
<i>III.2. Inspection visuelle des soudures par point par friction malaxage</i>	52
<i>III.3. Analyses microstructurales</i>	53
a Macrographie du Joint soudé par différentes vitesses de rotation Erreur ! Signet non défini.	
b Exploitation des résultats de l'essai de micro dureté (Vickers).....	53
<i>III.4. Résultats de l'essai de traction :</i>	57
<i>III.5. Résultat de l'essai de traction avec la Technique de corrélation d'images</i> 61	
a Le code open source DIC-Ncorr	61
b Champs de déplacement et de déformation:	63
c Analyse des résultats	Erreur ! Signet non défini.
CONCLUSION GENERALE :	67
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	70

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Schéma montrant les principales composantes de l'outillage en soudage par friction malaxage (FSW)	7
Figure 2 : Chronologie d'une opération de soudage FSW : (a) phase de plongée (b) phase de préchauffage (c) phase de soudage et (d) phase de retrait.....	8
Figure 3 : (a) phase de chauffage (b) phase de soudage d'un joint	9
Figure 4 : Trou à la fin de soudage	10
Figure 5 : Schéma montrant les principales composantes de l'outillage en soudage par friction malaxage (FSW)	10
Figure 6 : Illustration du procédé (FSSW)	11
Figure 7 : Configurations de joint de soudure FSW	11
Figure 8 : Visualisation des paramètres de soudage.....	12
Figure 9 : Aspect d'une soudure réalisé par FSW. Soudure bout à bout	13
Figure 10 : Microstructure de la zone soudée	14
Figure 11 : Schéma des interactions	19
Figure 12 : Description du cycle de soudage par point par friction malaxage	20
Figure 13 : Courbe de l'effort axial et du couple	20
Figure 14 : Exemple d'outil pion fixe	22
Figure 15 : Outil à pion rétractable	23
Figure 16 : Outil à double épaulements	23
Figure 17 : Schématisation d'un outil FSW/FSSW	24
Figure 18 : Différentes géométries et formes utilisées pour l'épaulement d'un outil FSW/FSSW	25
Figure 19 : Effet de la vitesse de rotation de l'outil de 1000 tr/min et de la profondeur de pénétration de l'épaulement de 0,2 mm avec une broche cylindrique sur la section du joint (a) Macrostructure de la section du joint et microstructures de (b)BM,(c)HAZ,(d)TMAZ,(e)SZ.	26
Figure 20: Caractéristiques microstructurales de la ZAT d'une soudure par friction de AA7075 – T6.....	36
Figure 21 : Profile de dureté à travers une soudure par friction de AA7075 – T6	36
Figure 22 : Plaques d'aluminium du type 7075-T6.....	39
Figure 23 : L'outil FSSW EPP14.....	40
Figure 24 : Machine de soudage (fraiseuse Universelle type russe 1965).....	40
Figure 25 : Schéma cinématique, représentation des axes	41
Figure 26 : Représentation schématique des plaques superposées l'un sur l'autre avec $W = 30 \text{ mm}$ $t = 2 \text{ mm}$ $L = 100 \text{ mm}$	41
Figure 27 : Système de bridage.....	42
Figure 28 : Coupe transversale sur les joints	43
Figure 29 : Echantillons A, B, C, et D	43

Figure 30 : MECATECH 264 (Polissage automatique)	44
Figure 31 : Machine de traction (MTS Criterion™ Model 45).....	45
Figure 32 : Eprouvettes préparées pour l'essai de traction.	46
Figure 33: Section transversale de l'arrangement de l'essai de traction de FSSW	46
Figure 34 : Essai de traction d'une éprouvette soudée par FSSW	47
Figure 35 : Matériel utilisé pour la corrélation d'image digitale.	47
Figure 36 : Etapes de préparation de mouchetis dans les éprouvettes	48
Figure 37 : Camera « eledyne DALSA ».....	48
Figure 38: Micro uromètre Utilisée (BUELER 1600/4300).	49
Figure 39 : Représentation schématique des zones testées pendant l'essai de micro dreté.....	500
Figure 40 : Soudure sans défaut (avec agrandissement de l'empreinte finale de l'outil). ..	52
Figure 41 : Défauts observés dans les éprouvettes.	53
Figure 42 : Observation macroscopique des différentes zones des échantillons A et B.	Erreur ! Signet non défini.
Figure 43 : Représentation graphique des résultats de dureté sur les échantillons A et B.	55
Figure 44 : : Influence de vitesse de rotation sur le profil de micro dureté des échantillons avec une profondeur de pénétration $H_p=3.4$ et temps de maintien de $t=15s$	56
Figure 45 : Courbe Force-Déplacement de l'essai de traction a déférente vitesse de rotation.....	57
Figure 46 : Effets des différentes vitesses de rotations sur la résistance maximale à la traction.....	Erreur ! Signet non défini.
Figure 47 : Point de transition.....	59
Figure 48 : Mode de rupture observé aux conditions de soudage par FSSW	59
Figure 49 : photographies illustrent l'effet vitesse de rotation sur la zone malaxé	60
Figure 50 : Diagramme montrant la relation entre la vitesse de rotation et le diamètre et l'épaisseur de l'empreinte du pion de l'outil	61
Figure 51 : Illustration de champs de déformation et les champs de déformation d'une éprouvette soudée par FSSW durant un essai de traction-cisaillement avec CID... ..	64
Figure 52 : Courbe de traction-cisaillement sur une éprouvette soudée par FSSW A la vitesse de rotation 1800tpm	65
Figure 53 : Exemple de carte de champ déformation montrant la position de la face avant par rapport à l'arrière à une force de 0,1KN	65
Figure 54 : a- Carte des champs de déformation à 2KN avec la ligne centrale b- Profile de déformation prélevé dans la ligne centrale suivant la direction de la traction,	66

LISTE DES TABLEAUX

Table 1 : Désignation des séries principales des alliages d'Aluminium	32
Table 2: Caractéristiques physiques de L'alliage 7075.	33
Table 3: Paramètres utilisés pendant le soudage par FSSW. Vitesse de rotation : N (tr/min), Distance de pénétration : Hp(mm) ; Temps de maintien : Tm (S)..	42
Table 4 : Paramètres utilisé pour le soudage par FSSW.....	44

NOMENCLATURE :

FSW :	Friction Stir Spot Welding
FSSW :	Friction Stir Spot Welding
ZM :	Zone malaxer
ZAT :	Zone affectée thermiquement
ZATM :	Zone affectée thermo -mécaniquement
MB :	Métal de base
AA7075 :	L'alliage d'aluminium 7075
Hp :	Profondeur de pénétration
N (tr/min) :	Vitesse de rotation
Tm (s) :	Temps de maintien
CID :	Digital Image Corrélation
Hv :	Dureté Vickers

Centre de recherche en technologie et industrielle(CRTI)



Figure 0. 1 : Centre de recherche en technologie et industrielle(CRTI).

Centre de recherche en technologie et industrielle(CRTI) est un Établissement Public à caractère Scientifique et Technologique (EPST), le centre dispose de plusieurs structures de recherche et de valorisation à travers le territoire national.

CRTI est une coopération scientifique et technique et l'assistance technique à l'industrie nationale et ces derniers sont au cœur de leur politique générale et de leur stratégie de développement. Dans ce contexte, le CRTI a mis en place des conventions-cadres, d'une part, avec plusieurs institutions, établissement universitaires et structures de recherche et, d'autre part, avec des entreprises nationales stratégiques et les multinationales exerçant leurs activités dans le domaine de la technologie industrielle, notamment des hydrocarbures pour répondre aux besoins des professionnels du secteur socio-économique.

Le CRTI, ex-CSC, a reçu pour mission générale de mettre en œuvre les programmes de recherche nécessaires au développement des technologies de soudage et de contrôle destructif et non destructif. Près de trente ans plus tard, cette mission conserve toute son actualité. Cependant, au fil des décennies, le contenu des missions du centre a évolué et s'est enrichi ce qui a nécessité la redéfinition des missions et le changement de la dénomination du centre. À ce titre, le centre est désormais dénommé Centre de Recherche en Technologies Industrielles (CRTI). Le CRTI est chargé notamment :

- De réaliser les projets de recherche nécessaires au développement des technologies industrielles, notamment les techniques d'assemblage, le contrôle non destructif et la corrosion.
- D'organiser, développer et promouvoir l'assurance qualité et le contrôle qualité des installations industrielles ;
- Centre de recherche en technologie et industrielle(CRTI)
- De développer et contribuer à la réalisation des recueils, normes et standards relatifs aux technologies d'assemblages, du contrôle non destructif des installations industrielles et de la corrosion des matériaux métalliques ;
- De perfectionner, vérifier et utiliser les équipements de soudage, de contrôle non destructif, d'analyse et de mesure ;
- De développer la recherche appliquée dans le domaine de la sidérurgie et métallurgie, telle que l'élaboration et la caractérisation des aciers et alliages spéciaux ;
- De maîtriser et de développer la mécatronique et la maintenance appliquée aux installations industrielles ;
- De développer des programmes de recherche dans l'élaboration, la caractérisation et l'étude du comportement des matériaux non métalliques tels que les composites, les céramiques, etc. ;
- De développer des programmes de recherche dans la technologie du traitement de surface des matériaux et leurs applications.

Actuellement, le CRTI, dont le siège central est situé à Chéraga, Alger, compte six divisions de recherche (Figure 0-2) et dispose de :

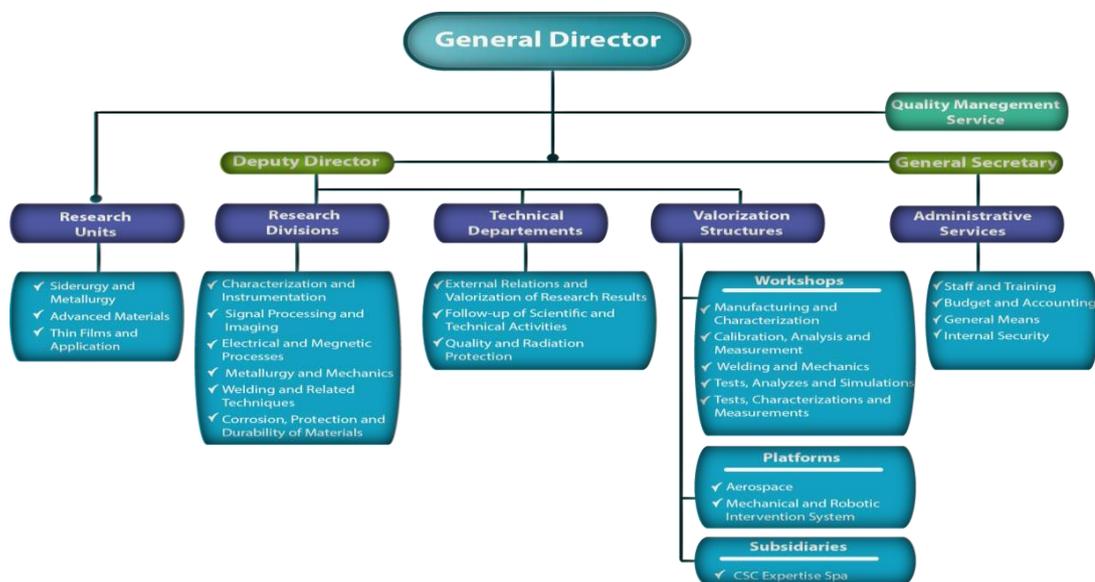


Figure 0. 2 : Structure organisationnelle de CRTI.

INTRODUCTION

GENERALE

Introduction générale

Le soudage industriel consiste à assembler deux éléments ou plus de manière permanente en prenant soin d'assurer une parfaite continuité entre eux. Cet assemblage peut se faire par pression, par chauffage. Le soudage trouve des applications dans des secteurs d'activité très diversifiés comme la production, la construction, la réparation et la maintenance.

La demande croissante de l'économie d'énergie dans différents secteurs industriels a mené à la nécessité d'employer les alliages légers et les aciers de haute résistance. Un tel intérêt a créé la nécessité de développer les technologies de soudage fiables qui peuvent permettre des processus multi matériel de fabrication de conception et de coût bas.

Le soudage par friction-malaxage (FSW) est une technologie d'assemblage relativement nouvelle inventée par The Welding Institute en 1991 [1]. L'utilisation générale a été pour le soudage de matériaux souples à faible point de fusion tels que l'aluminium. Les progrès de la technologie des outils ont permis la mise en œuvre du FSW dans l'acier, l'acier inoxydable et les alliages à base de nickel. Les avantages du FSW incluent un faible apport de chaleur, l'élimination des défauts de solidification, la capacité d'assembler des matériaux difficiles et historiquement non soudables tout en améliorant les propriétés mécaniques par rapport aux procédés de soudage conventionnels. L'industrie pétrolière et gazière utilise de nombreux matériaux spécialisés pour la performance et la résistance à la corrosion [2].

Dernièrement, Le soudage par points par friction-malaxage est évalué comme une technique à l'état solide économe en énergie dans l'industrie automobile. Il a été suggéré en 2000 sur la base du soudage par friction-malaxage linéaire pour développer le procédé FSW [3].

Récemment, plusieurs industries, en particulier l'industrie automobile, ont exprimé une inquiétude considérable quant à l'application de cette technique, et elle a été acceptée dans les industries du transport [4].

Bien que le FSSW soit basé sur le FSW, ils présentent des différences principales. Dans la technique FSSW, le soudage est effectué dans une zone particulière en perçant et en tirant l'outil spécial sur la surface des plaques.

Le FSSW présente certains avantages. Par exemple la possibilité de combiner des matériaux différents et dissemblables C'est aussi la même source d'énergie thermique, ce qui la rend économique pour l'énergie électrique, Lors du soudage par point par friction malaxage, une liaison métallique se crée à l'interface des deux tôles. La liaison à une forme d'« oreilles », c'est la zone de malaxage. Cette zone améliore des propriétés mécaniques de 30% par rapport à

INTRODUCTION GENERALE

l'assemblage par rivetage, mais la sortie de l'outil laisse un trou, Ce processus est sans rayonnement ni renflements de fumées de soudage, ce qui le rend non polluant pour l'environnement.

Notre objectif dans ce travail est d'étudier l'effet des paramètres de soudage (vitesse de rotation, distance de pénétration,) sur la tenue mécanique et sur les caractéristiques mécaniques des joints de soudure soudée par points par friction malaxage (FSSW) entre Les alliage d'aluminium 7075.

Cette étude consiste à déterminer les propriétés mécaniques des points de soudure à partir des essais de traction et la technique de la corrélation d'image (CID), essais de micro dureté et une étude macro structurelle des joints soudés.

Ce travail est présenté sous forme d'une étude bibliographique (chapitre 1) divisé en trois parties ; la première et la deuxième partie est consacré au procédés de soudage FSW et FSSW, principes de fonctionnement et l'avantage et inconvénient de chaque type, et les propriétés mécaniques, dans le joint soudé.

La troisième partie Comprend des généralités sur les alliages d'aluminium de type 7075 et un état de l'art du soudage FSSW sur ces alliages.

Le Chapitre 2 décrit la présentation des techniques expérimentales de soudage et les matériaux utilisés. Les techniques de caractérisation utilisées sont la microscopie optique pour voir l'évolution de la microstructure du joint et la mesure de micro dureté Vickers pour distinguer la dureté de chaque zone du joint soudé, et enfin des essais mécaniques de traction pour évaluer la rigidité du joint

Le chapitre 3 rassemble les résultats expérimentaux obtenus, les discussions de ces résultats et leur interprétation.

Enfin une conclusion générale accompagnée de quelques perspectives.

*I. CHAPITRE 1 : ETUDE
BIBLIOGRAPHIQUE*

I.1. Partir 1 _ le soudage par friction malaxage

I.1.1 INTRODUCTION

Le soudage est défini comme étant une opération consistant à réunir deux ou plusieurs parties constitutives d'un assemblage, de manière à assurer une 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 [5].

La mise au point de ces technologies a donné une alternative à l'assemblage mécanique non démontable 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.

L'un des derniers procédés mis au point est le soudage par friction-malaxage. Ce procédé, breveté en 1991 par le TWI(The Welding Institute, TWI), est une variante du soudage par friction [6]. Le soudage par friction-malaxage est plus communément appelé Friction Stir Welding, FSW. Contrairement au procédé de soudage par friction « classique », les pièces à assembler n'ont pas de mouvement relatif l'une par rapport à l'autre. Ceci lui offre un plus large choix de configurations de joints soudables. Ce procédé, innovant, permet de souder à l'état « solide », C'est-à-dire sans atteindre la température de fusion. Ceci lui permet, en théorie, de souder tous les métaux, même ceux réputés difficilement soudables par fusion à cause de problèmes de fissurations à chaud, de soufflures, ou d'abattement trop important des propriétés mécaniques.

Ses caractéristiques offrent à ce procédé de réels potentiels de développements industriels, surtout pour les métaux malléables à chauds et à bas point de fusion tels que l'aluminium ou le cuivre.

I.1.2 Principe General Du Procède Soudage Par Friction Malaxage :

Le principe général du soudage FSW consiste à assembler des plaques par déformation plastique à chaud ; un flux de chaleur est généré par la friction des matériaux (interface outil / plaque) et également par la déformation plastique dues au malaxage des deux plaques en contact. Les plaques sont fortement bridées afin d'éliminer tout mouvement lors du malaxage. La température des matériaux augmente à cause de ce flux de chaleur, tout en restant en dessous de leur température de fusion, cette chaleur est générée par les grands

frottements de l'outil de haute résistance mécanique et thermique avec la surface des pièces à souder. L'outil possédant un épaulement (shoulder) réalise une double fonction : malaxage et déformation de la matière, est pion (pin) peut malaxer la matière ramollie et entamant ainsi un mouvement d'avance dans la direction de la ligne de joint à soudée pour former la soudure après refroidissement (Figure 1).

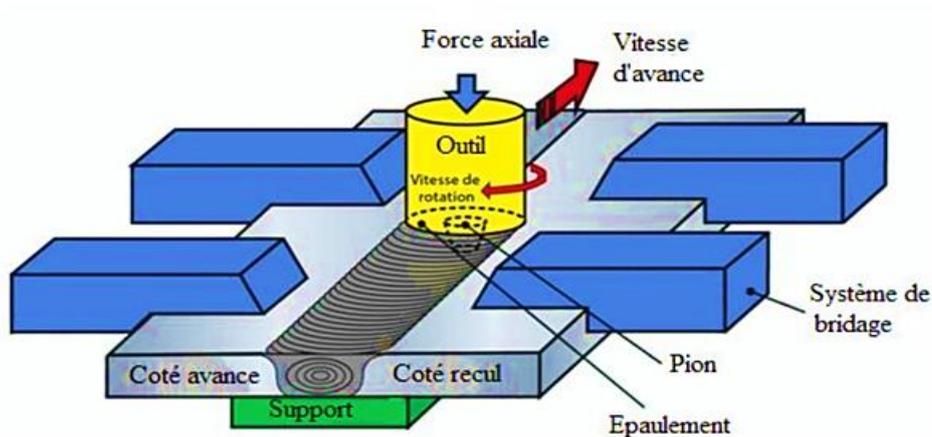


Figure 1 : Schéma montrant les principales composantes de l'outillage en soudage par friction malaxage (FSW) [13]

I.1.2.1 Les différents types de soudage par friction malaxage

Depuis son invention, le processus de FSW ne cesse de s'améliorer afin de pouvoir prendre sa place dans le domaine de la soudure et être adapté à la productivité industrielle. Le FSW est utilisé dans la plupart des cas pour le soudage des alliages d'aluminium. Le processus de soudage par friction malaxage peut être classifié en deux types : le soudage bout à bout et le soudage par point par friction malaxage FSSW [7].

a) Soudage bout à bout :

Le soudage bout à bout consiste à assembler deux pièces mises en contact et généralement immobilisées par bridage pour éviter leurs écartements. Il permet de réaliser des cordons de soudures linéaires. La soudure est effectuée principalement en quatre étapes successives.

- ❶ Phase de pénétration,
- ❷ Phase de préchauffage,
- ❸ Une phase de réalisation du cordon de soudure
- ❹ Une phase de retrait de l'outil

La figure 2 présente de façon schématique les quatre phases opératoires du procédé de soudage par FSW. L'opération de soudage peut être décomposée en 4 phases successives :

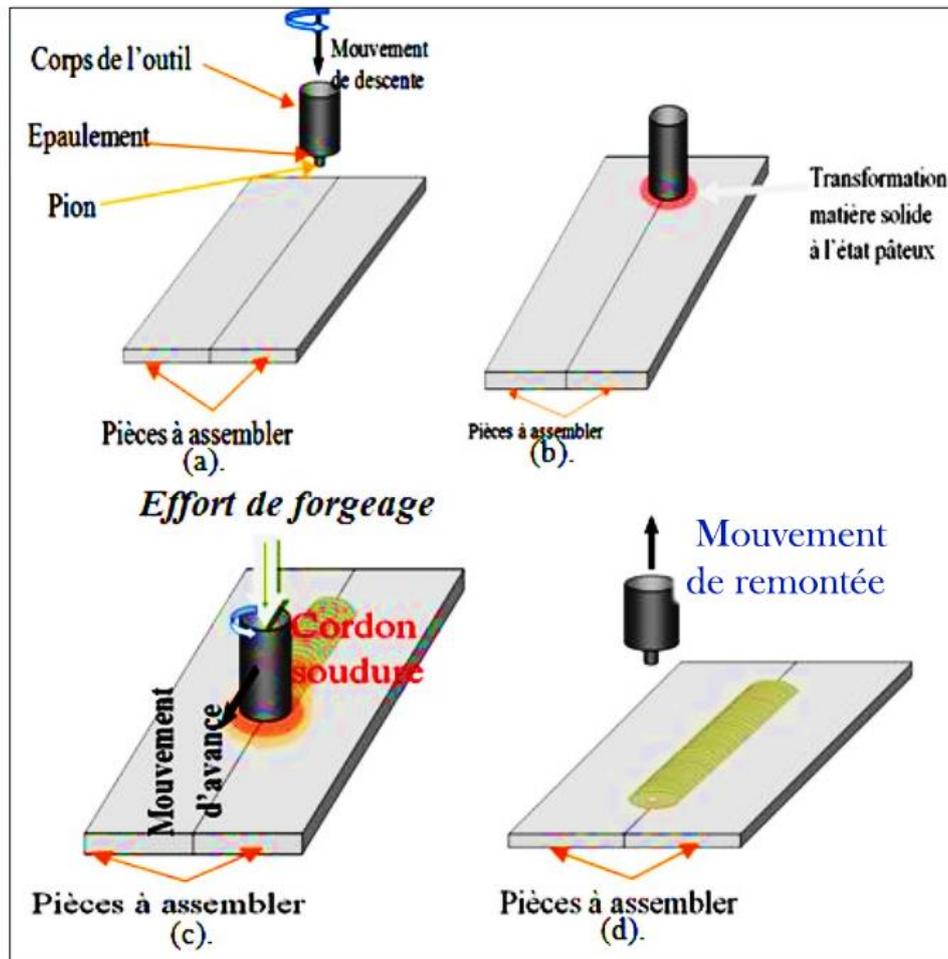


Figure 2 : Chronologie d'une opération de soudage FSW : (a) phase de plongée (b) phase de préchauffage (c) phase de soudage et (d) phase de retrait

1) Phase de pénétration de l'outil

Dans cette étape illustrée par la figure 2.a. on réalise la pénétration du pion sous l'effet d'un effort vertical, il pénètre progressivement à l'intérieur du joint, grâce à la vitesse de rotation jusqu'à ce que l'épaulement soit au contact avec des plaques à souder.

2) Phase de préchauffage

Durant cette phase, l'outil toujours en rotation, reste sur place afin de préchauffer la matière à l'aide de l'épaulement jusqu'à la transformation de matière solide à l'état pâteux (figure 2.b). Cette phase est dite « la phase de pré-soudage ». La figure (3.a) montre un exemple de soudage FSW en acier inoxydable, réalisée par Hitachi du Japon [8-11].

