

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université M'Hamed Bougara - Boumerdès
Faculté des Hydrocarbures et de la Chimie



Département Transport et Equipements des Hydrocarbures



Mémoire de fin d'études
En vue de l'obtention du diplôme de

Master

Domaine : Sciences et Technologies

Filière : Hydrocarbure

Option : Génie mécanique- Mécanique Des Chantiers Pétroliers (MACP-18)

Présenté par : ARAB AHMED
DIREM MOHAMMED

THEME

**Etude de l'amélioration de la qualité (structure) des soudures
réalisées par point par friction malaxage FSSW**

Devant le jury :

	Nom et Prénom	Grade	Université/Affiliation
Examineur	BENBRIK ABDERRAHMANE	PROFISSEUR	UMBB
Examineur	BLOUL BENATTIA	MC/B	UMBB
Examineur	HARHOUT RIAD	MC/B	UMBB
Examineur	SABRI KHIER	MC/B	UMBB
Encadreur	GACEB MOHAMED	PROFISSEUR	UMBB
CO- Encadreur	HADJI IDIR	Maitre de Recherche	CRTI, Alger

Boumerdès 2023

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 mené 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 de la 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, grande 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