3) Phase de soudage

Une fois la température de soudage (état ramolli de la matière) atteinte, le pion tournant commence à avancer le long de la ligne de joint (autre configuration possible : déplacement de la table), ainsi on assure le malaxage de la matière entre les deux pièces. Un effort appelé effort de forgeage est appliqué sur l'outil est maintenu pendant cette phase. La matière malaxée est déformée plastiquement et constitue le cordon de soudure. Le cordon obtenu n'est pas symétrique. En effet, le mouvement combine de rotation et d'avance donne naissance à deux côtes :

- Un côté avance (advancing side) ou le sens de la vitesse de rotation de l'outil coïncide avec sa vitesse d'avance.
- Un côté recul (retreating side) ou le sens de la vitesse d'avance de l'outil s'oppose à sa vitesse d'avance. Lors de son passage, l'outil forme des stries le long du cordon, origine du frottement (épaulement/ matière) ainsi que des bavures aux bords (flash de matière).

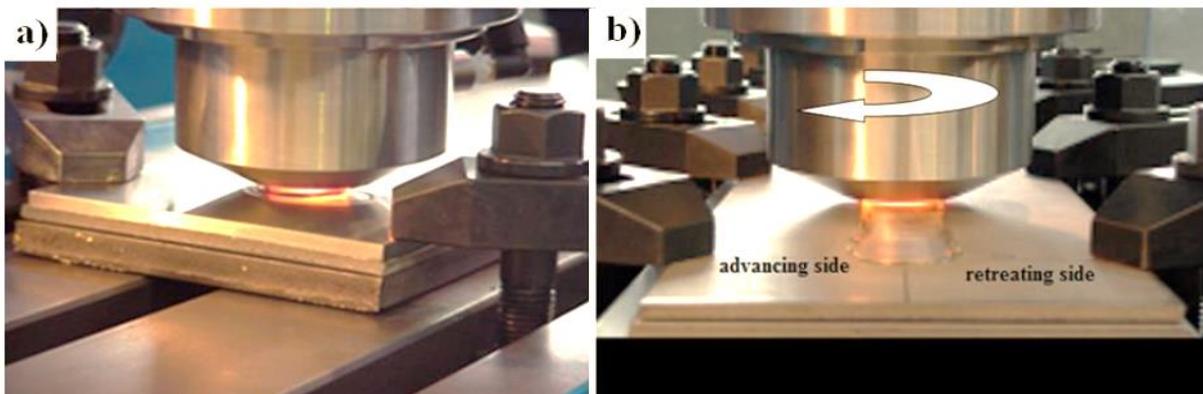


Figure 3 : (a) phase de chauffage (b) phase de soudage d'un joint [12]

4) Phase de retrait de l'outil

Cette phase (illustrée sur la Figure 3) consiste à un retrait de l'outil suivant un mouvement perpendiculaire aux tôles. Selon le type de d'outil utilisé, l'empreinte du pion à l'intérieur de la matière peut être présente au niveau d'extraction du pion



Figure 4 : Trou à la fin de soudage

La figure 4 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.

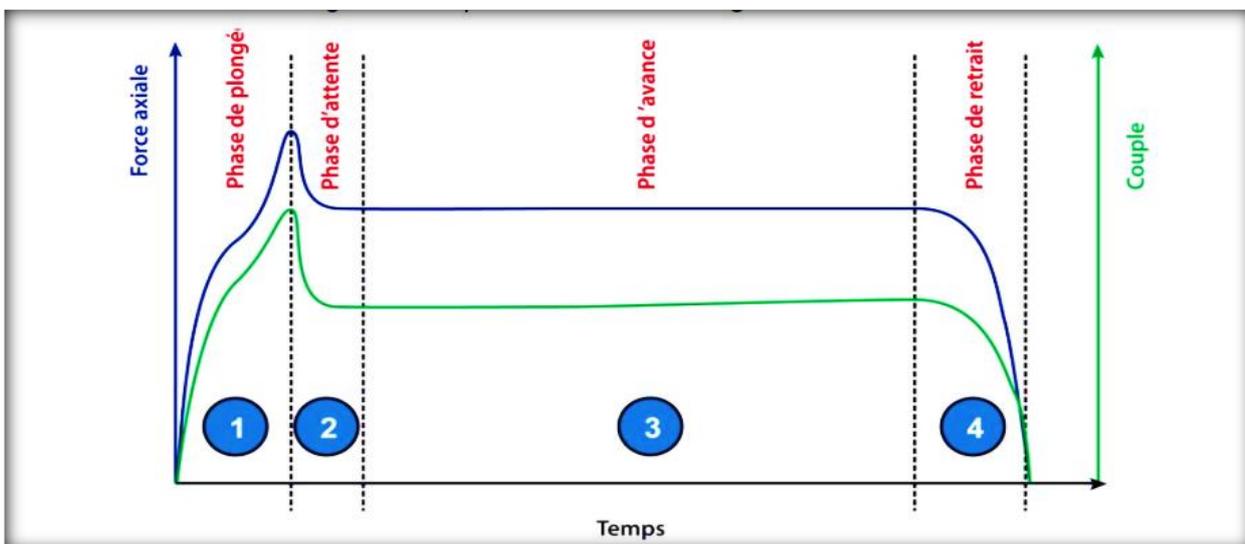


Figure 5 : Schéma montrant les principales composantes de l'outillage en soudage par friction malaxage (FSW) [13]

b) Soudage par point par friction malaxage :

Le soudage par point par friction malaxage, ou FSSW (Friction Stir Spot Welding) presque c'est le même principe que le soudage linéaire par friction malaxage sauf que les deux tôles sont superposées, l'outil de soudage ne se déplace pas longitudinalement, comme le montre le schéma de principe de la figure 5. L'outil en rotation pénètre complètement la tôle supérieure et partiellement la tôle inférieure le pion permet alors un malaxage à l'interface des tôles et assurant la liaison métallique et en phase finale l'outil est rétracté en laissant une empreinte [14].

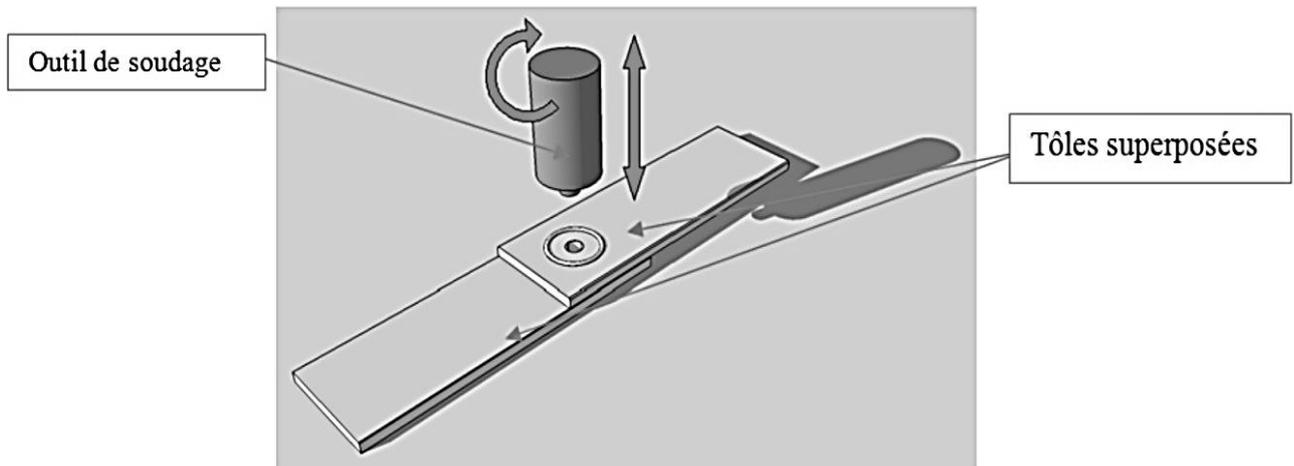


Figure 6 : Illustration du procédé (FSSW)

I.1.3 Différentes Positions De Soudage FSW

Les différentes configurations de soudage FSW nécessitent les points suivants :

- le bridage des pièces pour éviter tout mouvement relatif de celles-ci sous l'action des efforts générés.
- l'accessibilité au plan de joint par l'outil et d'accueillir l'épaulement afin d'assurer le contact de ce dernier avec la surface des pièces.
- Placer, si nécessaire, une enclume à l'envers des pièces pour récupérer l'effort appliqué par l'outil et contenir la matière. Ces contraintes limitent les configurations de joint possibles et permettent de réaliser de nombreuses applications (figure 6).

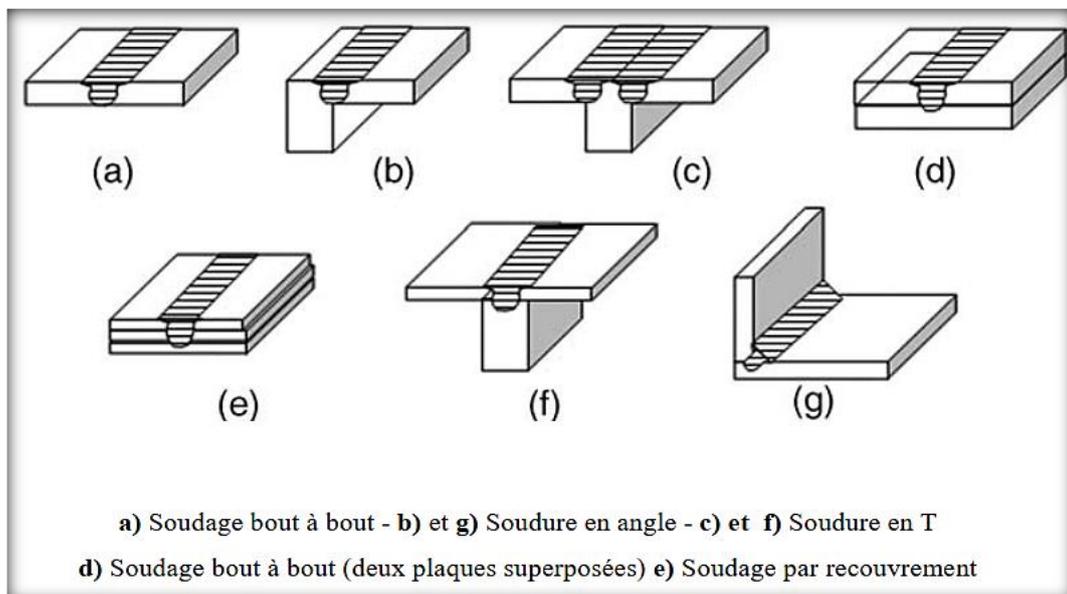


Figure 7 : Configurations de joint de soudure FSW [15-16]

I.1.4 Principaux Paramètres Relatifs Au Procède FSW

Les principaux paramètres spécifiques au soudage par FSW sont les suivants (Figure 7)

- La vitesse d'avance de l'outil ou vitesse d'avance V_a ,
- L'effort axial F_z appliqué sur l'outil suivant son axe de rotation, afin de compenser la pression formée dans la zone de soudure [17],
- La vitesse de rotation ω ,
- L'angle d'inclinaison de l'outil dénommé angle de déplacement i .

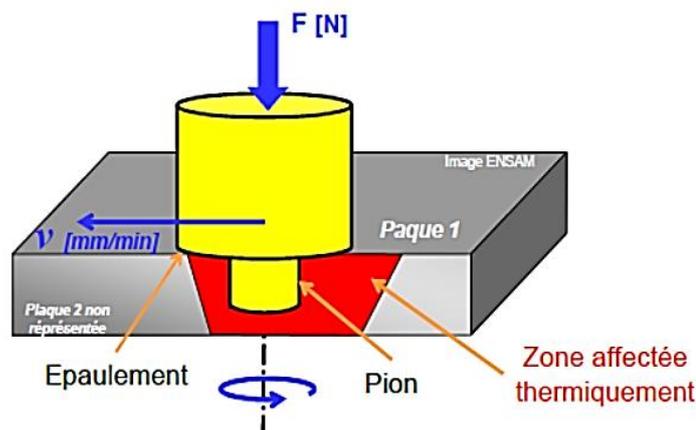


Figure 8 : Visualisation des paramètres de soudage

Ces paramètres sont à régler selon les matériaux, l'épaisseur soudée et la géométrie de l'outil. L'ensemble conditionne l'apport d'énergie, le flux de matière, la formation du cordon, les propriétés mécaniques de l'assemblage et les efforts générés [18].

Le choix de ces trois paramètres dépend, pour un outil donné, de la nature des matériaux soudés, des épaisseurs soudées ainsi que de la configuration de soudage (bout à bout, par recouvrement, etc.). Pour chaque matériau soudé, une combinaison appropriée de ces trois paramètres doit être utilisée afin d'optimiser la qualité des soudures.

Il est à noter que l'application d'un effort axial F_z , suivant l'axe de l'outil a pour but :

- De maintenir l'épaulement en contact avec la surface des pièces afin :
 - D'assurer un apport de chaleur par frottement,
 - De contenir le matériau malaxé sous l'outil et d'assurer ainsi la compacité du joint [19]

- D'assurer la profondeur de pénétration de l'outil.
- Le contrôle de l'outil en position par rapport à la surface des pièces est défini par une valeur maintenue constante. Ainsi, l'outil suit simplement des coordonnées préprogrammées [20] (Figure 8)

I.1.5 Présentation D'un Cordon De Soudure

a) Aspect d'un cordon de soudure réalisé par FSW

La figure 8 présente l'aspect extérieur et une coupe transversale d'une soudure réalisée par FSW. Le cordon de soudure se forme entre les deux plaques à assembler sans surépaisseur. Il n'est pas nécessaire d'araser les cordons. De plus, il n'y a pas de formation de couche d'oxyde au cours de l'opération de soudage.

Ceci permet d'avoir une soudure propre d'un point de vue esthétique ne nécessitant pas systématiquement d'opération post-soudage ou de traitement spécifique. Dans certains cas, suivant la nature du matériau soudé ou selon son épaisseur, il peut néanmoins se former un excès de matière du côté avance (advancing side) et appelé bourrelet ou bavure « flash » qu'il peut être nécessaire d'araser pour des raisons esthétiques ou pour améliorer la tenue en fatigue .

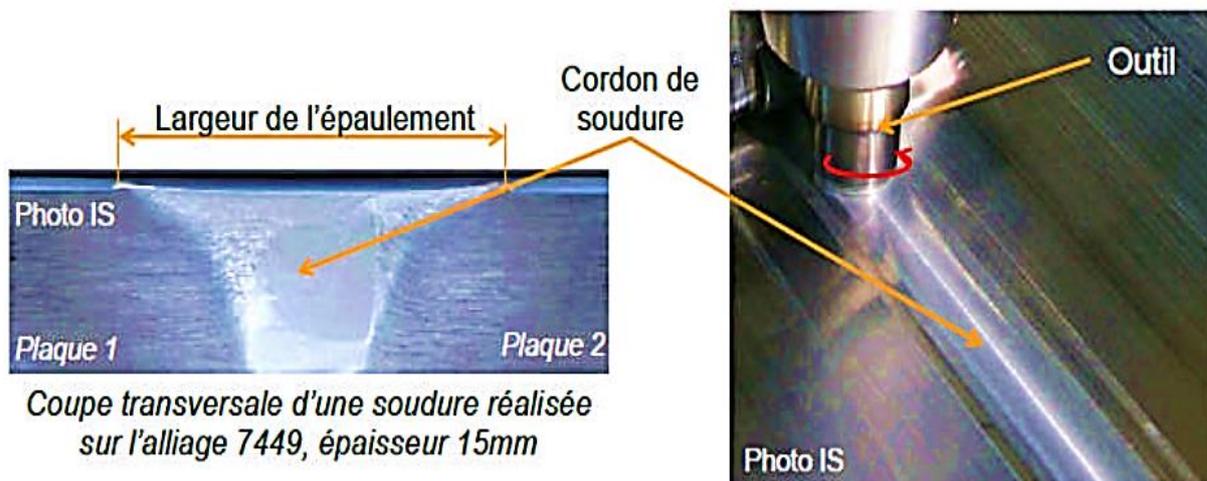


Figure 9 : Aspect d'une soudure réalisée par FSW. Soudure bout à bout [21]

b) Coupe transversale d'une soudure

Lors des opérations de soudage traditionnel, les températures atteintes dépassent localement les températures de fusion des matériaux. Ce n'est pas le cas pour le FSW ou les températures atteintes sont plus faibles mais néanmoins suffisantes pour modifier la microstructure des

matériaux de base au voisinage du cordon de soudure. Ces changements de microstructure, dus également aux déformations plastiques, modifient les propriétés mécaniques (dureté, charge à la rupture, limite d'élasticité, allongement à la rupture) dans les zones affectées par le soudage. La Figure 9 présente les quatre zones caractéristiques d'une soudure FSW observées sur une coupe transversale.

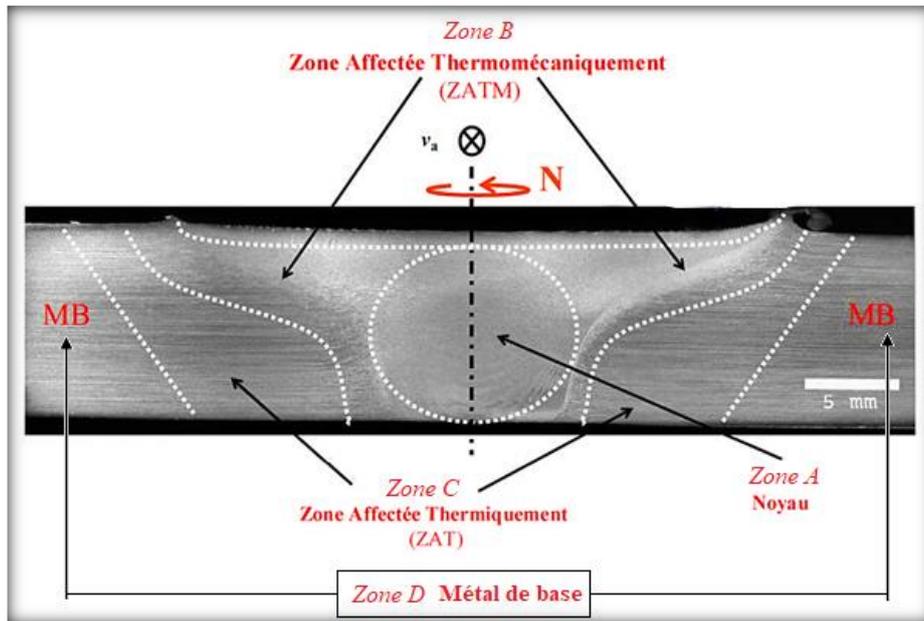


Figure 10 : Microstructure de la zone soudée [22]

Le cordon de soudure est composé de 4 zones distinctes :

- Zone A, le noyau de soudure. La matière dans cette zone a subi une déformation plastique importante suite à l'opération de « malaxage ». Les températures les plus élevées sont atteintes dans cette zone.
- Zone B, qualifiée de zone affectée thermo-mécaniquement (ZATM) encadre le noyau de la soudure. Le matériau dans cette zone subit une déformation plastique liée aux mouvements de la matière combinés à l'élévation de température.
- Zone C, correspond à la zone affectée thermiquement (ZAT). La matière n'est plus sujette aux déformations plastiques. Elle est uniquement affectée thermiquement par la conduction de chaleur issue des deux autres zones.
- Zone D, le métal de base dont la microstructure et les propriétés sont inchangées

I.2. Partie 2 – le soudage par point par friction malaxage

I.2.1 Introduction

Récemment, une nouvelle technique de jointure appelée le soudage par points par friction malaxage (FSSW) ou le soudage par frottement a été développé [23-24]. Le soudage par friction malaxage s'applique pour la jointure des matériaux légers avec une haute performance et facilite la jointure entre deux matériaux différents et qui sont difficiles à souder à cause de la différence de la température de fusion et même les propriétés mécaniques. Quand FSSW est appliqué à la jointure des composants porteurs, la force des soudures devient critique. Cependant, puisque FSSW est une technologie plutôt développée récemment, l'état optimum de soudure n'a pas été encore établi. Il y a beaucoup de paramètres de traitement dedans le processus de FSSW, ainsi une étude systématique doit être fait afin de comprendre l'effet du paramètre individuel sur la microstructure et les propriétés mécaniques des soudures [25-26].

Dans un rapport précédent [27], certaines auteures ont indiqué les effets de la vitesse de rotation de l'outil et du temps porte-outil sur la force statique des soudages par points par friction malaxage, où la géométrie d'outil était fixe. La géométrie telle que la longueur de pion, la forme et la taille d'épaulement est également un paramètre principal, parce qu'elle affecterait la génération de chaleur et l'écoulement de matière plastique. Quelques études sur l'effet de la géométrie d'outil ont été faites par H Zaho et H Fuji [28-29], mais il y a eu des études très limitées sur FSSW [25].

I.2.2 Le principe général de procédé

Le soudage par points par friction malaxage (FSSW) sur deux pièces superposés l'une sur l'autre consiste à fournir de la chaleur au matériau de base due principalement à l'épaulement et le malaxage du matériau grâce au pion. L'épaulement et le pion constituent les principaux éléments de l'outil de soudage. La chaleur est générée essentiellement par le frottement entre l'outil et les plaques à souder et par la dissipation plastique [30]. Une couche de matériau sous forme plastique et pâteuse est formée. Ce procédé qui réalise l'assemblage à une température inférieure à la température de fusion du matériau à assembler, ce qui permet d'éviter les problèmes qui se produisent généralement à des moyens classiques de soudage (les porosités, des cloques, et à la fissuration, etc.) [31]. De plus, les caractéristiques mécaniques des matériaux soudés restent proches des valeurs initiales des matériaux de base.

Permettant un assemblage permanent de différents alliages le soudage par points par friction malaxage est un processus relativement récent.

Les différentes étapes de soudage par points par friction malaxage FSSW (Figure 10), L'outil tournant pénètre progressivement jusqu'à 80% environ de l'épaisseur des plaques à souder avec une force normale [32]. A la différence des autres types de soudage par friction malaxage,

L'outil ne se déplace pas dans la direction transversale pour former un cordon continu d'où Le malaxage de la matière de deux pièces superposées crée un point de soudure. Il se déroule en quatre phases : Plongée, malaxage, solidification et rétraction comme le montre la (Figure 10) [33]. Il commence par la rotation de l'outil avec un temps de plongée qui est fonction de la pénétration de l'outil, (Figure 10 a). Une fois la phase de plongée finie, l'outil est maintenu dans sa position en rotation et une force stable lui est exercée pendant un temps approprié pour échauffer et générer par friction au contact (outil/matière) une déformation plastique dans la zone malaxée en favorisant le malaxage de la matière (Figure 10 b). Ensuite, l'outil est maintenu dans sa position sans rotation pour la solidification de la soudure et obtenir le collage, (Figure 10 c). Une fois l'opération de la solidification est terminée, l'outil est rétracté, (Figure 11 d).

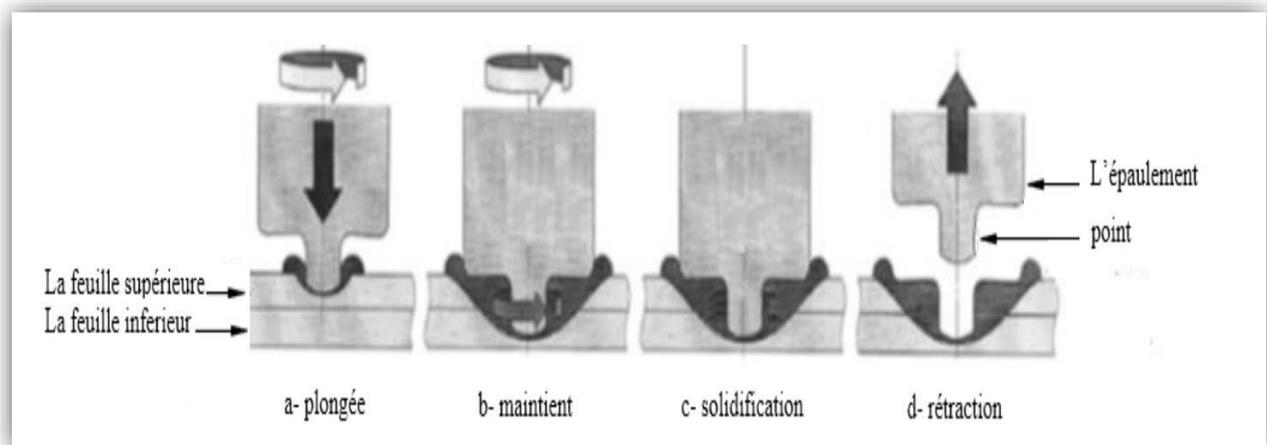


Figure 10 : Quatre phases du procédé de soudage par point par friction malaxage : a- plongée
b- maintien c- solidification et d- rétraction [33].

Les facteurs majeurs dans le procédé FSSW à savoir pour réaliser une soudure peuvent être répertoriés en se basant sur le réglage d'une configuration de soudage :

- **Forme de l'épaulement : concave ou plat avec rainure**
- **Forme du pion : très variable**
- **Vitesse de rotation de l'outil (W)**
- **Un temps de maintien (T_m)**
- **Effort de pénétration de l'outil dans la matière à souder (F)**

I.2.3 Avantages et limitations du procédé FSSW

Par rapport aux procédés de soudage classiques, le procédé de soudage par points par friction malaxage FSSW possède des avantages qui peuvent être classés comme suit :

I.2.3.1 Avantages liés au procédé

Assemblage des matériaux différents.

Assemblage par voie solide.

Possibilité de souder des matériaux dissemblables.

Large gamme d'épaisseurs soudables.

Ce procédé sans matière d'apport pour la réalisation de la soudure ce qui permet d'alléger des structures.

Ce procédé est lui-même la source d'énergie thermique.

I.2.3.2 Avantages liés à la soudure par FSSW

C'est un soudage à l'état pâteux qui permet d'éviter les problèmes rencontrés lors du soudage par fusion (les porosités, les cloques et les fissurations).

Conserver les caractéristiques originelles des matériaux.

Excellons propriétés mécaniques.

Effets limités des contraintes résiduelles.

I.2.3.3 Avantages économiques et environnementaux

Procédé non polluant (pas rayonnement ou de projections de fumées de soudage).

Procédé de bon économique en énergie électrique (lui-même la source d'énergie).

Pas de circulation d'huile ou d'eau de refroidissement.

I.2.3.4 Avantages liés à l'équipement

Possibilités d'automatisation.

Equipement électromécanique de conception simple de type machine-outil.

Pas des systèmes de protection thermique.

Exigence d'énergie électrique plus faible et une consommation limitée à l'outil

Possibilité d'un contrôle en ligne des paramètres.

I.2.3.5 Limitations de soudage

Les limitations du procédé de soudage FSSW peuvent être résumées comme suit :

Dû aux grands efforts mis en jeu le bridage très important.

La présence d'un trou après retrait de l'outil à la fin de la soudure.

Précipites la matière refoulée au bord de point de la soudure.

I.2.4 Couplage thermo-métallo-mécanique

Les aspects thermo-métallo-mécaniques décrits précédemment mettent en évidence les forts couplages physiques que fait intervenir le soudage par FSSW (Figure 11).

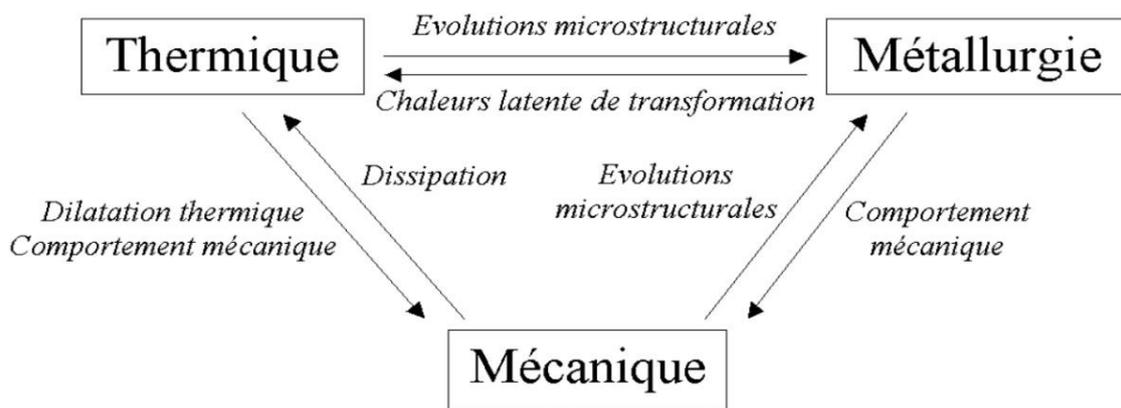


Figure 11 : Schéma des interactions [34]

I.2.5 Le cycle de soudage FSSW

I.2.5.1 Descriptions du cycle

La figure 14 illustre le déroulement d'un cycle FSSW. Pendant la totalité du cycle, la vitesse de rotation de l'outil reste constante, tandis que l'effort axial met un certain temps avant d'atteindre sa valeur seuil. En effet, après la mise en rotation de l'outil, le pion est contrôlé par une force croissante afin de pouvoir pénétrer les tôles Jusqu'à ce que l'épaule soit parfaitement en contact avec la surface des pièces c'est la phase 1 (figure 12-a). Cet effort de soudage est ensuite maintenu constant à la valeur prédéterminée phase 2 (figure 12-b), jusqu'au retrait de l'outil phase 3 (figure 12-c). En réalité, il est difficile d'obtenir un effort constant.

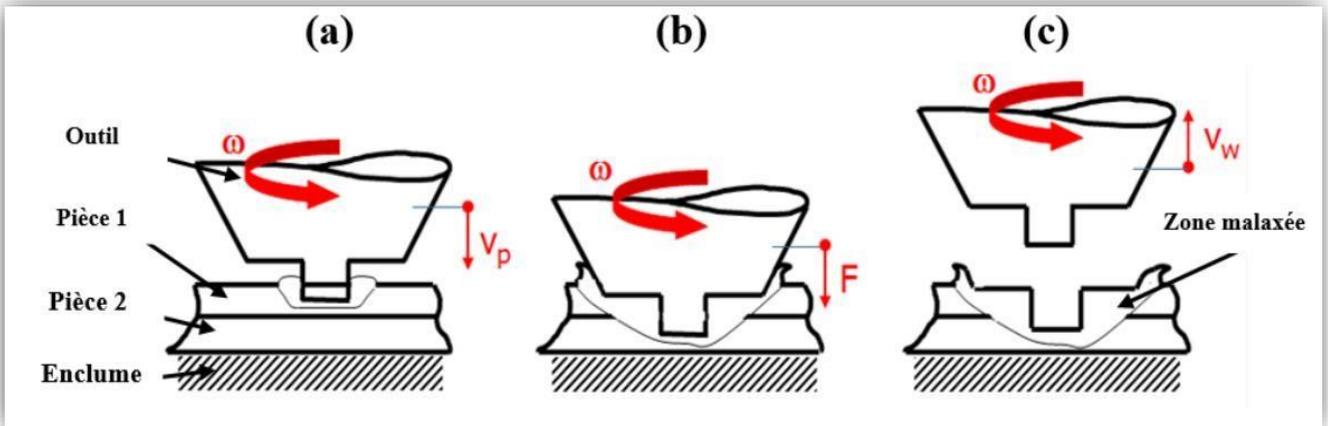


Figure 12 : Description du cycle de soudage par point par friction malaxage [35].

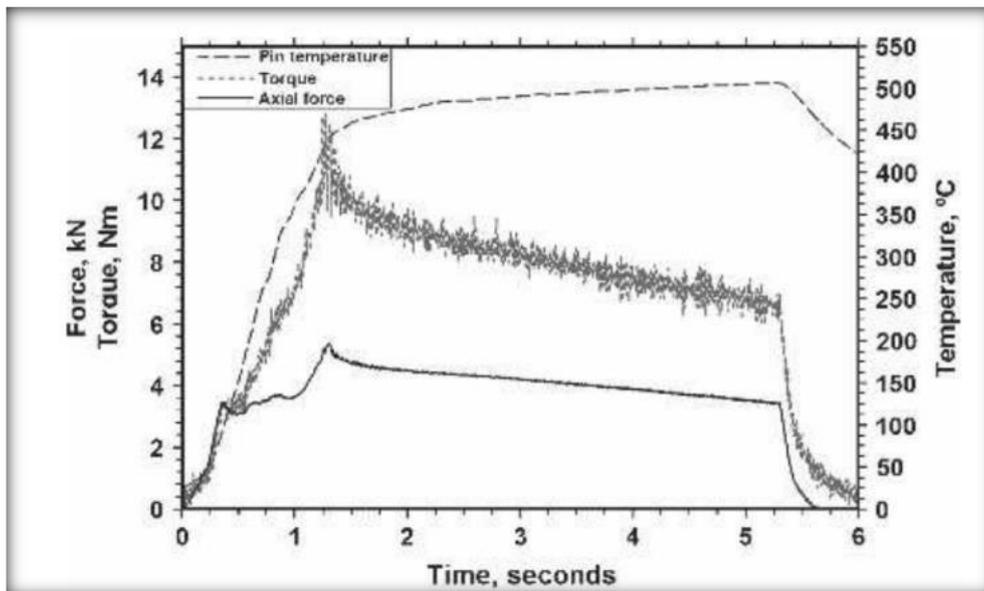


Figure 13 : Courbe de l'effort axial et du couple [36].

En ce qui concerne le couple, pendant environ un cinquième du cycle de pénétration, il augmente progressivement pour atteindre un pic (Figure 13). Puis, il diminue lentement pendant le reste du cycle. Il peut également être remarqué que la courbe du couple présente des oscillations continues pendant le soudage, qui peut être dues à une fusion locale qui sera expliquée par la suite.

I.2.5.2 Couple et énergie

La vitesse de rotation et la génération d'énergie jouent un rôle important dans la performance mécanique des points de soudure. En supposant que toute l'énergie mécanique induite pendant le soudage se transforme en une énergie thermique, elle peut suivre l'équation (1) suivante [37-38]

$$Q_{\text{appliqué}} = \overbrace{\sum_{n=1}^{n=N} \text{Force}(n)(x_n - x_{n-1})}^{\text{Descente de l'outil}} + \underbrace{\sum_{n=1}^{n=N} \text{couple}(n) \omega(n) \Delta t}_{200 \text{ fois plus grande}} \quad (1)$$

$Q_{\text{appliqué}}$: l'énergie thermique résultant du procédé FSSW (Joule).

Force : la force maximale appliquée par l'outil durant sa descente verticale (N).

x : la pénétration de l'outil (mm).

Couple : le couple associé à la rotation de l'outil

ω : la vitesse de rotation (Tr/s).

Δt : Temps de soudage (sec).

Le terme associé à la rotation de l'outil est environ 200 fois plus important que celui représentant la descente verticale de l'outil [39]. Ainsi, l'équation de l'énergie peut se résumer approximativement à l'énergie générée par la rotation de l'outil

$$Q_{\text{appliqué}} = \sum_{n=1}^{n=N} \text{Couple}(n) \omega(n) \Delta t \quad (2)$$

Le résultat indique alors que, l'énergie appliquée lors du soudage par point peut augmenter avec la vitesse de rotation. Toutefois, les travaux de Su. [39] ont montré que l'augmentation de la vitesse de rotation entraîne une réduction du couple. Ceci s'explique par une réduction de la viscosité de la matière.

De cette manière, il peut être supposé [40] que le terme « Couple (n) ω (n) » de l'équation (2) varie peu, et donc il peut être conclu que la principale variable qui affecte la génération d'énergie est le temps de soudage.

Tous ces phénomènes physiques sont fortement couplés par :

- L'effet des cinétiques thermiques vécues sur les évolutions microstructurales.
- L'influence des transformations métallurgiques sur les cinétiques thermiques par l'effet des chaleurs latentes de transformation.

- L'influence de la température sur le comportement mécanique et l'importance de la dilatation thermique sur l'équilibre mécanique.
- L'effet de l'état microstructural sur le comportement mécanique.
- L'influence de la dissipation mécanique sur les champs thermiques.
- L'intervention des déformations mécaniques sur les évolutions microstructurales

I.2.6 L'outil de soudage par point par friction malaxage

I.2.6.1 Différents types de l'outil de soudage

L'outil de soudage en FSSW est primordial, il comporte deux parties : un épaulement et un pion, il existe trois configurations d'outil possible qui sont :

L'outil conventionnel,

L'outil à pion rétractables,

L'outil double épaulement.

I.2.6.1.1 L'outil conventionnel

La figure 14 présente en un seul bloc (pion et épaulement solidaires), il n'y a pas de mouvement relatif possible entre le pion et l'épaulement. Le soudage s'effectue avec appui et frottement de l'épaulement sur une seule face, c'est la configuration les plus simples.



Figure 14 : Exemple d'outil pion fixe [41]

I.2.6.1.2 L'outil à pion rétractable

L'outil à pion rétractable (Figure 15) a la particularité de fonctionner avec un épaulement et un pion actionnés par deux axe machine indépendants l'un de l'autre (possibilité de mouvement relative) parmi les avantages de pion rétractable :

La longueur du pion réglable.

Il est soudé des pièces épaisseur variable le long du joint.

Élimination du trou présenté afin du soudage par point par friction malaxage.

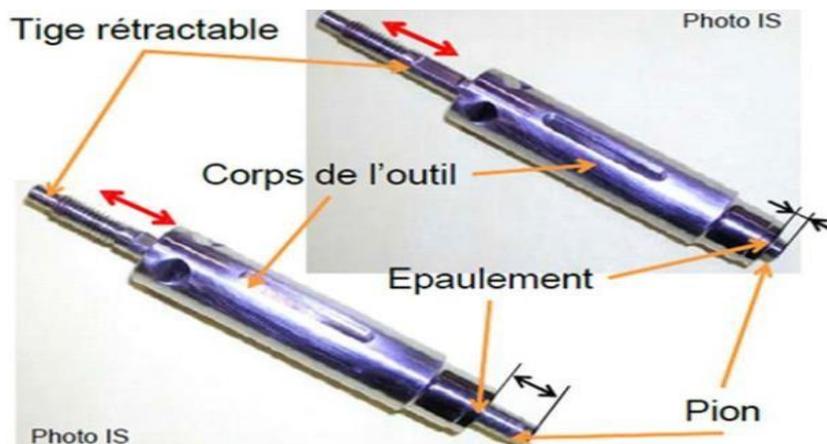


Figure 15 : Outil à pion rétractable [42]

I.2.6.1.3 Outils double épaulements

Ce type d'outil (Figure 16) possède deux épaulements positionnés côtés en droit et en vers des pièces à souder. L'apport de chaleur s'effectue par frottement des épaulements sur les deux faces des pièces. La distribution de température est alors symétrique à l'intérieur du joint. Pour une épaisseur identique l'effort de soudage sont plus faible que ceux nécessaire pour les deux technologies d'outil ce dessus la soudure obtenue et verticalement symétrique et le risque de manque de liaison est éliminé.



Figure 16 : Outil à double épaulements [43]

I.2.6.2 Présentation général de l'outil de soudage FSSW

Quel que soit l'outil FSW/FSSW, il se représente sous le format suivant (Figure 17) :

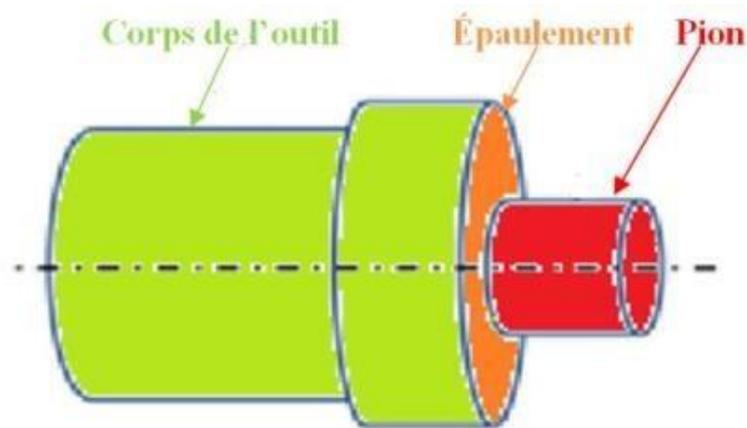


Figure 17 : Schématisation d'un outil FSW/FSSW

I.2.6.2.1 Epaulement d'un outil FSSW

L'épaulement et le pion conjointement contrôlent l'écoulement du métal [44]. L'épaulement est en contact direct avec les pièces à assembler, il applique une pression à la surface des pièces assemblées son premier rôle est d'amener de la chaleur par frottement et de confiner la matière malaxée sous l'outil, il permet de forger la matière en la bloquant au-dessous de l'outil. L'effort de forgeage au cours de la phase de soudage se traduit par une pression exercée principalement par l'épaulement sur la matière. Généralement, le contact épaulement / matière indique la fin de la phase de pénétration. En effet, cette dernière est achevée lorsque l'épaulement vient accoster sur la surface supérieure des pièces à souder.

La taille relative de l'épaulement par rapport au pion est primordiale [44,46], donc la chaleur générée par le frottement de l'épaulement avec la pièce influence directement ou indirectement la propriété du joint soudé, la rupture des joints FSSW d'aluminium à durcissement structural prend place dans la ZAT. L'adoucissement de la ZAT est principalement causé par la chaleur générée par le frottement entre l'épaulement de l'outil et la pièce [47] où la température maximale varie entre 360 °C et 370 °C. Lors du soudage, la température maximale se trouve au centre et diminue graduellement en s'éloignant du centre pour atteindre la température ambiante. Il existe toujours une zone où la température se situe entre 360 °C et 370 °C. La présence d'une zone à dureté réduite est pratiquement inévitable est indépendante de la dimension de l'outil et la vitesse de rotation l'effet du diamètre se limite à la distance entre le centre du joint et la zone à dureté réduite [48].

Le diamètre de l'épaulement doit être environ cinq fois supérieur à celui du pion afin d'augmenter l'efficacité du frottement. Afin d'améliorer les rôles de l'épaulement décrits précédemment, plusieurs formes ont été ajoutées ce dernier (figure 18). Le choix des formes reste dépendant de la configuration de soudage.

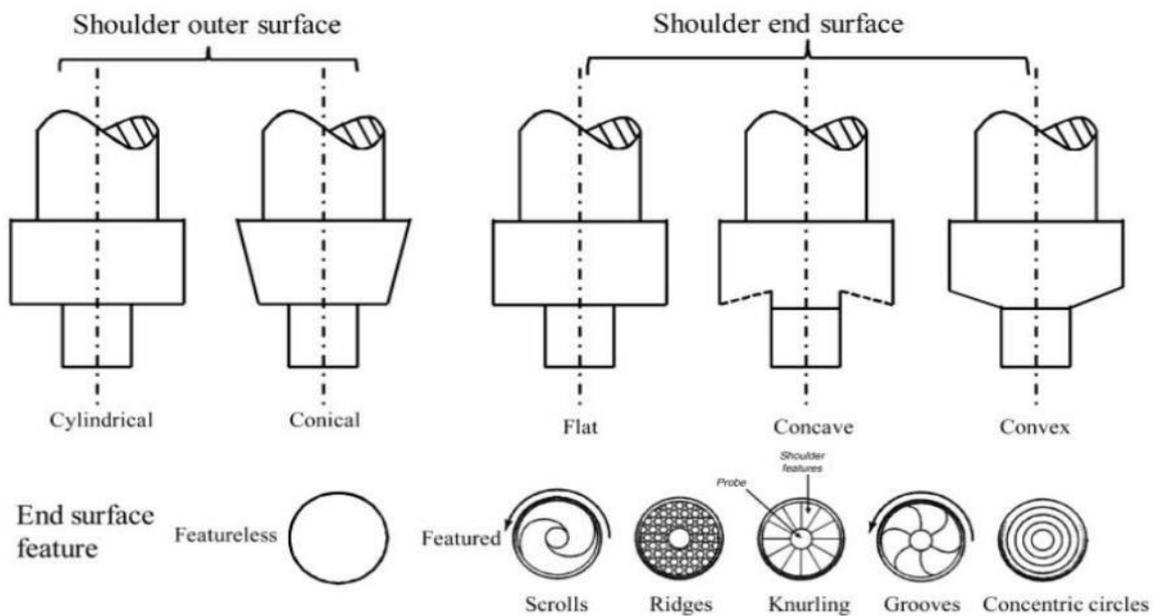


Figure 18 : Différentes géométries et formes utilisées pour l'épaulement d'un outil FSW/FSSW [49]

I.2.6.2.2 Le pion d'un outil FSSW

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 [50]. Le pion assure deux rôles : le malaxage de la matière et la génération de chaleur par frottement et déformation [51]. Le pion peut se présenter sous différentes formes.

Structure générale des assemblages obtenus par FSSW La microstructure [52] :

La figure 19 illustre la macro et la microstructure de différentes régions dans le soudage par friction-malaxage par points à la vitesse de rotation de 1000 tr/min, avec une profondeur de

plongée de l'outil de 0,2 mm et une tige cylindrique droite. La section transversale des soudures par friction par points a été divisée en quatre régions : la zone d'agitation (SZ), la zone affectée thermo-mécaniquement (TMAZ), la zone affectée thermiquement (HAZ), le matériau de base (BM), comme le montrent les figures 19 b, c, d et e. Les macro et microstructures ont révélé une résistance maximale au cisaillement par traction.

Ces structures peuvent être attribuées à la déformation vigoureuse des matériaux dans la TMAZ. Comme le montrent les figures 19 c et d, les grains de la SZ étaient légèrement plus fins en raison de la recristallisation dynamique provoquée par la force mécanique et la chaleur. La microstructure du HAZ était légèrement plus grossière, mais d'une structure très similaire à celle du métal de base, ce qui induit une valeur de dureté inférieure pour le HAZ.

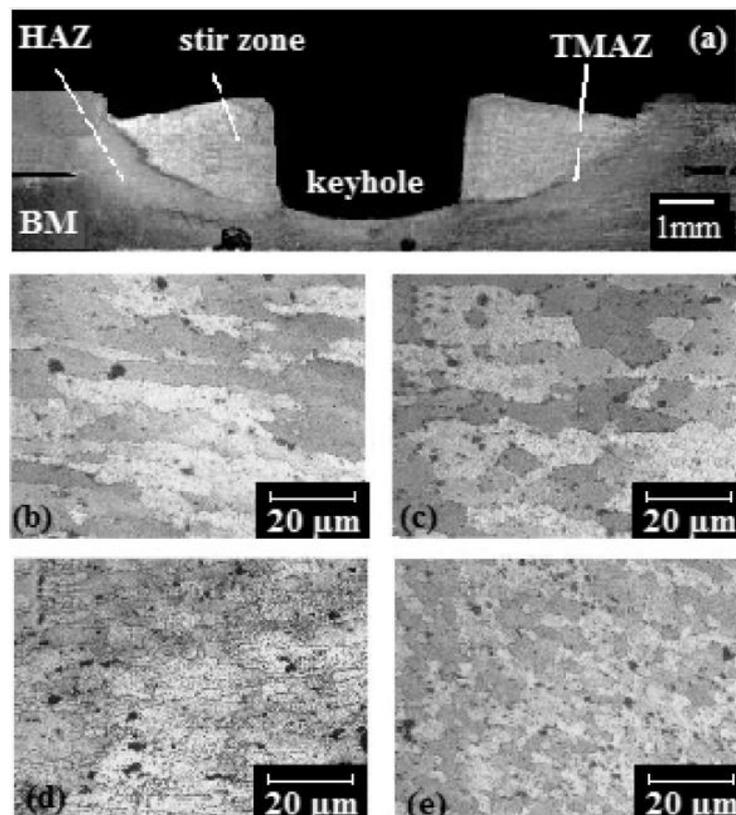


Figure 19 : Effet de la vitesse de rotation de l'outil de 1000 tr/min et de la profondeur de pénétration de l'épaulement de 0,2 mm avec une broche cylindrique sur la section du joint (a) Macrostructure de la section du joint et microstructures de (b)BM,(c)HAZ,(d)TMAZ,(e)SZ. [52]

Métal de base (BM) : les caractéristiques mécaniques et métallurgiques de cette zone restent invariantes après le soudage.

Zone affectée thermiquement (ZAT ; HAZ : Heat Affected Zone) : siège de modifications métallurgiques du métal de base. Dans cette zone, le matériau n'a pas subi de déformation plastique. Mais il a subi un changement microstructural dû à l'élévation de la température. Les changements subis dans cette zone sont très semblables à ceux observés dans les zones affectées thermiquement avec des procédés de soudage classiques. La ZAT est généralement une zone critique au niveau des propriétés mécaniques. Elle marque la zone de rupture pour la plupart des essais de traction d'un cordon de soudure par friction malaxage d'un alliage d'aluminium [53].

Zone affectée thermo-mécaniquement (ZATM ; TMAZ : Thermo-Mechanically Affected Zone) : Cette zone est à la fois affectée par la température et la déformation plastique provoquée par le pion. Elle est caractérisée par les déformations plastiques générées par le mouvement de l'outil. La combinaison du mouvement d'avance et de rotation de l'outil provoque une asymétrie de cette zone par rapport à son axe. Les grains subissent un allongement dans des directions marquant ainsi les directions d'écoulement de la matière autour de l'outil [53].

Le noyau de la soudure (ou nugget) : subit la plus grande déformation plastique et la température atteint des valeurs maximales. A cette température les précipités présents peuvent se dissoudre et les intermétalliques sont broyés et repartis par la grande déformation plastique. Le noyau subit une recristallisation dynamique. La structure cristalline du métal de base est complètement régénérée pour obtenir une structure plus fine (diamètre des grains de quelques micromètres). Elle se caractérise également par la présence d'ellipses concentriques dite (anneaux d'oignon). Cette zone occupe le centre de la soudure ainsi que la partie supérieure de la zone d'attaque. Nous pouvons aussi observer une zone qui se situe au-dessus du noyau dans la partie supérieure du joint. Elle se forme quand l'épaule vient forger la matière et sa microstructure est entièrement recristallisée [53].

I.3. Partie 3_ Aluminium et ses alliages

I.3.1 INTRODUCTION

L'aluminium est un matériau qui a connu beaucoup de changements ces dernières années. En effet, l'essor et le développement de la recherche a fait apparaître de nouveaux alliages d'aluminium adaptés à de très nombreuses applications spéciales. C'est la raison pour laquelle ce métal léger trouve son application dans des domaines où il semblait encore inadapté, il y a quelques années.

L'aluminium et ses alliages sont présents sous les formes les plus variées, pratiquement sur tous les marchés ou domaines d'application.

L'aluminium non allié (pur) possède des propriétés mécaniques très réduites, et insuffisantes pour son utilisation dans bon nombre d'applications structurales.

Depuis longtemps, les métallurgistes ont montré qu'en ajoutant certains éléments à l'aluminium, ses propriétés changent et que certaines additions ont l'intérêt d'augmenter par différents processus leurs propriétés mécaniques, électriques et thermodynamiques.

On peut considérer qu'aujourd'hui, les chercheurs disposent d'éléments suffisants pour obtenir une microstructure optimale répondant à des exigences précises. Cela dépend essentiellement de l'addition dans la matrice d'aluminium.

I.3.2 Propriétés physiques et chimiques de l'Aluminium

Les alliages d'aluminium ont pris, au cours des 60 dernières années, une place importante dans beaucoup de domaines et occupent la deuxième place parmi les métaux utilisés, après les matériaux en acier et en Titan. C'est dans le domaine de transport que se situe leur principale application, suivis de ceux du bâtiment et de la construction de machines.

Depuis de nombreuses années également, l'aluminium est un matériau attrayant pour l'industrie de l'emballage.

L'essor économique et technique de l'aluminium est dû à une combinaison intéressante de propriétés, dont :

- La faible densité.
- La conductibilité thermique et électrique élevées.
- La grande ductilité même à basses températures.

- La stabilité chimique.
- La conformité avec les prescriptions d'hygiène.

Souvent aussi, on choisit l'aluminium en raison d'autres propriétés, comme l'absence d'étincelles, la neutralité magnétique ou l'incombustibilité. On distingue entre l'aluminium de grande pureté, l'aluminium pur et les alliages d'aluminium à base de manganèse, de silicium, de cuivre ou de zinc, dont la principale fonction est d'augmenter la résistance mécanique. L'augmentation de la résistance mécanique ne s'obtient pas seulement par solidification de cristaux mixtes, mais également par écrouissage ou par durcissement structurale.

On note la densité nettement plus faible, le point de fusion très bas, mais également la chaleur de fusion élevée et le point de fusion très élevée de l'oxyde d'aluminium. L'aluminium ne présente pas de couleur incandescente au point de fusion.

À température ambiante, les cristaux d'aluminium sont à mailles cubiques à faces centrées et ne sont pas sujet à transformation, si bien que l'aluminium ne peut pas développer de structure de trempe comme la martensite. Une fragilisation à froid ne se produit pas sur l'aluminium.

I.3.3 Les éléments d'addition dans les alliages d'aluminium

Les éléments d'addition et, en particulier, les éléments de transition, jouent un rôle très important dans la métallurgie de l'aluminium [54].

La teneur des éléments d'addition est limitée par le facteur de solubilité. Les éléments d'addition les plus répandus dans les alliages d'aluminium sont le cuivre, le magnésium, le manganèse, le zinc, le fer et le silicium. Ces derniers ont plus ou moins une influence sur les caractéristiques de l'AlMgSi. Ils peuvent en même temps améliorer ou détériorer les propriétés physiques, chimiques et technologiques de l'aluminium pur [55].

Un certain nombre d'éléments d'addition sont rajoutés dans certains alliages pour donner une propriété particulière [56].

Les alliages à base d'aluminium contiennent habituellement une certaine quantité de cuivre, de manganèse. Ces éléments peuvent être aussi ajoutés délibérément pour fournir les propriétés matérielles spéciales. La présence de magnésium améliore la trempabilité du matériau. Le manganèse est habituellement ajouté pour réduire les effets néfastes des impuretés comme le fer. Les éléments d'alliages peuvent entrer partiellement dans la solution solide α et former en partie les particules intermétalliques. La composition des composés intermétalliques dépend du procédé de solidification lors de l'élaboration de l'alliage. Parmi tous les éléments présents, le fer est

probablement le plus important parce qu'il a une affinité avec plusieurs éléments d'addition tel que Mn, Cr et Si. Il peut former ainsi une large gamme de composés intermétalliques lors du procédé de fabrication tels que $\alpha\text{Al}_{15}(\text{Mn,Fe})_3\text{Si}_2$ et $\beta\text{-Al}_5\text{FeSi}$. Ces composés intermétalliques sont nuisibles aux propriétés mécaniques des alliages lorsque leur taille excède $3\ \mu\text{m}$ [61]. En revanche, ils présentent l'avantage de la résistance au fluage à hautes températures.

Les éléments Mn et Cr se caractérisent par une faible solubilité dans les alliages d'aluminium. L'introduction de Magnésium et de Chrome modifie de façon générale la forme, éventuellement la taille des grains [57], améliore la ductilité et la ténacité. Le

Magnésium et le Chrome sont souvent utilisés dans les alliages d'aluminium pour éviter la recristallisation au cours de la mise en solution.

L'addition de Magnésium dans les alliages d'aluminium facilite la précipitation dans les joints de grains, réduit la proportion de Si en solution dans les alliages Al-Mg-Si par la formation des précipités de type AlMnSi et réduit ainsi la précipitation de Si et de Mg_2Si dans les joints de grains [58].

I.3.4 Désignation des différents alliages d'Aluminium

La désignation des alliages d'aluminium s'effectue suivant un système de 4 chiffres [59]. Le premier chiffre de la série indique le principal élément alliant en présence et les chiffres subséquents indiquent la composition, tableau 1.

Nous désignerons les alliages d'aluminium corroyés suivant les normes de l'association d'aluminium. Ces normes affectent à chaque type d'alliage un nombre de quatre chiffres qui permet de les classer en séries

Table 1 : Désignation des séries principales des alliages d'Aluminium [60].

Série	Désignation	Élément principal	d'alliage Phase présente dans l'alliage	principale Domaines d'application
1000	1XXX	99% d'Al au minimum	-	Emballage
2000	2XXX	Cuivre (Cu).	Al ₂ Cu, Al ₂ Cu/Mg	Automobile, Aviation
3000	3XXX	Manganèse (Mn).	Al ₆ Mn	Industrie chimique
4000	4XXX	Silicium (Si).	-	
5000	5XXX	Magnésium (Mg).	Al ₃ Mg ₂	Architecture, Conserves
6000	6XXX	Magnésium (Mg) et Silicium (Si)	Mg ₂ Si	Automobile
7000	7XXX	Zinc (Zn).	MgZn ₂	Aviation
8000	8XXX	Autres éléments.	-	-
9000	-	Non utilisé.	-	-

I.3.5 L'alliage d'aluminium 7075

L'alliage d'aluminium 7075 (AA7075) est un alliage d'aluminium avec du zinc comme élément d'alliage principal. Il possède d'excellentes propriétés mécaniques et présente une bonne ductilité, une résistance élevée, une ténacité et une bonne résistance à la fatigue. Il est plus sensible à la fragilisation que de nombreux autres alliages d'aluminium en raison de la microségrégation, mais a une résistance à la corrosion nettement meilleure que les alliages de la série 2000. C'est l'un des alliages d'aluminium les plus couramment utilisés pour les applications structurelles fortement sollicitées et a été largement utilisé dans les pièces structurelles d'avions.

La composition de l'alliage d'aluminium 7075 comprend environ 5,6 à 6,1% de zinc, 2,1 à 2,5% de magnésium, 1,2 à 1,6% de cuivre et moins d'un demi pour cent de silicium, de fer, de

manganèse, de titane, de chrome et d'autres métaux. Il est produit dans de nombreuses trempes, dont certaines sont 7075-0, 7075-T6, 7075-T651. [62]

I.3.5.1 Propriété mécanique et caractéristiques physiques du 7075 [63]

Les caractéristiques physiques et mécaniques de cet alliage sont groupées dans le tableau 3

Table 2: Caractéristiques physiques de L'alliage 7075.

Masse volumique (g/cm³)	2,80
Intervalle de fusion	475-630
Coefficient de dilatation linéique (0 à 100 °C) (10⁻⁶ K⁻¹)	23,5
Module d'élasticité (MPa) (1)	72 000
Coefficient de Poisson	0,33
Conductivité thermique (0 à 100 °C) (W m⁻¹ K⁻¹)	État T6 : 130
Résistivité à 20 °C (μΩ cm)	État T6 : 5,2
Capacité thermique massique (0 à 100 °C) (J kg⁻¹ K⁻¹)	915
Limité d'élasticité RP0.2 (MPa)	470 (3)
Limité à la rupture Rm (MPa)	535 (3)
Allongement (%)	8 (3)
Limité d'élasticité RP0.2 (MPa)	390 (4)
Limité à la rupture Rm (MPa)	475 (4)
Allongement (%)	7 (4)

- ❶ Moyenne des modules de traction et de compression
- ❷ Tôle laminée état T6, épaisseur entre 3.2 et 6 mm
- ❸ Tôle laminée état T7351, épaisseur entre 6 et 25 mm
 - À l'état T6 : la revenu confère une dureté maximale.
 - À l'état T73 : le 7075 est utilisé toutes les fois qu'il est nécessaire d'obtenir une bonne résistance à la corrosion sous tension dans le sens travers court (T.C).
 - À l'état T76 : on confère au 7075 une bonne résistance à la corrosion exfoliante, combinée à des caractéristiques mécaniques relativement élevée, c'est à dire supérieures à celles obtenues à l'état T73 mais restent cependant diminuées par rapport à l'état T6. La résistance à la corrosion sous tension correspondant à T76 est meilleure de façon significative que celle à T6 mais moins bonne qu'à l'état T73.

I.3.5.2 Domaine d'application du 7075

Le 7075 est utilisé comme surfaces supérieures des ailes et surfaces inférieures, stabilisateurs vertical, les body frames et les stringers. [62] Cet alliage couvre aussi de nombreuses applications dans le domaine d'armement douilles de munitions, corps de roquette, plaque de blindage, sport.

I.3.5.3 Avantages et inconvénients

Ces alliages présentent actuellement un intérêt grandissant du fait de certaines de leurs propriétés qui sont les suivantes :

- Intervalle de MES très vaste (320- 350°C).
- Faible sensibilité à la vitesse de trempe.
- Durcissement important pouvant être obtenu par simple maturation à la température ambiante (état T1, T4) et qui peuvent être complété par un revenu à basse température (100 - 160°C) (T5, T6).
- Soudabilité opératoire satisfaisante En contrepartie, ces alliages présentent les deux inconvénients suivants :
 - Dans le cas d'assemblages soudés non traité thermiquement après soudage, présence de part et d'autre du cordon de soudage d'une zone sensible à la corrosion exfoliante qui dépend de l'épaisseur des produits et des conditions de soudage.
 - Résistance à chaud relativement faible dé que la température est plus élevée et que la durée de maintien à chaud est plus longue

I.3.6 Soudage des alliages d'aluminium

L'aluminium est l'un des métaux non ferreux les plus importants dans les applications industrielles. L'aluminium et ses alliages sont largement utilisés dans les éléments de construction des industries automobile et aérospatiale, car ils présentent de bonnes propriétés mécaniques et métallurgiques. La plupart des produits d'aluminium sont assemblés à partir de pièces constitués d'alliages d'aluminium qui contient des éléments d'addition tels que Mg, Zn, Cu et Mn afin d'améliorer les propriétés mécaniques et la résistance à la corrosion. De nombreux chercheurs ont indiqués que les propriétés mécaniques d'un joint d'Al ou de ses alliages soudés par friction présentaient de bonnes caractéristiques [64].

Dans les auteurs ont réalisé des études expérimentales incluant sur des joints soudés par friction à partir de tiges en alliage d'aluminium 6061 présentant diverses géométries d'interface. H. K. Rafi et al [65] ont étudiés les effets des paramètres de processus sur la microstructure et les propriétés de traction des soudures par friction de l'alliage AA7075-T6.

Les résultats expérimentaux montrent que l'utilisation de grandes valeurs pour le la pression de friction (114 MPa), vitesse de rotation de la broche (2000 tr/min) et raccourcissement axial (4 mm) est bénéfique pour maximiser la résistance du joint. Les soudures par friction présentent trois caractéristiques microstructurales distinctes (Figure20). Zone affectée thermomécaniquement (ZATM), Zone affectée par la chaleur (ZAT).

Le profil de dureté montre une certaine symétrie sur l'interface de soudure. Sur les deux côtés fixes et en rotation, il y a une diminution significative de la dureté dans les régions ZAT et TMAZ. Dans la zone malaxer (ZM), une augmentation considérable de la dureté était observée par rapport à la zone ZAT.

Les alliages d'aluminium 5083, qui ont été exposés à de fortes déformations plastiques, ont été soudés par friction et la variation des propriétés mécaniques des joints a été étudiée expérimentalement par Mumin Sahin et al [66].

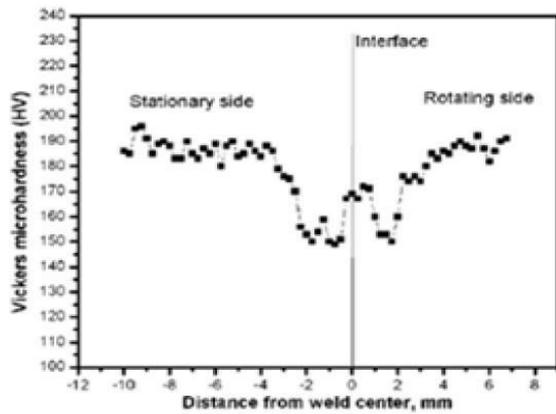


Figure 21 : Profile de dureté à travers une soudure par friction d'AA7075 – T6 [67]

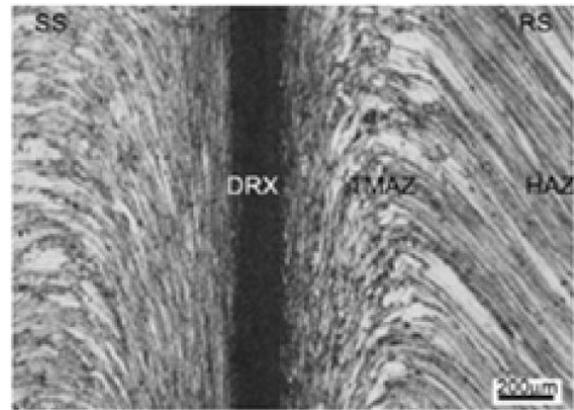


Figure 20: Caractéristiques microstructurales de la ZAT d'une soudure par friction de AA7075 – T6 [67]

I.3.6.1 Soudage FSSW des alliages d'aluminium [68]

La méthode de soudage par points par friction (FSSW) est utilisée comme choix pour le soudage des alliages aluminium car il s'agit d'une technologie de soudage sans fusion ou à l'état solide adaptée pour assembler des tôles de faible densité et minces, y compris des alliages de cuivre et de magnésium. Ce processus est établi à une température inférieure à la température de fusion de l'aluminium et ainsi, l'impact de l'apport de chaleur sur la microstructure, les constituants et les propriétés mécaniques des alliages d'aluminium est limité, car aucune fusion en vrac du métal de base de l'aluminium ne se produit. Les alliages d'aluminium difficiles à souder tels que les composites à matrice d'aluminium avancés et les alliages d'aluminium aérospatiaux (séries 2xxx et 7xxx) avec des résistances élevées, des résistances à la fatigue et à la rupture [3] peuvent être soudés de manière satisfaisante par des technologies de soudage par friction, respectivement. La technologie du soudage par points par friction des alliages d'aluminium progresse pour éliminer les sites à forte concentration de contraintes (défauts de soudure) et pour améliorer les propriétés mécaniques des soudures soit par la modification des profils d'outils, la création de complexité du mouvement de l'outil ou l'introduction de systèmes de support de soudure. Les profils d'outils ont été extrêmement variés, allant de la forme cylindrique, triangulaire, conique, conique, filetée à la forme hémisphérique, tandis que le soudage par points par friction a également été associé à des vibrations ultrasoniques et à un faisceau laser. Amélioration de la résistance de la soudure de l'alliage d'aluminium AA6061 en intégrant des vibrations ultrasonores dans le FSSW, tandis que le soudage par friction-malaxage au laser hybride et le soudage par friction assisté par laser à diode ont également été appliqués sur les alliages d'aluminium AA6061-T6 et AA2024-T351. Cependant, l'accent est mis sur la compréhension du mécanisme d'usure des outils et d'autres domaines saillants dans chacune des variétés innovantes de FSSW.

1.3.7 Conclusion

Le soudage par point par friction malaxage présente beaucoup d'avantages par rapport aux différents procédés de soudage, tels que la facilité de mise en œuvre et la basse relative de la température de soudage (inférieure à la température de fusion), et offre des solutions aux difficultés d'assemblage des matériaux dissemblables ou des matériaux d'épaisseur différent, comme il est idéal pour le soudage d'aluminium. Dans la suite de notre travail, nous avons focalisé notre intérêt sur le procédé de soudure par point par friction-malaxage (FSSW).

II. CHAPITRE 2
TECHNIQUES ET
PROCEDURES
EXPERIMENTALE

II.1. INTRODUCTION

La nécessité d'économiser de l'énergie dans divers secteurs industriels a conduit à la création de nouvelles techniques d'assemblage, comme le soudage FSSW, qui facilite l'association d'alliages d'aluminium difficiles à assembler avec d'autres procédés anciens de soudage.

Dans cette partie, nous ferons le processus de soudage FSSW sur l'alliage d'aluminium Al7075. Nous allons essayer différents paramètres de vitesse de rotation ; afin d'obtenir les meilleurs réglages qui donnent le meilleur assemblage en termes de dureté et d'intensité.

II.2. Réalisation de soudure

II.2.1 Matériau utilisé

Les plaques du type 7075-T6 sont élaborées au sein de l'atelier de mécaniques de CRTI. C'est des plaques de forme rectangulaire avec 100 mm de longueur 30 mm de largeur et à épaisseur de 2 mm, plane sans aucune forme (Figure 22).



Figure 22 : Plaques d'aluminium du type 7075-T6.

II.2.2 Outil de soudage

Les soudures ont été réalisées à l'aide d'un outil de soudage par point par friction malaxage FSSW réalisé avec un Acier à outils à haute résistance. L'outil de soudage est composé d'un matériau qui possède un bon comportement à chaud et une dureté supérieure à l'Aluminium.

Dans ce processus, nous avons utilisé d'un outil montré dans le (Figure 23)

Epp 14 il est composée d'un pion ($D=3.88$ mm) et de longueur 3.43 mm avec un épaulement plat de diamètre 14 mm



Figure 23 : L'outil FSSW EPP14.

II.2.3 La machine de soudage

Le principe de base du procédé FSSW est effectué sur une fraiseuse Universelle **modifiée** semi-automatique trois axes (figure 24). Cette machine est largement utilisée pour les opérations d'usinage dans l'industrie.



Figure 24 : Machine de soudage (fraiseuse Universelle type russe 1965)

► La machine mise en place

En soudage par point par friction malaxage, on utilise classiquement une machine 3 axes.

On retrouve couramment la configuration suivante qui est représentée sur la figure 25

- l'axe x,y, piloté en position, qui permet de positionner l'outil par rapport à contre des deux tôles superposées (figure 26)
- l'axe z, piloté en déplacement ou en effort, perpendiculaire aux tôles, permettant de piloter les phases de pénétration et de retrait (1 axe). Cet axe comprend également la rotation de l'outil (axe de la broche).

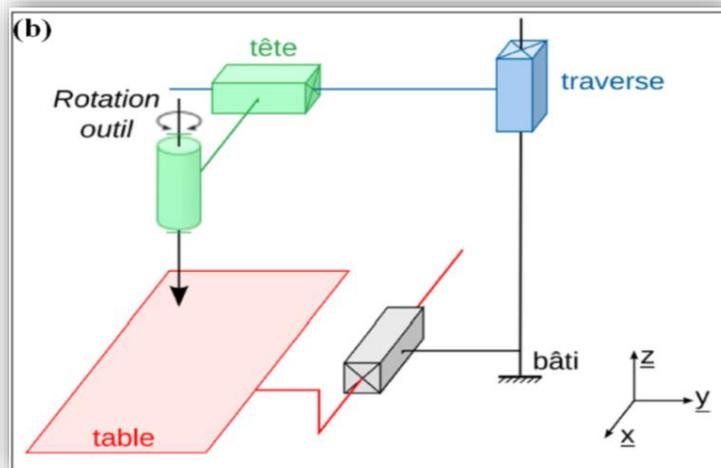


Figure 25 : Schéma cinématique, représentation des axes

Pour réaliser un point de soudure, les tôles sont superposées (figure 26) et positionnées sur un plateau fixé au bâti de la machine, et calées entre des plaques pour éviter leur rotation. Il y a également un système de serrage associé à une bride pour garantir leur maintien et ainsi éviter des mouvements des tôles (figure 27).

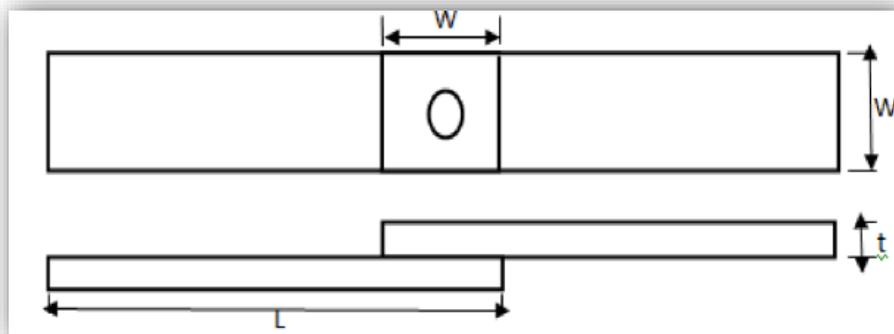


Figure 26 : Représentation schématique des plaques superposées l'un sur l'autre avec $W = 30 \text{ mm}$ $t = 2 \text{ mm}$ $L = 100 \text{ mm}$



Figure 27 : Système de bridage.

II.2.4 Paramètres de soudage

Les différents paramètres utilisés sont regroupés en détail pour toutes les soudures du procédé FSSW dans le tableau ci-dessous. Nous avons varié la vitesse de rotation de l'outil de 725 à 1800 tr/min, la profondeur de plongé de 3.2 à 3.4 mm

Table 3: Paramètres utilisés pendant le soudage par FSSW. Vitesse de rotation : N (tr/min), Distance de pénétration : Hp(mm) ; Temps de maintien : Tm (S).

Vitesse de rotation (tr/min)	Profondeur de pénétration (mm)	Temps de maintien (s)
725	3.2	15
725	3.4	15
945	3.4	15
945	3.4	15
1500	3.4	15
1500	3.4	15
1800	3.4	15

II.3. Caractérisation de soudure

II.3.1 Caractérisation microstructurale

L'examen micrographique a pour but de mettre en évidence la structure de la soudure par observation au microscope. Pour ce faire, une préparation métallographique des échantillons représentatifs pour obtenir une surface polie et plane est nécessaire. Ceci implique un polissage.

Le Polissage

L'examen de la microstructure a été effectué sur une coupe transversale sur quatre joints soudés par FSSW de métaux similaires (AL7075-T6) (figure 28), avec différents vitesse de rotation (figure 29), les paramètres de soudage utilisé pour ces quatre échantillons sont présentés dans le (tableau 4).

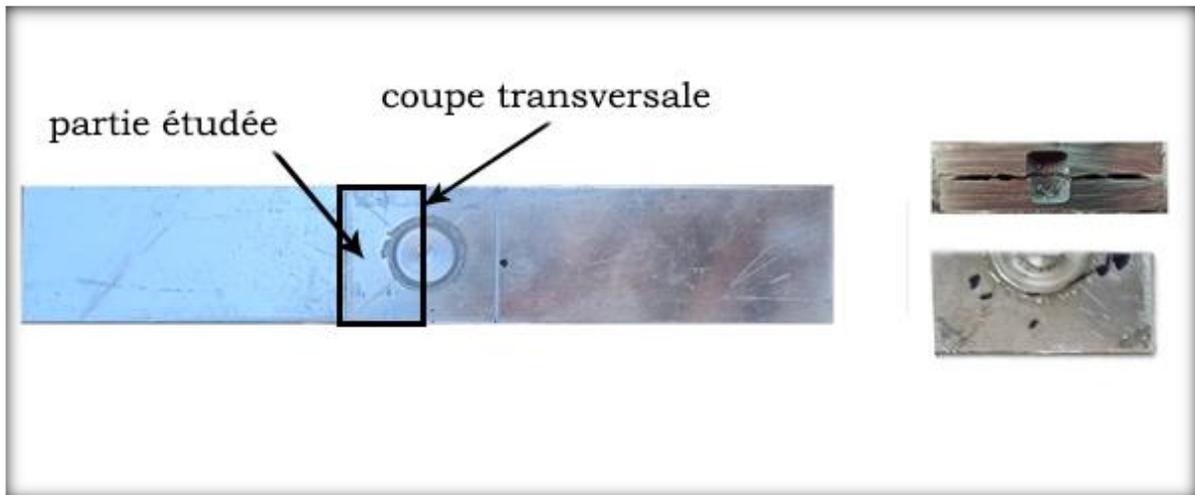


Figure 28 : Coupe transversale sur les joints

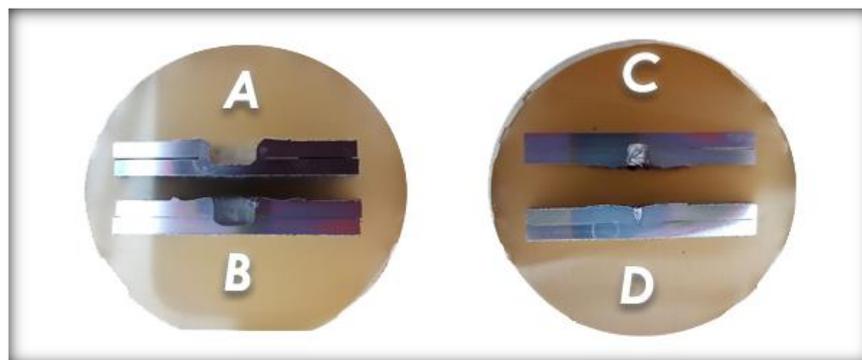


Figure 29 : Echantillons A, B, C, et D

Table 4 : Paramètres utilisé pour le soudage par FSSW.

Echantillon	N, tr/min	Hp, mm	Temps maintien, s
C et D	710	3.2	15
A	945	3.4	15
B	1500	3.4	15

Le polissage est nécessaire avant de prendre les mesures de microdureté, pour avoir un état de surface sans aucune rayure susceptible de gêner l'enfoncement du A l'aide d'une machine de polissage (Figure 30), le polissage des échantillons passe par des papiers abrasifs Si-C (800, 1200, 2400).



Figure 30 : MECATECH 264 (Polissage automatique)

II.3.2 Caractérisation mécanique

Pour évaluer la résistance du joint de soudure, des essais mécaniques ont été réalisés. Dans cette étude, nous avons réalisé deux essais mécaniques différents : l'essai de traction cisaillement, l'essai de micro-dureté. Le protocole expérimental de chaque essai présenté dans cette partie.

II.3.2.1 Essai de traction global

II.3.2.1.1 Machine d'essai

Les essais de traction ont été réalisés sur une machine de traction compression MTS Criterion™ Model 45 (Figure 31) au niveau du laboratoire mécanique du centre de recherche en technologie industriel à température ambiante (20 à 25°C).

Les essais de traction ont été réalisés sur une machine de traction, pilotée par le logiciel TWE. Au cours des essais, deux valeurs sont enregistrées : la charge appliquée et la déformation. En traction, la mesure de la déformation s'effectue à l'aide d'un extensomètre.

Pour satisfaire les conditions de changement quasi-statique les tests de traction ont été une vitesse de déformation de la traverse fixée à 0.05 mm/min d'après la norme ISO 7500-1 et ISO 9513.



Figure 31 : Machine de traction (MTS Criterion™ Model 45).

II.3.2.1.2 Essais de traction-cisaillement sur les éprouvettes soudées

Les éprouvettes utilisées ont été préparées suivant les indications de la figure 32. Des petites plaques de soutien sont exigées pour des éprouvettes afin d'éviter la force asymétrique de cisaillement de la zone de soudure pendant l'essai de traction

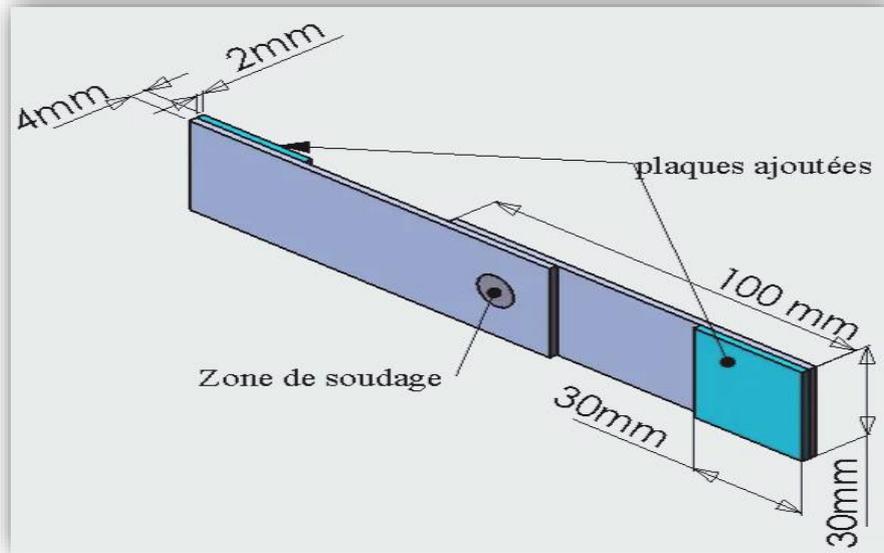


Figure 32 : Eprouvettes préparées pour l'essai de traction.

La figure 33 montre la vue en coupe de l'arrangement de l'essai de traction de soudage FSSW.

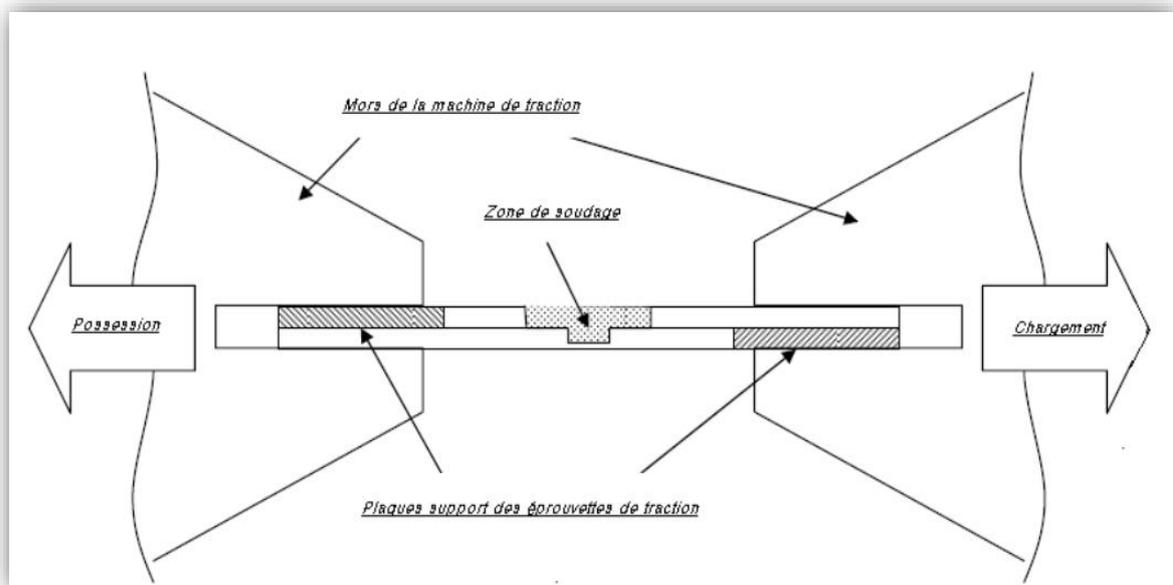


Figure 33: Section transversale de l'arrangement de l'essai de traction de FSSW

La charge et le déplacement ont été simultanément enregistrés pendant l'essai de traction (figure34).



Figure 34 : Essai de traction d'une éprouvette soudée par FSSW

II.3.2.2 Les essais de traction : avec Technique de corrélation d'images digitales (DIC)

Dans cette partie, nous présentons une analyse basée sur la surveillance des champs de déplacement et du champ de distorsion par la technologie Digital Image Corrélation (CID) en utilisant le matériel montrés dans la figure 35.

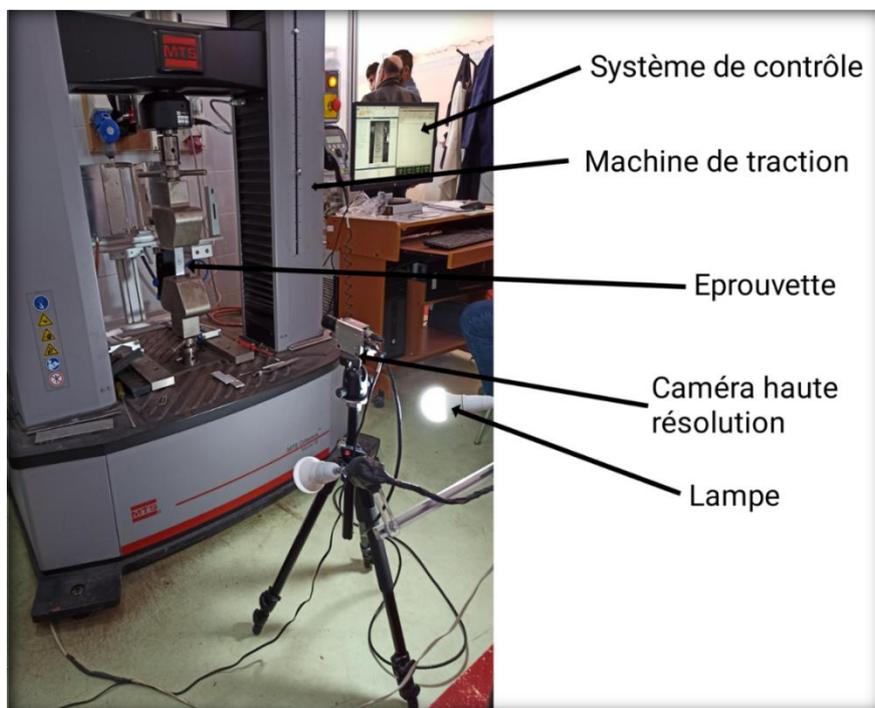


Figure 35 : Matériel utilisé pour la corrélation d'image digitale.

Dans cette étude, on va préparer un mouchetis sur notre éprouvette projeté sur la zone d'étude de ses éprouvettes permettant d'obtenir des gains noirs et blancs d'un diamètre moyen de 30 μm . Un mouchetis est l'ensemble de petites tâches disposées de façon aléatoire sur la surface à étudier.

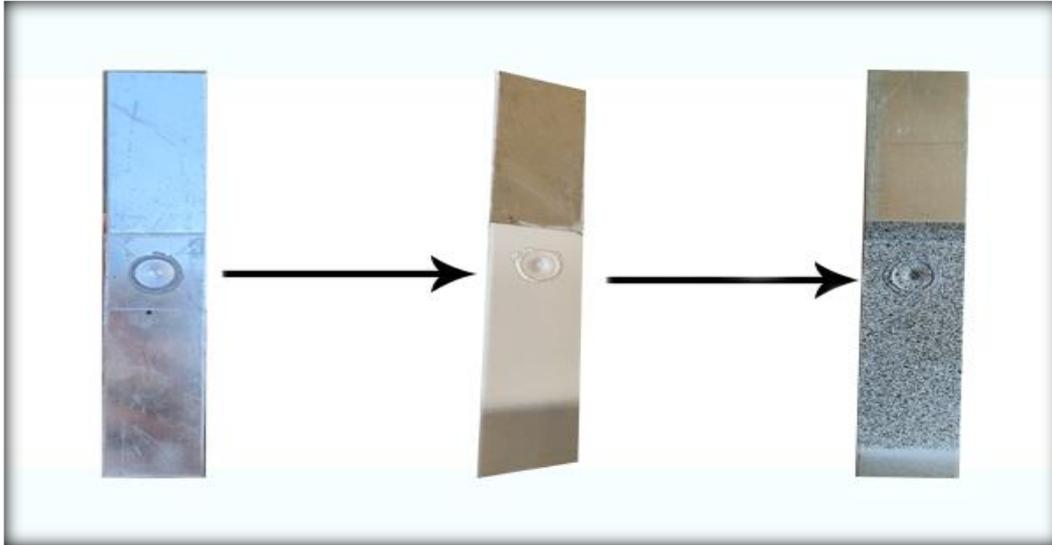


Figure 36 : Etapes de préparation de mouchetis dans les éprouvettes

La surface de l'échantillon est éclairée en lumière blanche synchronisée et les images sont numérisées et stockées tout au long de l'essai grâce à une caméra rapide et un disque dur raid et bus spécifique. On compare chaque image, successivement enregistrée, par la première image (référence) et on mesure pour chaque point la distance qu'il a parcourue entre t_0 et t_1 .

La caméra utilisée est une petite caméra de la famille Imager Compact de «eledyne DALSA » (figure 37) qui possède des caractéristiques identiques de dynamique et de résolution. Ces caractéristiques sont les suivantes :

- Différentes résolutions de 640 x 480 pixels à 1600 x 1200 pixels.
- Différents taux d'images de 12,5 à 60 images par seconde en résolution pleine.



Figure 37 : Camera « eledyne DALSA ».

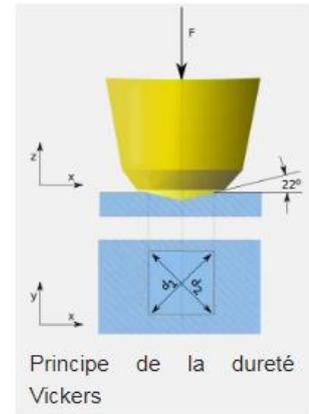
II.3.3 Mesure de microdureté

II.3.3.1 Essai de Dureté Vickers

Principe : La mesure de dureté Vickers se fait avec une pointe pyramidale normalisée en diamant de base carrée et d'angle au sommet entre faces égal à 136° . L'empreinte a donc la forme d'un carré ; on mesure les deux diagonales d_1 et d_2 de ce carré à l'aide d'un appareil optique. On obtient la valeur d en effectuant la moyenne de d_1 et d_2 . C'est d qui sera utilisé pour le calcul de la dureté. La force et la durée de l'appui sont également normalisées.

$$HV = \frac{2F \cdot \sin\left(\frac{136^\circ}{2}\right)}{g \cdot d^2}$$

HV = Dureté Vickers.
F = Force appliquée [N]
d = Moyenne des diagonales de l'empreinte [mm]
g = Accélération terrestre. [$m \cdot s^{-2}$] (9.80665)



Le degré de dureté, noté Hv, est ensuite lu sur un abaque

(Une table) ; il y a un abaque par force d'appui



Figure 38: Micro uromètre Utilisée (BUELER 1600/4300).

Une prise d'empreintes est réalisée sur nos échantillons A et B représenté dans la figure 29 avec un pas de 1 mm suivant X et une force $F = 500 \text{ mN}$. Il s'agit de balayer tout le long de nos éprouvettes assemblées par FSSW. la méthode utilisé pendant nos essais et représenté dans le schéma suivant (figure 39).

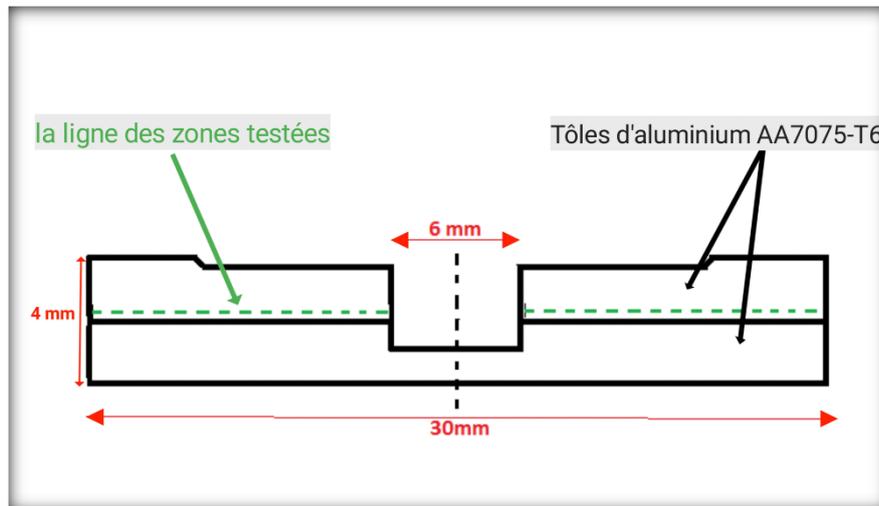


Figure 39 : Représentation schématique des zones testées pendant l'essai de micro dureté

III. CHAPITRE 3 :
RESULTATS ET
DISCUSSION

III.1.Introduction

Ce chapitre présente dans un premier temps l'observation visuelle et macrographique des joints de soudure obtenus par friction malaxage d'alliage d'aluminium 7075-T6. Dans un deuxième temps, nous présentons une étude paramétrique dans le but de lier les caractéristiques mécaniques des cordons de soudure aux paramètres opératoires du procédé. Les résultats de caractérisation telle que la dureté et l'essai de cisaillement par traction du cordon seront aussi présentés.

III.2.Inspection visuelle des soudures par point par friction malaxage

La figure 22 montre un exemple des éprouvettes obtenues après soudage par point par friction malaxage des plaques superposées d'alliage d'aluminium 7075-T6 à différentes vitesses de rotation de l'outil.

La figure 40 montre un exemple d'éprouvettes soudées par FSSW pour différentes vitesses de rotation. On doit noter que la pénétration de l'outil laisse une trace à l'extérieur de la zone de soudage. De façon générale, une légère bavure peut se former du côté de la zone malaxée. La figure 40 montre aussi un agrandissement de l'empreinte finale de l'outil. Dans cette illustration, la soudure est effectuée avec une vitesse de rotation $N = 1\ 800$ tr/min et une pénétration de l'outil $H_p = 3.4$ mm. Pour cette condition de soudage, on a obtenu une qualité de joint acceptable. Il est clair qu'aucun défaut superficiel majeur apparent n'est constaté.

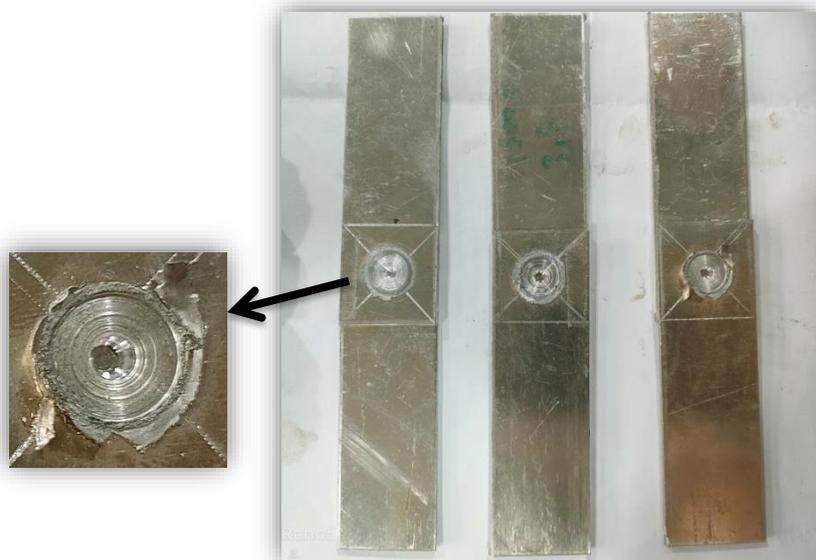


Figure 40 : Soudure sans défaut (avec agrandissement de l'empreinte finale de l'outil).

La Figure 41 présente deux défauts majeur constaté dans nos joints soudés. Le premier défaut c'est l'excès de pénétration provoqué pas une force d'appui très élevé. Le second c'est le déplacement de la plaque supérieure par rapport à la plaque inférieure. Cela est dû au mauvais bridage des deux plaques ainsi que les vibrations machine lors du soudage. Le défaut d'excès de pénétration est résolu par la suite en diminuant la charge et la valeur de pénétration du pion.



Figure 41 : Défauts observés dans les éprouvettes.

III.3. Analyses microstructurales

a) Macrographie du Joint soudé à différentes vitesses de rotation de l'outil :

La figure 42 présente la macrographie optique des joints soudés par FSSW produits en utilisant deux vitesses de rotation de l'outil (945tr/min et 1500tr/min). On y retrouve les zones caractéristiques, habituellement définies pour les joints FSSW : Métal de Base (MB), Zone Affectée Thermiquement (ZAT), Zone Affectée Thermo-Mécaniquement (ZATM) et Zone de malaxage (ZM). Les tôles supérieure et inférieure sont comprimées l'une contre l'autre pendant l'action de plongée du pion, ce qui crée une interface de joint. Dans la zone de soudage, le joint réalisé à la faible vitesse de rotation (945tr/min), présente une interface de joint ouverte et une zone de malaxage très faible. Cela renseigne sur une qualité de soudure non réussie. D'un autre côté, le joint réalisé à la vitesse élevée (1500tr/min), présente une d'interface de joint fermé et faiblement apparente. La longueur de la zone malaxée dans le joint 1500tr/min est supérieur au

joint 945tr/min de 24%. La ZAT s'est avérée plus grande avec l'augmentation de la vitesse de rotation de l'outil. Cela peut s'expliquer par l'élévation de la chaleur générée par l'augmentation de la vitesse de rotation. L'interface non soudée entre les deux tôles a tendance à se courber vers le haut sur le bord extérieur de la zone soudée. On peut constater que la profondeur du trou du joint à vitesse 945tr/min est inférieure au joint à vitesse 1500tr/min. Du fait que, au faible vitesse le volume du métal extrudé et déplacé de la plaque inférieure à la plaque supérieure est beaucoup plus faible que les vitesses rapides.

Généralement, plus la vitesse de rotation augmente, plus le diamètre de l'empreinte du pion augmente. Cela est dû au lien proportionnel entre la force centrifuge et la vitesse de rotation du pion. Par contre si on remarque bien la macrographie de la figure 42, on constate que le diamètre de l'empreinte du joint 1500tr/min est inférieure au joint 945tr/min. Cette différence est dû au manque de précision durant la découpe transversale ou le disque de découpe c'est décalé un peu du centre de l'empreinte originale du pion.

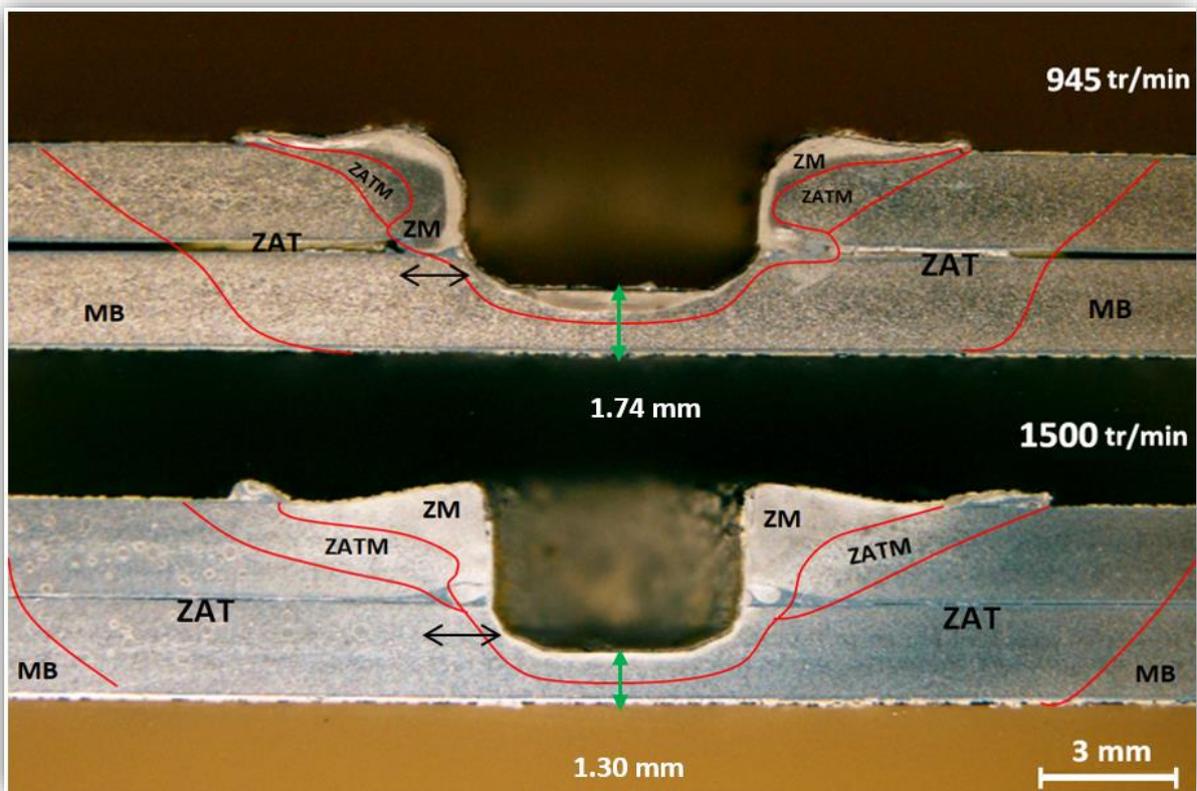


Figure 42 : Observation macroscopique des joints A-945 et B-1500

b) **Exploitation des résultats de l'essai de micro dureté (Vickers)**

La relation entre les valeurs de dureté Vickers des pièces soudées obtenues en utilisant différentes vitesses de rotation est présentée dans la Figure 43. Les essais de microdureté ont été réalisés à 0,2 mm au-dessus de l'interface du joint. On constate que le profil de microdureté suit une évolution en forme d'un W généralement rencontré dans les alliages d'aluminium soudé par FSSW. Cette évolution de dureté est liée aux modifications microstructurales engendrées par le soudage, la densité de dislocations. Il a été observé que les valeurs de dureté étaient plus élevées dans le matériau de base et la zone de malaxage et que les valeurs de dureté étaient plus faibles dans la ZAT/TMAZ. Des résultats similaires ont été obtenus pour toutes les différentes vitesses de rotation de l'outil. Cependant, il a été constaté que les valeurs de dureté du joint B-1500 par rapport au joint A-945 augmente dans la région la plus proche du bord de l'empreinte du pion. Cette augmentation peut s'expliquer par la structure à grains fins provoqué par l'augmentation de la déformation plastique. Yuan et al. [69] ont obtenu des résultats similaires et ont déclaré que la diminution de la valeur de dureté se produisait en raison du cycle thermique. Les valeurs minimales de dureté pour l'échantillon A se trouvent dans les régions ZATM/ZAT avec des valeurs allant de 159 HV à 170 HV, les valeurs maximales de 185 HV à 195 HV0.5 ont été trouvées aux régions de ZM et de métal de base MB en fonction des paramètres FSSW utilisés. Les valeurs minimales de l'échantillon B de 159 HV à 178 HV ont été trouvées dans les régions ZATM/ZAT, les valeurs maximales de 185 HV à 210 HV ont été trouvées aux régions de méta.

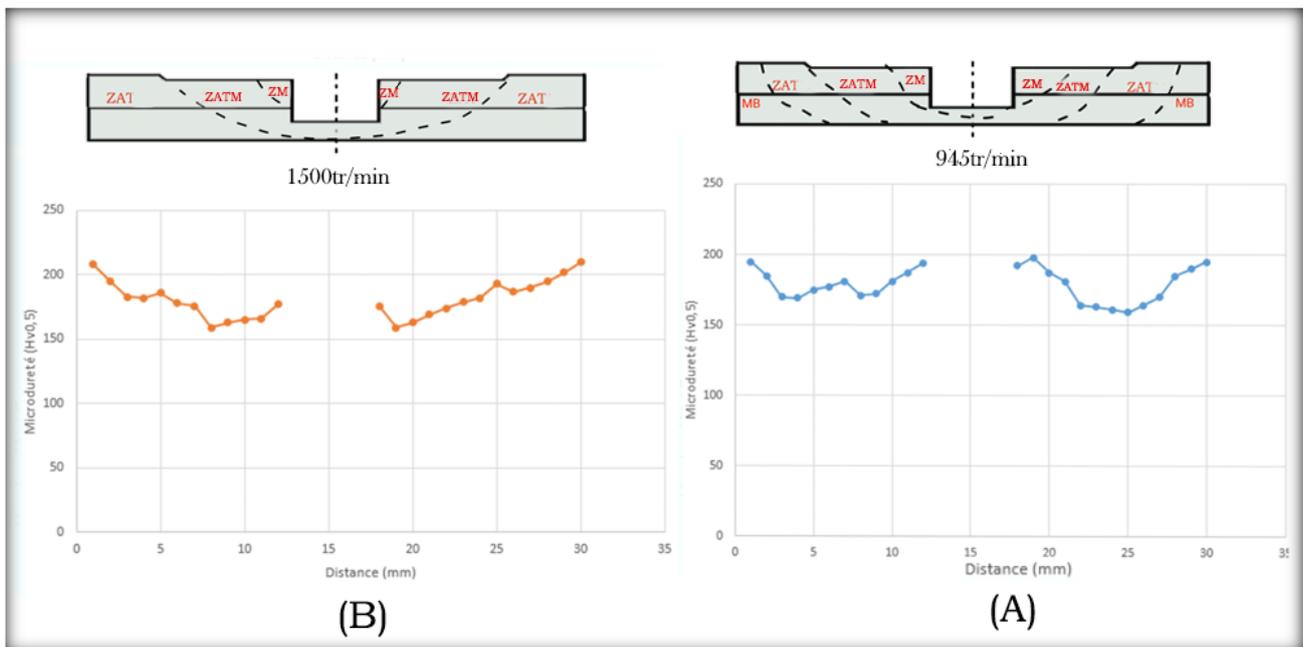


Figure 42 : Représentation graphique des résultats de dureté sur les échantillons A et B.

CHAPITRE 3 : RESULTATS ET DISCUSSION

La figure 44 illustre la comparaison entre les résultats de microdureté des deux échantillons A-945 et B-1500. On a remarqué un élargissement dans les zones ZM, ZAT et ZATM après l'augmentation de la vitesse de rotation de 945 à 1500 tr/min. Dans le cas de la vitesse 1500tr/min, l'élargissement excessif de la ZAT a fait disparition la zone MB dans l'échantillon B-1500. On peut dire que la vitesse de rotation a clairement influencée la dureté des différentes zones du joint de soudure soudé par FSSW.

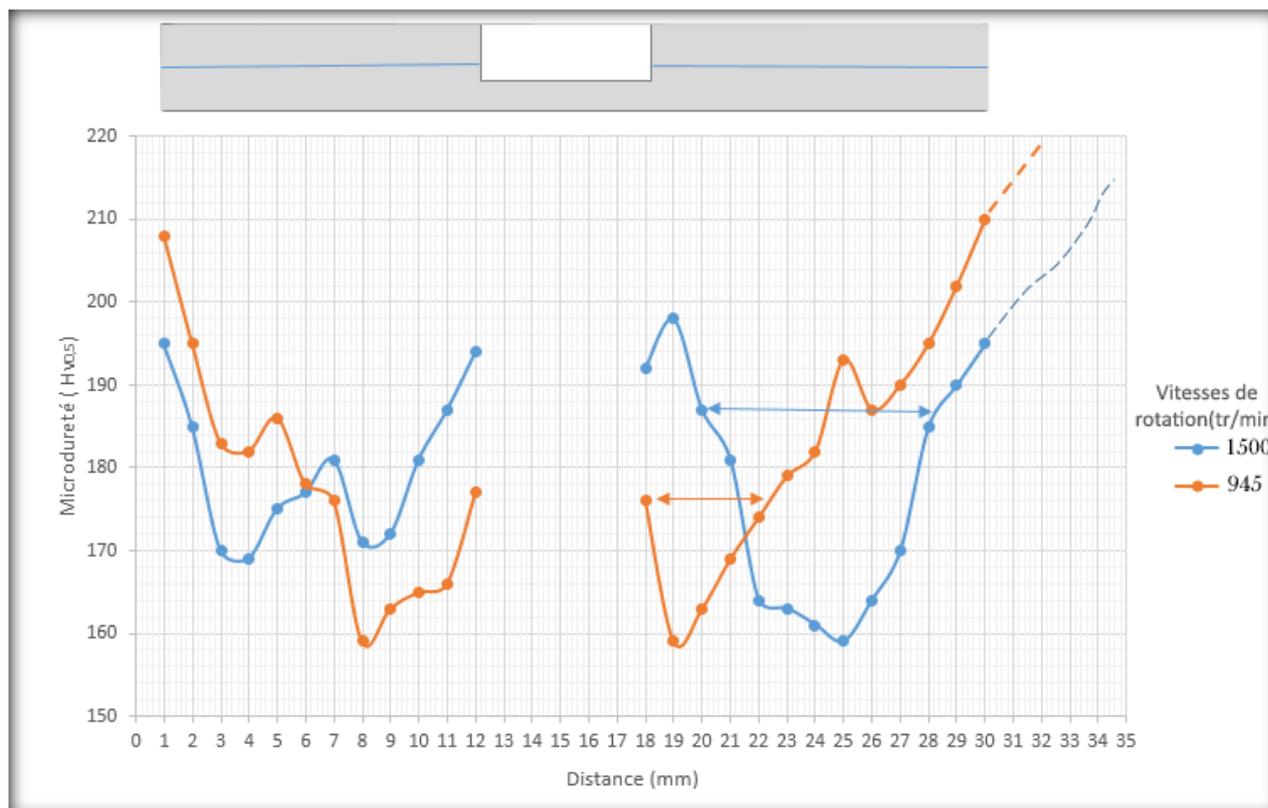


Figure 43 : : Influence de vitesse de rotation sur le profil de micro dureté des échantillons avec une profondeur de pénétration $H_p=3.4$ et temps de maintien de $t=15s$.

III.4. Résultats de l'essai de traction

1. L'effet de la vitesse de rotation sur la charge de cisaillement :

La figure 45 montre les courbes typique charge-déplacement des soudures par point par friction malaxage soudé avec une profondeur de pénétration de $H_p=3.4$ mm. Il est évident d'après la figure 45 que le joint réalisé avec la vitesse $N = 1800$ tr/min présenté une capacité portante beaucoup plus élevée à 2032 N pour un déplacement de 0.29 mm, et la fracture finale s'est produite à un déplacement de 0.31 mm. Les joints soudés $N = 1500$ tr/min et $N = 945$ tr/min dévoilent des propriétés faibles comparé au joint $N=1800$ tr/min, leurs points limite d'élasticité s'étendent jusqu'à une portance maximale de 1861 N et 1513 N. Des déplacements de 0.3 mm et 0.29 mm et une rupture au déplacement maximal de 0.54 mm et 0.69 mm. Le joint $N = 725$ tr/min illustre les propriétés les plus médiocre, une charge maximale de 1102 N pour une déplacement 0.26mm seulement.

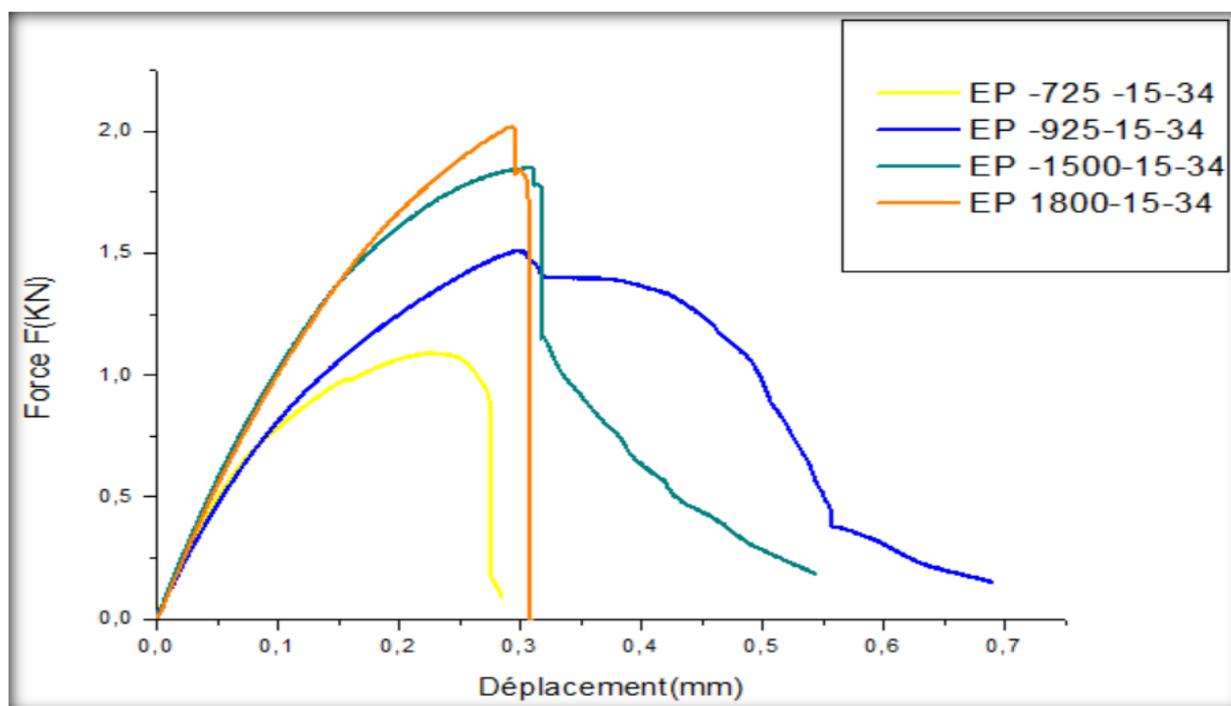


Figure 44 : Courbe Force-Déplacement de l'essai de traction à différentes vitesses de rotation

La résistance mécanique des points soudés par FSSW est fonction des paramètres choisis, à savoir la vitesse de rotation. Pour l'ensemble des essais effectués et avec des plaques soudées à différents paramètres, les colonnes de la figure 46 montrent que la charge de traction maximale a une tendance montante avec la montée en vitesse de rotation de l'outil

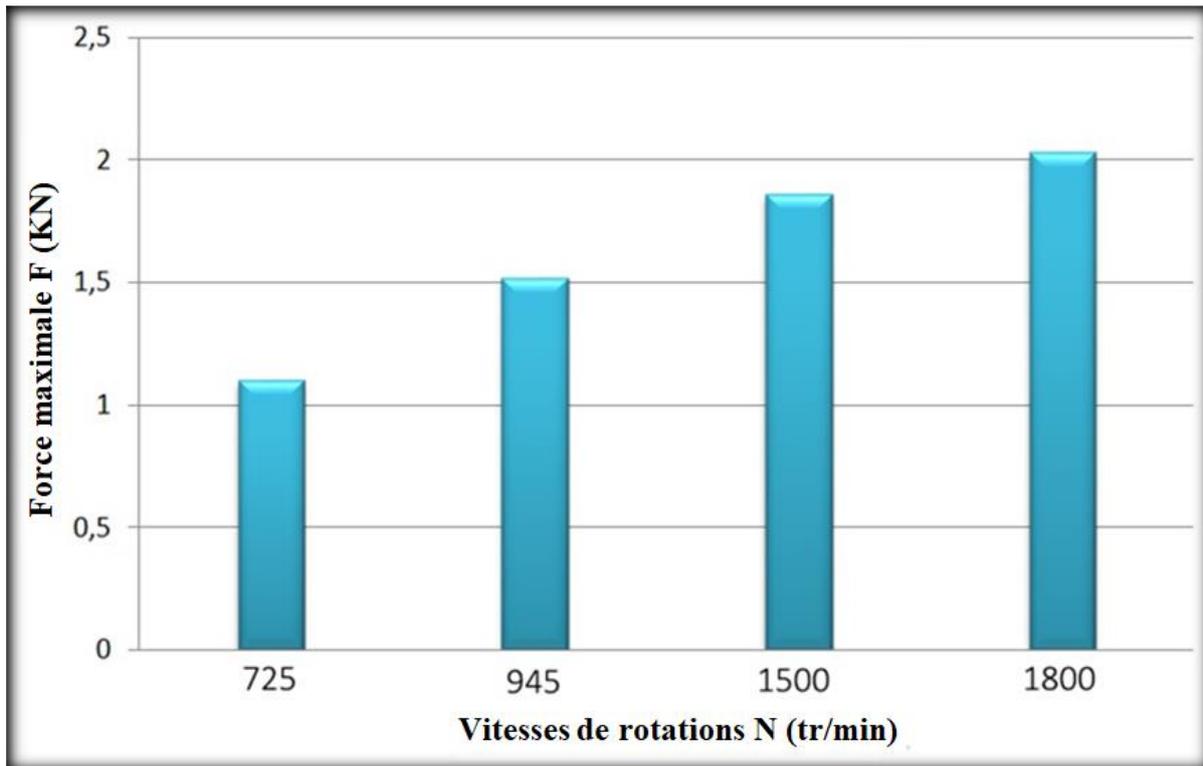


Figure 45 : Effets des différentes vitesses de rotations sur la résistance maximale à la traction.

2. *L'effet de la vitesse de rotation sur le mode de rupture :*

Dans les essais au cisaillement, Lathabai et al. [70] et Tozaki et al. [71] ont montré que le soudage par point par friction malaxage FSSW présentait deux modes de défaillance.

1. Le premier est la fracture de cisaillement ou fracture inter faciale qui provient du point de transition et se propage vers le bord libre de l'orifice laissé par pion de l'outil.
2. La seconde est la fracture en mode mixte. Dans ce cas, une fissure se développe entre le point de transition et le bord libre de l'épaulement et elle s'étend le long de la circonférence extérieure de l'épaulement et ensuite crée la rupture.

Ces conclusions se confirment grâce des essais de traction-cisaillement réalisés sur plusieurs éprouvettes avec différentes vitesses de rotations et de plongées.

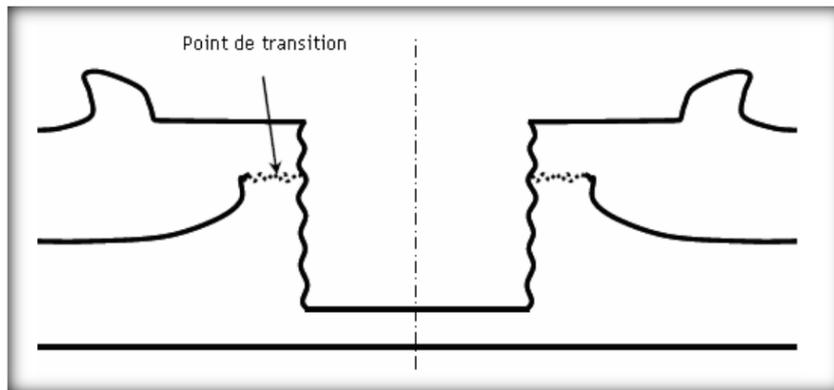


Figure 46 : Point de transition

La figure 48 illustre les principaux modes de rupture des assemblages soudés par point par friction malaxage avec différents paramètres.

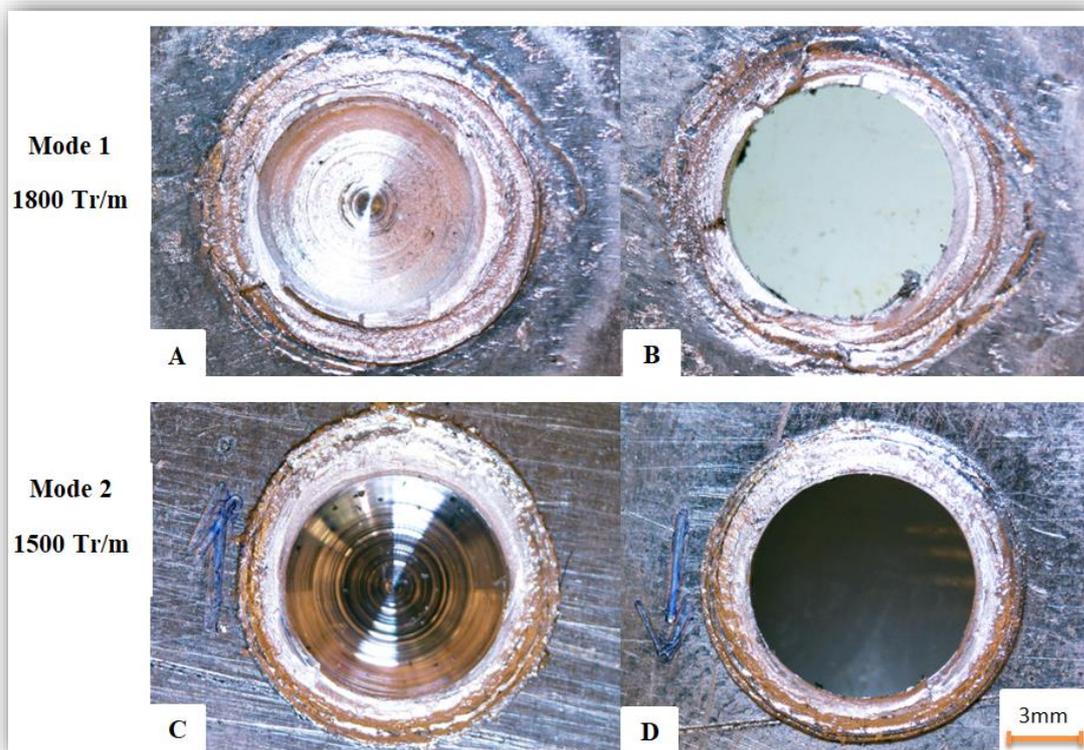


Figure 47 : Mode de rupture observé aux conditions de soudage par FSSW

Mode 1 : La figures 48-B montre la plaque supérieure est complètement séparée de la plaque inférieure. On observe un prétendu mode de défaillance lors de l'essai de traction sous forme d'un arrachement de la matière au niveau de la tôle supérieure causé par le bon malaxage produit à une vitesse de rotation 1800 tr/min. La figure 48-A montre la vue de dessous de la plaque

inferieure où on observe clairement la zone de cisaillement (zone de transition). Donc il y'a eu une déchirure de la tôle supérieur en périphérie de la zone soudée.

Mode 2 : Les figures 48-C et D montrent que la plaque supérieure est complètement décollée de la plaque inférieure sûrement dû à un manque de bon malaxage dans la zone de transition à cause de la faible vitesse de rotation par rapport au mode 1

3. Analyse des zones de rupture :

La figure 49 montre clairement le lien direct entre l'augmentation de la vitesse de rotation et les dimensions de l'empreinte du pion. L'analyse des zones de rupture confirme les résultats macroscopiques, comme quoi l'épaisseur de la zone soudée augmente avec l'augmentation de la vitesse de rotation. La force centrifuge augmente le diamètre de l'empreinte (Figure 49 et 50).

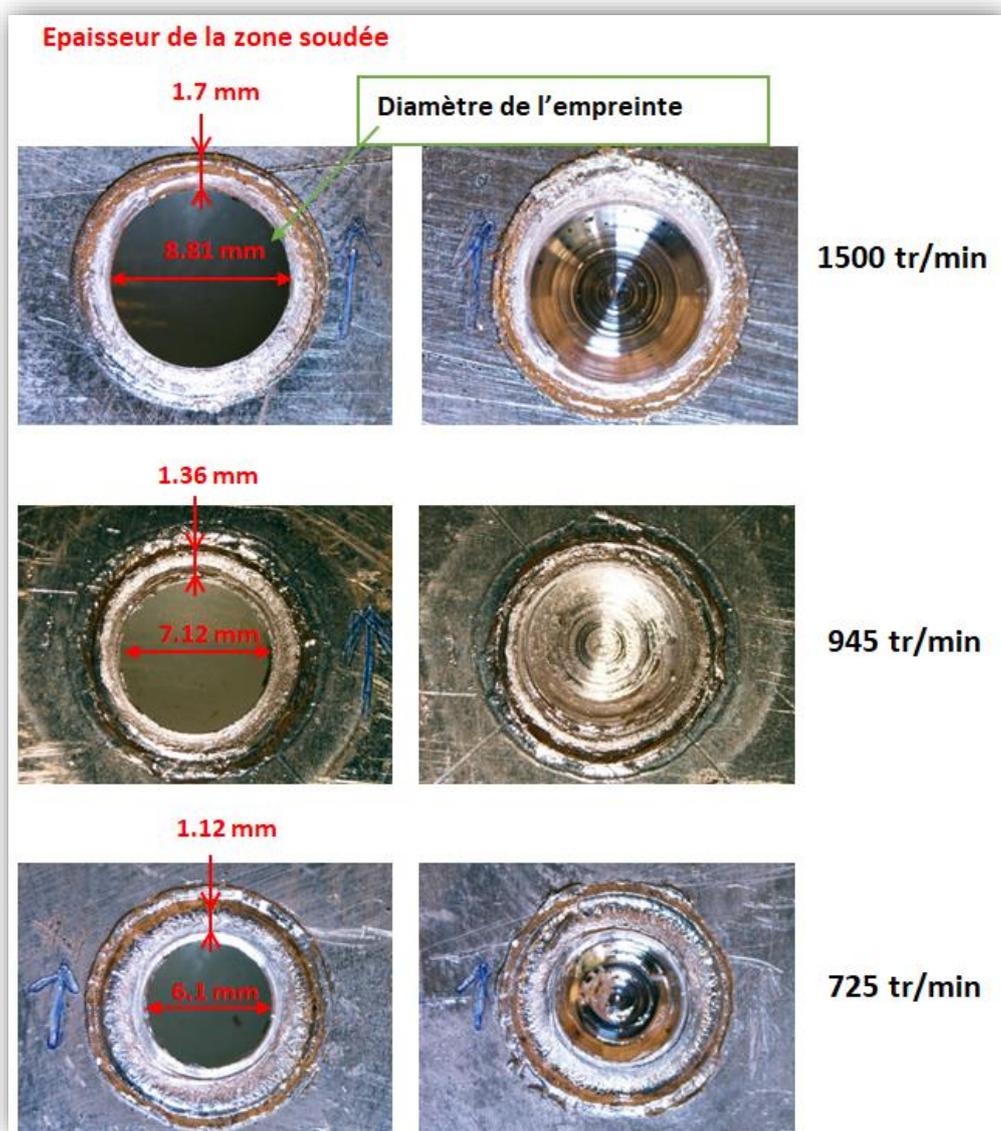


Figure 48 : photographies illustrent l'effet vitesse de rotation sur la zone malaxé

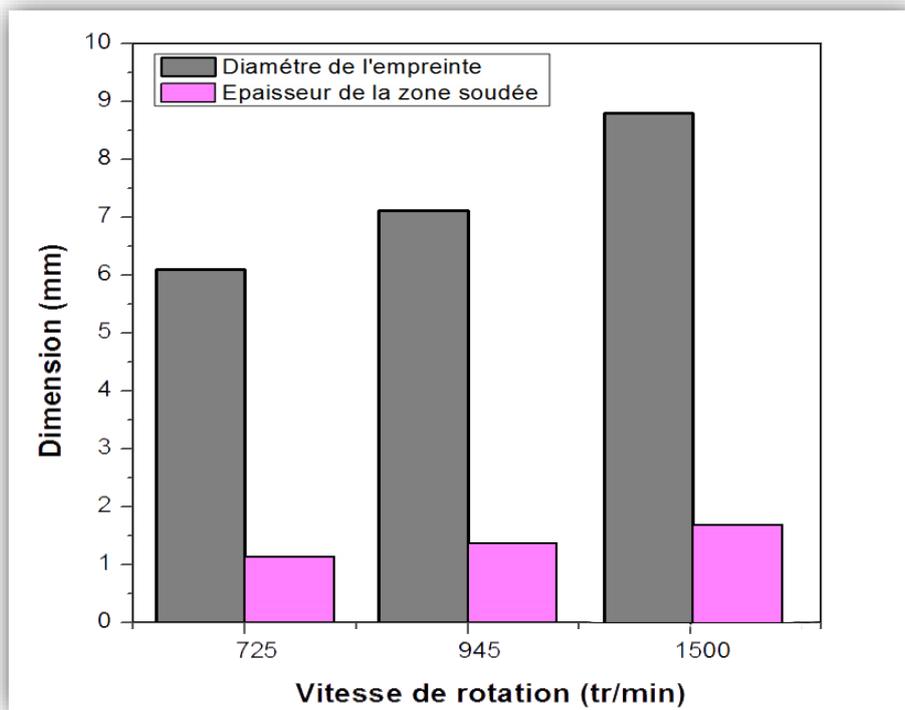


Figure 49 : Diagramme montrant la relation entre la vitesse de rotation et le diamètre et l'épaisseur de l'empreinte du pion de l'outil

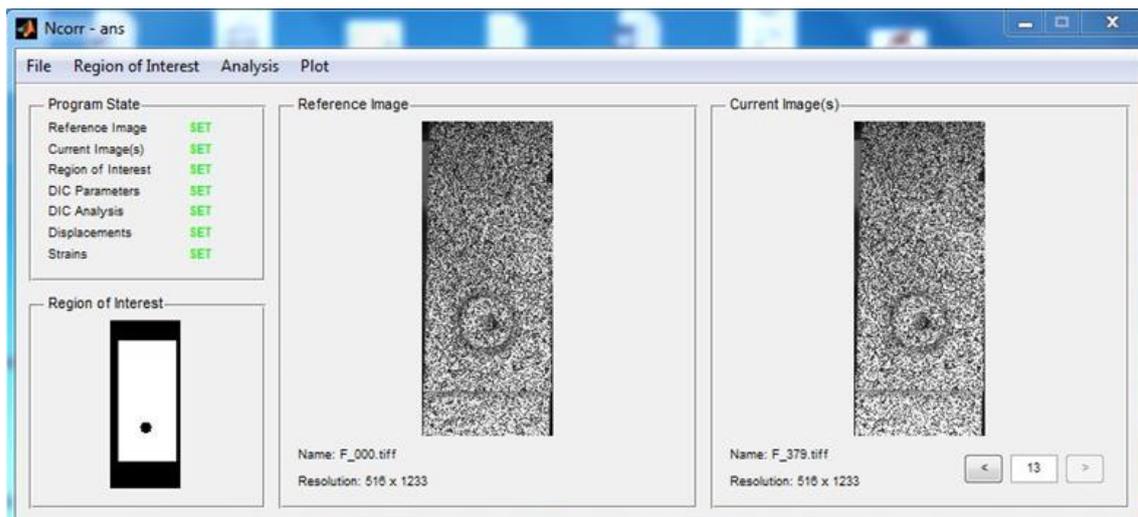
III.5. Résultat de l'essai de traction avec la Technique de corrélation d'images :

Cette partie traite des résultats expérimentaux de l'éprouvette avec le code open source de corrélation d'images digitales Ncorr [72-74] développé sous Matlab.

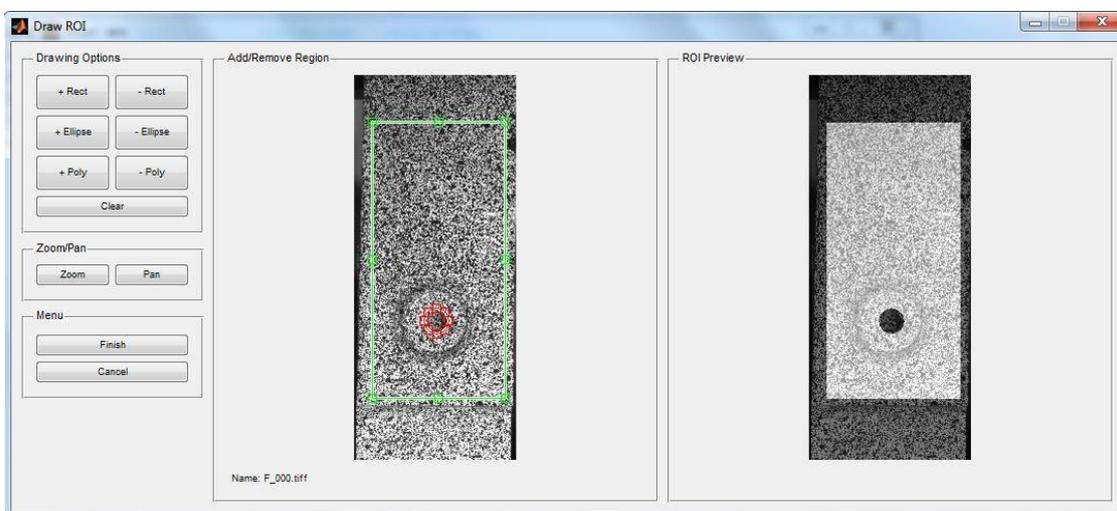
a) Le code open source DIC-Ncorr :

La mise en œuvre du **code open source DIC-Ncorr se déroule en quatre étapes principales**. Dans cette partie nous allons présenter ces pour l'analyse des résultats de la partie expérimentale des tests de l'essai de traction-cisaillement d'une éprouvette soudée par fssw. Ceci est fait pour les faces avant et arrière de la soudure pour observer le champ de déformation dans la même zone pendant l'essai de traction.

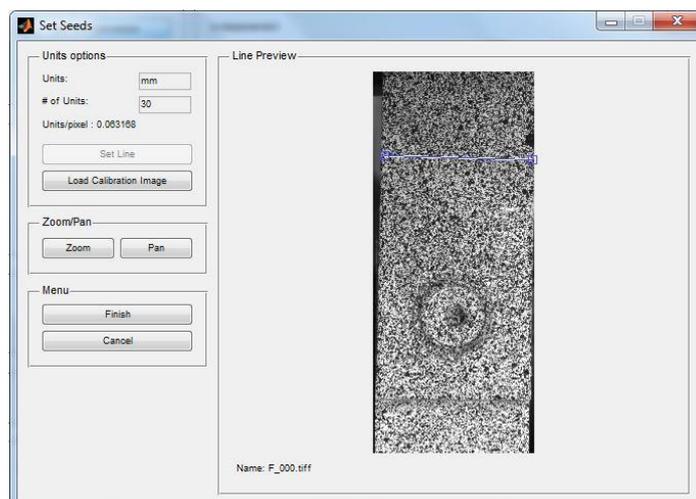
Étape 01 : Charger une image de référence et les images courantes.



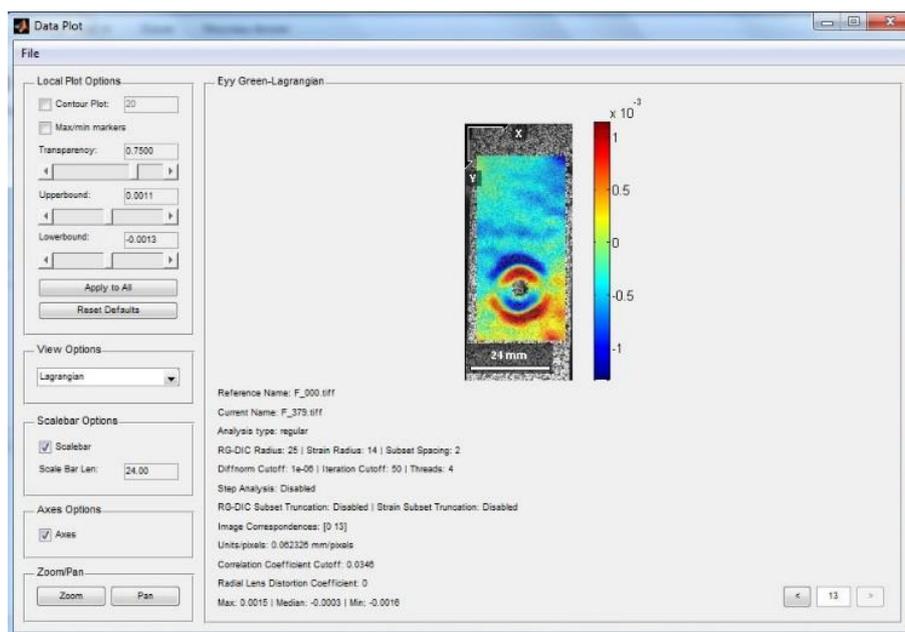
Étape 02 : Sélection de la zone à analyser



Étape 03 : -Format déplacement- permet de convertir le déplacement du pixel en millimètre



Étape 04 : Afficher les résultats déplacements/déformations "display displacement/strains"



- **Remarque :**

Nous ferons les mêmes étapes sur la face arrière pour observer le champ de déformation dans la même zone pendant l'essai de tension.

b) Champs de déplacement et de déformation :

Pour mieux comprendre le mécanisme de rupture et sa relation avec la structure inter-faciale entre les deux plaque supérieur et inférieur, la déformation de la soudure pendant les essais de cisaillement par traction ont été surveillée par la technique de corrélation d’image numérique. Cependant, en raison de la caractéristique géométrique de l'assemblage FSSW, une observation directe de la région inter-faciale de rupture est impossible.

Compte tenu de l'intégralité du joint, la déformation des régions inter-faciales (zone de liaison) se reflétera sur la surface de la tôle, et en général, la concentration de la déformation sur la surface implique la formation de fissures internes dans la direction de l'épaisseur de la tôle. Ainsi, la déformation de la surface supérieure de la plaque 7075 a été étudiée par DIC, à partir de laquelle une mesure de déformation équivalente, a été calculée à différents stades de chargement, c'est-à-dire de 0.01KN jusqu'à la charge avant rupture 2KN, comme le montrent la figure 51. Ces instants sont désignés dans la courbe de traction – cisaillement dans la figure 52. Ces images nous illustrent la chronologie de notre essai de traction, Le point de soudure soudée par FSSW est au milieu de l'éprouvette.

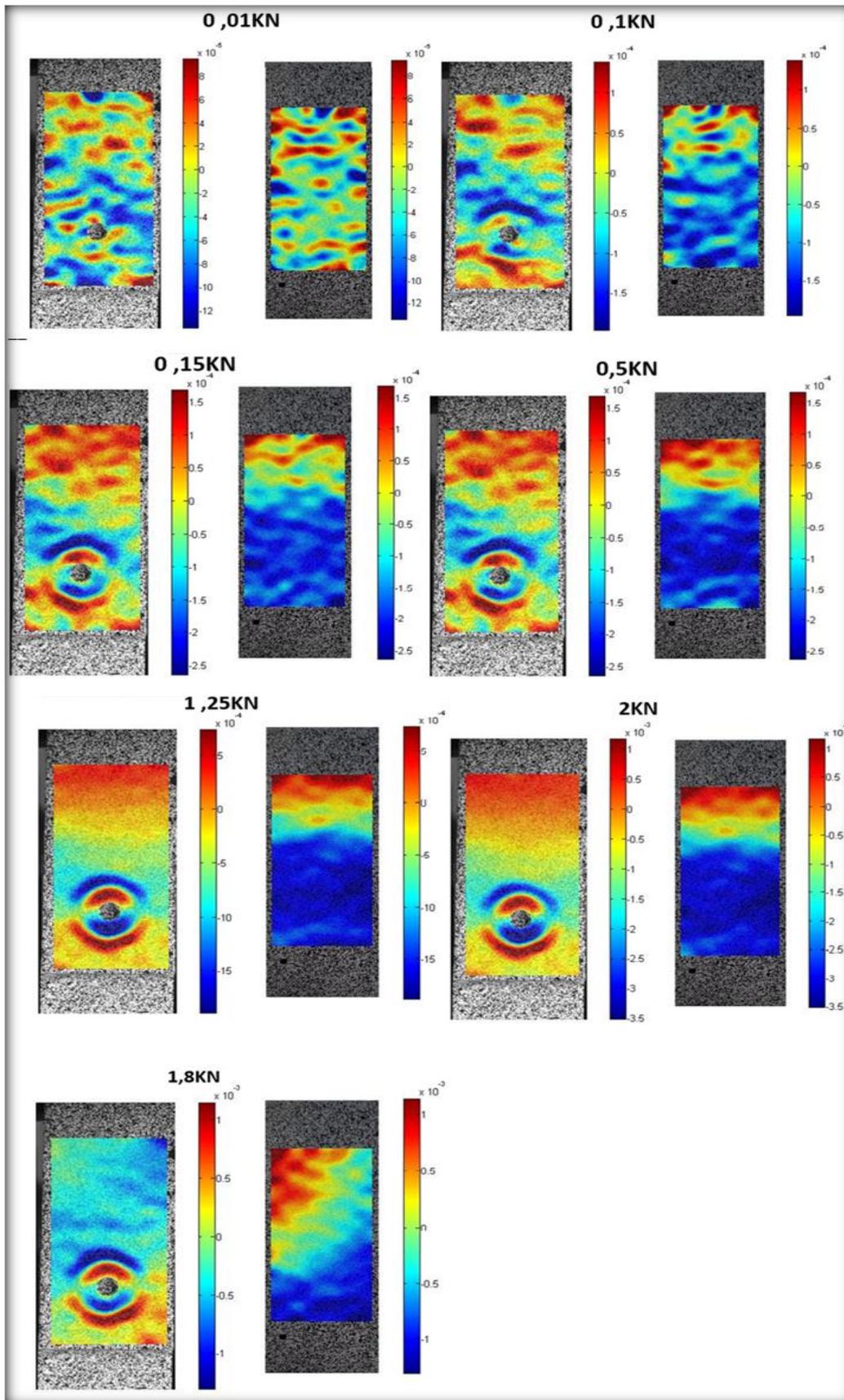


Figure 50 : Illustration de champs de déformation et les champs de déformation d'une éprouvette soudée par FSSW durant un essai de traction-cisaillement avec CID.

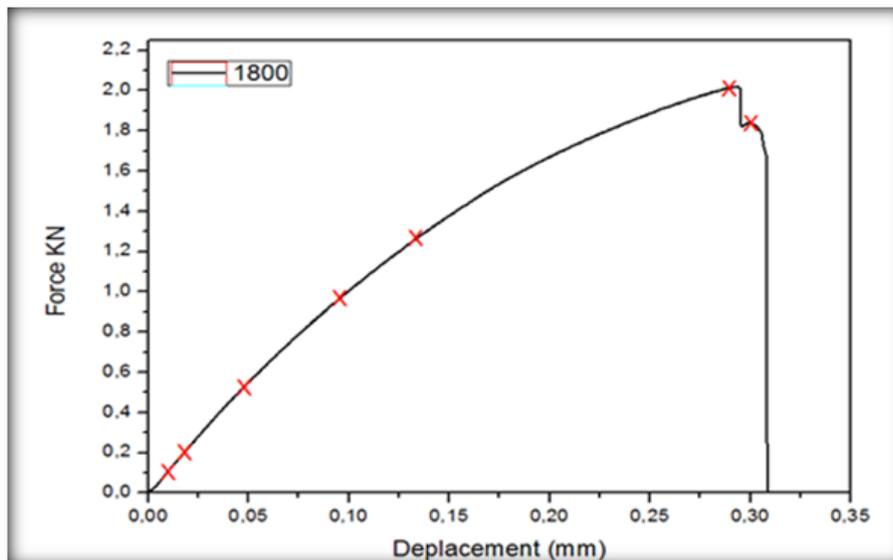


Figure 51 : Courbe de traction-cisaillement sur une éprouvette soudée par FSSW A la vitesse de rotation 1800tpm

Le champ de déformation dans la Figure 51, dans les premiers stades de la déformation, la localisation de la déformation se produit seulement dans les régions extérieures de la ZS. Lorsque la force maximale est atteinte, la déformation se localise dans la région entourant l’empreinte du pion et du l’épaulement.

Pendant l'essai de cisaillement par traction, pour la plaque supérieure, le côté chargé subit des contraintes de traction le long de l'interface, tandis que le côté libre est sous l'effet de contraintes de compression. Par conséquent, les fissures se produisent d'abord sur le côté chargé, ce qui entraîne des déformations globales plus élevées que sur le côté libre (Figure 53).

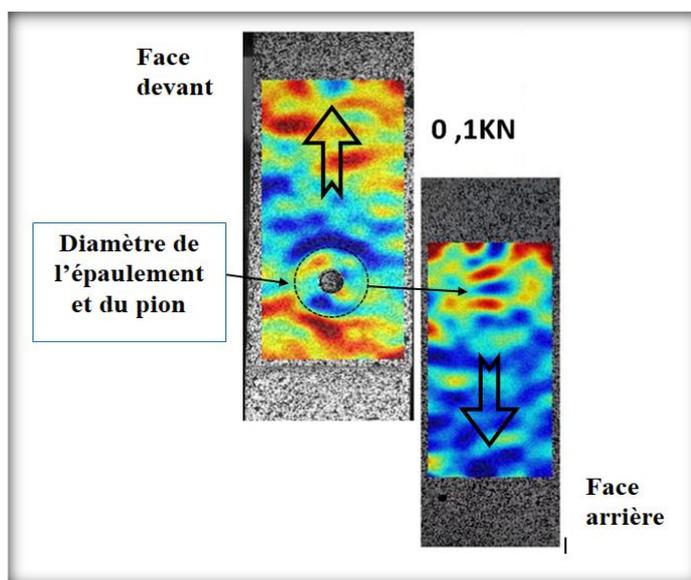


Figure 52 : Exemple de carte de champ déformation montrant la position de la face avant par rapport à l'arrière à une force de 0,1KN

L'asymétrie des déformations apparaît clairement dans la distribution détaillée des déformations le long de l'axe de charge, (Figure 54). Du côté chargé, la déformation dans toutes les régions inter-faciales augmente localement avec l'augmentation de la force, ainsi l'interface 7075/7075 entière contribue à la résistance.

La distribution des déformations le long de l'axe charge, illustrée à la figure 54, montre que seules les déformations des interfaces A et B augmentent de manière significative avec la force appliquée, tandis que la majeure partie de l'interface C ne contribue pas à la déformation.

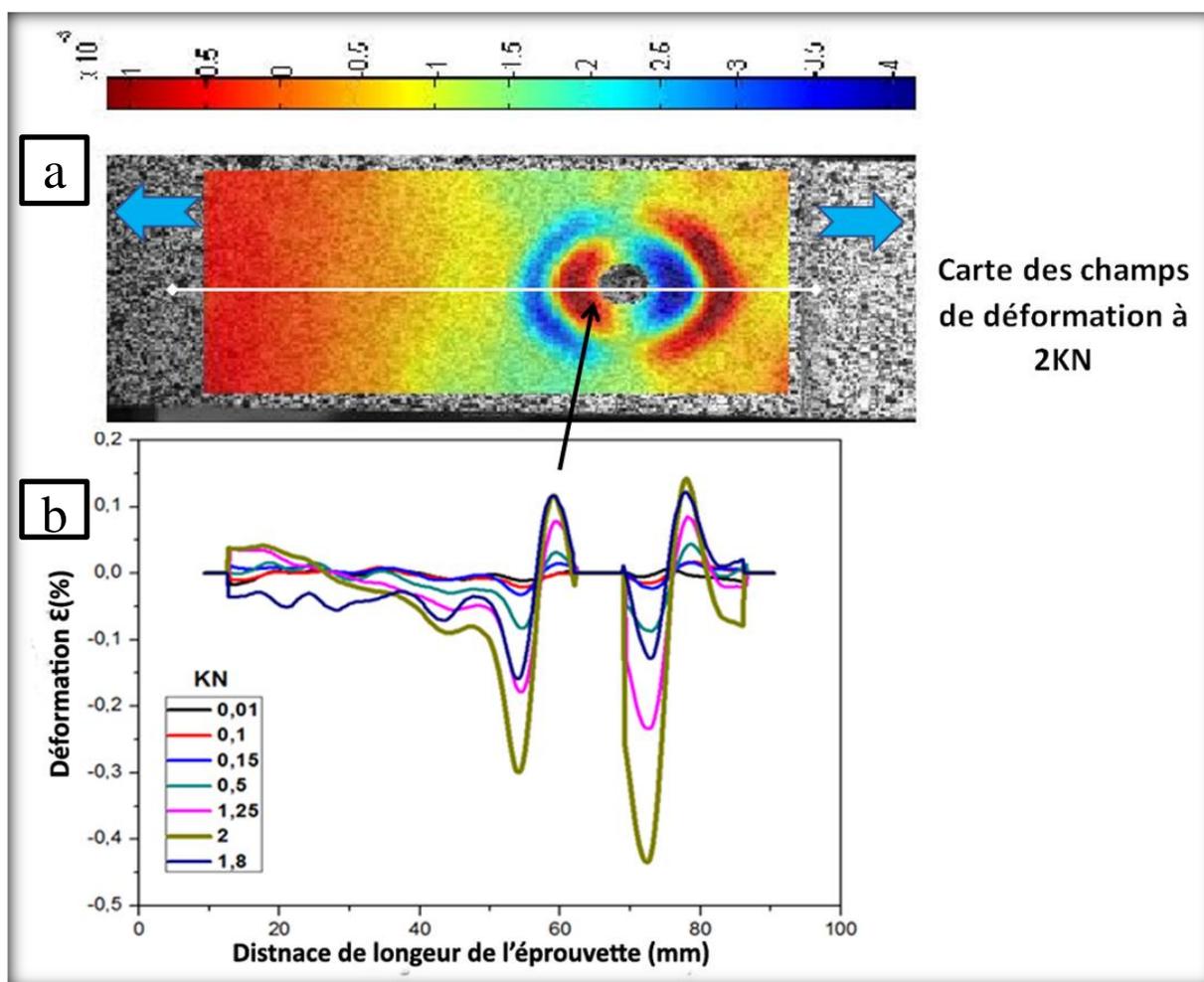


Figure 53 : a- Carte des champs de déformation à 2KN avec la ligne centrale,
 b- Profile de déformation prélevé dans la ligne centrale suivant la direction de la traction.

On remarque que la plus grande valeur de déplacement s'est produite à une force de cisaillement égale à 2KN à l'intérieur de la zone de soudage.

CONCLUSION
GÉNÉRALE

Conclusion générale

Le procédé de soudage par point par friction malaxage ouvre de nouvelles perspectives dans l'assemblage des tôles et offre des avantages en termes de performances et de coûts par rapport aux procédés de soudage classiques. Le présent travail a permis, en particulier, de mettre en avant le fort potentiel pour la réalisation de soudures entre les différents alliages d'aluminium.

L'ensemble des travaux réalisés au cours de cette étude a également révélé l'évolution de la microstructure obtenue après soudage et l'influence de différents facteurs de soudage sur la résistance et l'efficacité de ce soudage.

L'étude actuelle a démontré que des alliages d'aluminium 7075 ont été assemblés avec succès en appliquant le soudage par points par friction-malaxage. L'effet des paramètres de soudage sur les performances mécaniques et la microstructure a été étudié.

Les principales conclusions tirées de ce travail sont :

- Une augmentation de la vitesse de rotation de l'outil de soudage entraîne une augmentation de la température maximale des joints soudés ce qui entraîne une modification des propriétés mécaniques et métallurgiques des soudures.
- La résistance à la traction augmente jusqu'à une valeur maximale avec l'augmentation de la force et la vitesse de rotation,. Tel que la charge de cisaillement maximale a été obtenue à une vitesse de rotation de 1800 tr/min et un temps de maintien de 15 S . Alors qu'à faible vitesse de rotation, la charge de cisaillement en traction était faible. Par conséquent, cette diminution de la charge de cisaillement en traction peut être due à la formation de microfissures dans la zone malaxée.
- La dureté maximale a été observée à une vitesse de rotation de 1800 tr/min et un temps de séjour de 15 s, puis a progressivement diminué en réduisant la vitesse de rotation. L'augmentation de la surface du trou de serrure était due à la déformation plastique plutôt qu'à la ZM et la ZMAT. Les paramètres de soudage ont montré un effet significatif sur le résultat de la microdureté. Ceci est dû à des coefficients de dilatation thermique, de mélange et d'incorporation très différents entre les tôles d'aluminium 7075-T6.
- Le profil de dureté est relativement symétrique par rapport au plan de joint pour tous les paramètres de soudage. La valeur de la microdureté dans la ZATM et ZAT pour les différents paramètres de soudage atteint 159 Hv_{0.5}, inférieure à celle du métal de base qui est de 195 Hv_{0.5}

CONCLUSION GENERALE :

- Deux modes de rupture distincts ont été observés dans les éprouvettes de FSSW soumises à une charge de cisaillement : Le premier est la rupture de cisaillement et en mode mixte. La plage des valeurs de rupture du premier mode ainsi que la valeur maximale sont inférieures aux valeurs citées du deuxième mode. On remarque que la vitesse de rotation est un facteur significatif sur l'effort de rupture.

L'ensemble de ces résultats montre sans équivoque le fort potentiel du procédé de soudage FSSW pour la réalisation de soudures entre les alliages d'aluminium 7075-T6. Cette nouvelle technique de soudage peut être une bonne alternative aux techniques de soudage conventionnelles qui présentent des défauts de soudage importants. En tant que méthode d'économie d'énergie électrique, elle peut être largement développée dans l'industrie du pétrole et du gaz, de l'automobile, de l'aérospatiale et des transports.

Les différentes recommandations à envisager sont :

- Faire des simulations numériques pour étudier l'influence de soudage sur les propriétés mécaniques des matériaux.
- Faire des modélisations numériques avec différentes formes d'outils.
- Faire des tests de corrosion pour fournir des informations essentielles sur la qualité et l'efficacité de ce type de soudage (FSSW) sous différentes atmosphères agressives pouvant survenir comme la salinité ou type milieu industriel ou généralement pollué.

REFERENCES

BIBLIOGRAPHIQUES

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] Thomas, WM et al (1993) ; "Soudage bout à bout par friction-malaxage" ; Brevet international n° PtCT/GB92702203, juin.
- [2] Abstrait-Friction Stir Welding New Developments for Oil and Gas Industry.
- [3] Kano, 2004 ; Gerlich et al., 2006 ; Yuan et al., 2011.
- [4] Khan et al., 2007 ; Baek et al., 2010.
- [5] S. Zimmer. 'Contribution à l'industrialisation du soudage par friction malaxage'. Sciences de l'ingénieur [physics]. Arts et Métiers ParisTech, 2009.
- [6] W.M. Thomas, E.D. Nicholas, J.C. Needham, M.G. Murch, P. Templemith, C.J.Dawes, G.B. Patent 9125978.8,1991.
- [7] N. JEMAL, Thèse Doctorat, Qualification du domaine de soudabilité en soudage par friction malaxage 1 Arts et Métiers Paris Tech - Centre de Bordeaux Institut de Mécanique et Ingénierie3, décembre 2011.
- [8] Caravaca, D.S., et al. Correlation of phased array inspection and fatigue performance of FSW joints. in ASME 2007 26th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering. 2007. American Society of Mechanical Engineers.
- [9] Arbegast, W.J., A flow-partitioned deformation zone model for defect formation during friction stir welding. Scripta materialia, 2008. **58**(5) : p. 372- 376.
- [10] Zimmer, S., Contribution à l'industrialisation du soudage par friction malaxage, 2009, Arts et Métiers ParisTech.
- [11] Zhang, Z., B. Xiao, and Z. Ma, Effect of segregation of secondary phase particles and —Si line on tensile fracture behavior of friction stir-welded 2024Al-T351 joints. Metallurgical and materials transactions A, 2013. **44**(9): p. 4081-4097.
- [12] Tongne, A., Étude expérimentale et numérique du procédé de soudage FSW (Friction Stir Welding). Analyse microstructurale et modélisation thermomécanique des conditions de contact outil/matière transitoires, 2014, Saint-Etienne, EMSE.
- [13] Le soudage par friction malaxage : principes et applications, Lyne St-Georges, éd. : Les Presses de l'aluminium, Chicoutimi, Québec (2015).

- [14] H. Badarinarayan, F. Hunt, K. Okamoto, Chapter 12: Friction Stir Spot Welding, Friction Stir welding and Processing, Edité par R.S. Mishra ET M.W. Mahoney, ISBN-13 978-0- 87170-840-3, ASM International, 2007.
- [15] R. A. Mishra, Chapter 1 Introduction, Friction Stir Welding and Processing, Edité par R.S. Mishra ET M.W. Mahoney, ISBN-13 978-0-87170-840-3, ASM International, 2007.
- [16] S. Zimmer- Chevret, C. Guyomard, Laurent Langlois, Régis Bigot, Patrick Martin. FSW : Un Procédé De Soudage Pour Les Alliages D'aluminium De Fonderie. 11 ème Colloque National AIP PRIMECA La Plagne, France, 2009
- [17] Cook G.E., Smartt H.B., Mitchell J.E., Strauss A.M., Crawford R., Controlling robotic friction stir welding, Welding Journal, Vol. 82 No.6, pp.28-34, 2003.
- [18] R.S. Mishra, Z.Y. Ma. Friction stir welding and processing. Materials Science and Engineering, 50, 1-78, 2005.
- [19] N. Balasubramanian, B. Gattu, R. S. Mishra, Process forces during friction stir welding of aluminium alloys, Science and Technology of Welding and Joining 2009, VOL 14-NO 2 p.: 141 – 145, 2009.
- [20] T. J. Haynie, A. D. Hofferbert, A. H. Kopp, Adaptator for friction stir welder, US Patent Application No.: US 2006/0032 887 A1, 2006.
- [21] C. Genevois, 'Genèse des microstructures lors du soudage par friction malaxage d'alliages d'aluminium de la série 2000 & 5000 et comportement mécanique résultant', thèse soutenu en septembre à l'INPG, 2004
- [22] D. S. Caravaca, C. R Bird, K. Beamish and S. Maddox, Correlation of phased array inspection and fatigue performance of FSW joints, 26th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering, OMAE 2007, San Diego, California, 2007
- [23] R. Sakano, K. Murakami, K. Yamashita, T. Hyoe, M. Fujimoto, M. Inuzuka, Y. Nagao, H. Kashiki, Development of spot FSW robot system for automobile body members, in: Proceedings of the Third International Symposium of Friction Stir Welding, Kobe, Japan, 2004.
- [24] M. Fujimoto, M. Inuzuka, M. Nishio, Y. Nakashima, Development of friction spot joining (Report 2)—Mechanical properties of friction spot joints, Reprints of the National Meeting of Japan Welding Society No. 74, pp. 6–7, 2004.µ

- [25] P.-C. Lin, S.-H. Lin, J. Pan, T. Pan, J.M. Nicholson, M.A. Garman, Microstructures and failure mechanisms of spot friction welds in lapshear specimens of aluminum 6111-T4 sheets, SAE Technical Paper No. 2004-01-1330, 2004.
- [26] P.-C. Lin, J. Pan, T. Pan, 'Fracture and fatigue mechanisms of spot friction welds in lapshear specimens of aluminum 6111-T4 sheets', SAE Technical Paper No. 2005-01-1247, 2005.
- [27] Y. Tozaki, Y. Uematsu, K. Tokaji, Effect of processing parameters on static strength of dissimilar friction stir spot welds between different aluminium alloys, *Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures* 30 -143–148, 2007.
- [28] Y.-H. Zhao, S.-B. Lin, L. Wu, F.-X. Qu, The influence of pin geometry on bonding and mechanical properties in friction stir weld 2014 Al alloy, *Materials Letters* 59 -2948–2952,2005.
- [29] H. Fuji, L. Cui, M. Maeda, K. Nogi, Effect of tool shape on mechanical properties and microstructure of friction stir welded aluminum alloys, *Materials Science and Engineering A* 419 -25–31, 2006
- [30] K. Colligan, Material Flow Behavior during Friction Stir Welding of Aluminium, *Welding Journal*, volume 78 (71), 229-237, 1999.
- [31] S. Bozzi, A. L. Etter, T. Baudin, A. Robineau, and J. C. Goussain, Mechanical Behaviour and Microstructure of Aluminum-Steel Sheets Joined by FSSW, Hindawi Publishing Corporation, Volume 2008, Article ID 360617, doi:10.1155/2008/360617.
- [32] D. Mitlin, V. Radmilovic, T. Pan, J. Chen, Z. Feng, M.L. Santella. Structure properties relations in spot friction welded 6111 aluminum. *Materials Science and Engineering A* 441 (2006) 79–96.
- [33] Bilici, M.K. and Yukler, A.I.: Influence of tool geometry and process parameters on macrostructure and static strength in friction stir spot welded polyethylene sheets, *Materials and Design*, vol. 33, p. 145–152, **2012**.
- [34] Lounis Abdallah : Influence des paramètres de soudage par pointpar friction malaxage (FSSW) sur le comportement de deux types de plaques en polymères : étude expérimentale et numérique, p.39, **2019**.
- [35] C. Herbelot, T. Dang-Hoang, A. Imad, N. Benseddiq 'Damage mechanisms under tension shear loading in friction stir spot welding', *Science and Technology of Welding and Joining*, France, Volume 15, Pages 688-693, 2010

- [36] A. Gerlich, G. Avramovic-Cingara, T.H. North, “Stir Zone Microstructure and Strain Rate during Al 7075-T6 Friction Stir Spot Welding”, *Metallurgical and Materials Transactions A*, vol. 37A, p. 2773-2786, 2006.
- [37] M. Tier, T. Rosendo, C.W. Olea, C. Mazzaferro, F.D. Ramos, M. Bayer, J.F. Dos Santos, A.A.M. da Silva, J. Mazzaferro, T.R. Strohaecke, “The influence of weld microstructure on mechanical properties of refill Friction Stir Spot Welding of 5042 Aluminium alloy”, *Proceedings of the 7th Friction Stir Welding Symposium, Awaji Island, Japan, 2008*.
- [38] P. Su, A. Gerlich, T.H. North, G.J. Bendzsak, “Energy generation and stir zone dimensions in friction stir spot weldings”, *SAE technical series*, 2006-01-0971, 2006.
- [39] Norme soumis à enquête probatoire jusqu’au : ISO/DIS 25239-1, 25 novembre 2007.
- [40] A. Gerlich, M. Yamamoto, T.H. North, “Local melting and tool slippage during Friction Stir Spot Welding of Al-alloys”, *Journal of Materials Science*, 10.1007/s10853-007- 1791-7, 2007
- [41] Haghshenas, M., et al., Friction stir weld assisted diffusion bonding of 5754 aluminum alloy to coated high strength steels. *Materials & Design*, 2014. **55**: p. 442-449.
- [42] Das, H., R. Ghosh, and T. Pal, Study on the formation and characterization of the intermetallics in friction stir welding of aluminum alloy to coated steel sheet lap joint. *Metallurgical and materials transactions A*, 2014. **45**(11): p. 5098-5106.
- [43] Bozzi, S., et al., Intermetallic compounds in Al 6016/IF-steel friction stir spot welds. *Materials Science and Engineering: A*, 2010. **527**(16): p. 4505-4509.
- [44] Feng, K., M. Watanabe, and S. Kumai, Microstructure and joint strength of friction stir spot welded 6022 aluminum alloy sheets and plated steel sheets. *Materials transactions*, 2011. **52**(7): p. 1418-1425.
- [45] Chen, Y., A. Gholinia, and P. Prangnell, Interface structure and bonding in abrasion circle friction stir spot welding: a novel approach for rapid welding aluminium alloy to steel automotive sheet. *Materials Chemistry and Physics*, 2012. **134**(1): p. 459-463.

- [46] 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.
- [47] Uematsu, Y., et al., Comparative study of fatigue behaviour in dissimilar Al alloy/steel and Mg alloy/steel friction stir spot welds fabricated by scroll grooved tool without probe. *Science and Technology of Welding and Joining*, 2012. **17**(5): p. 348-356.
- [48] Zheng, Q., et al., Dissimilar friction stir welding of 6061 Al to 316 stainless steel using Zn as a filler metal. *Journal of Alloys and Compounds*, 2016. **686**: p. 693-701.
- [49] Reilly, A., et al., Modelling and visualisation of material flow in friction stir spot welding. *Journal of Materials Processing Technology*, 2015. **225**: p. 473-484
- [50] McNelley, T., S. Swaminathan, and J. Su, Recrystallization mechanisms during friction stir welding/processing of aluminum alloys. *Scripta materialia*, 2008. **58**(5): p. 349-354.
- [51] Girard, M., Soudage-diffusion heterogene assiste par friction malaxage- cas du couple al/fe, 2010, Ecole Centrale de Nantes: Nantes, France, . p. 218.
- [52] Memduh Kurtulmuş, School of Applied Sciences, Marmara University, Goztepe Campus, 34722 Kadikoy, Istanbul, Turkey (2016) Effect of Tool Geometry and Process Parameters on microstructure and mechanical mproperties of friction stir spot welded 2024-T3 aluminum alloy sheets, p.12-13.
- [53] C. B. Smith, 'Friction Stir Welding and Processing' - Chapter 11 Robots and machines for friction stir welding / processing, *Friction Stir Welding and Processing*, Edité par R.S. Mishra et M.W. Mahoney, ISBN-13 978-0-87170-840-3, ASM International, 2007.
- [54] F. Serradj, mémoire de Magister, Université de Constantine, Algérie (2005).
- [55] C.Varel, *Le comportement de l'aluminium et de ses alliages*, Ed. Dunod technique, Paris (2004) 25.

- [56] J. Lanthony, l'aluminium et les alliages lçgers. Ed. Presses Universitaires de France, Paris (1984) 55.
- [57] D. M. Laughlin and W. F. Miao, Journal of Materials Science Letters, 21 (2001) 320-329.
- [58] I. R. Harris, P. C. Varley, Factors influencing drittleness in AlMgSi alloys, J. I. Metals 82 (1953-1954) 379-393.
- [59] The Aluminum Association, 1525 Wilson Boulevard, Arlington, VA 2220 www.aluminum.org . Revised: April 2006.
- [60] W. F. Miao, D. E. Laughlin, Met. Mater. Trans, 31(A) (2000) 361-371.
- [61] [Blondeau. 2001b] Blondeau, R. 2001b. procédés et applications industrielles du soudage. Traité Mécanique et ingénierie des Matériaux, Herneces Sciences Publications.
- [62] B.Thomas; G.Henry (durcissement des aciers et alliages) techniques de l'ingénieur précis MI 12.
- [63] Claude Philip ; (soudage des alliages d'aluminium), 2007
- [64] Baiju Sasidharan, K.P.Narayanan, R.Arivazhakan, "Influence of Interface Surface Geometries In The Tensile Characteristics Of Friction Welded Joints From Aluminium Alloys", International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology, Volume 2, Special Issue 1, December 2013.
- [65] H. Khalid Rafi, G.D. Janaki Ram, G. Phanikumar, K. Prasad Rao, "Microstructure and tensile properties of friction welded aluminum alloy AA7075 T6", Materials and Design 31 (2010) 2375–2380.
- [66] Shen Z, Yang X, Zhang Z, Cui L, Li T (2013) Microstructure and failure mechanisms of refill friction stir spot welded 7075-T6 aluminum alloy joints. Mater Des 44:476–486
- [67] Kubit A, Kluz R, Trzepieciński T, Wydrzyński D, Bochnowski W (2018) Analysis of the mechanical properties and of micrographs of refill friction stir spot welded 7075-T6 aluminium sheets. Arch Civil Mech Eng 18(1):235–244.
- [68] Nigeria, Emel Taban and Erdinc Kaluc, Kocaeli,(Friction stir spot welding of aluminum alloys: A recent review). Dr. Emel Taban Kocaeli University Engineering Faculty Dept. of Mechanical Engineering, 41380, Kocaeli, Izmit, Turkey,2015 p.610

[69] Sato, Y., Y. Kurihara, and H. Kokawa. Microstructural characteristics of dissimilar butt friction stir welds of AA7075 and AA2024. in Proc. 6th Int. FSW Symp., Saint-Sauveur, Que., Canada. 2006.

[70] S. Lathabai, M.J. Painter, G.M.D. Cantin, V.K. Tyagi, “Friction spot joining of an extruded Al-Mg-Si alloy”, Scripta Materialia, vol. 55, 2006.

[71] Y. Tozaki et al. / Journal of Materials Processing Technology 210 (2010) 844–851

[72] Justin Blaber, Antonia Antoniou. Ncorr (Version 1.2) Instruction Manual. Georgia Institute of Technology (8/7/2014).

[73] Václav Nežerka. Ncorr_post (Version 1.1) open-source Digital Image Correlation (DIC) post-processing tool, Instruction Manual. Department of Mechanics, FCE, CTU in Prague (7/2014).

[74] Václav Nežerka. Ncorr_post_CSTool (Version 1.1) open-source Digital Image Correlation (DIC) post- processing tool to extract and display strains in a cross-section,Instruction Manual. Department of Mechanics, FCE, CTU in Prague (8/2015)

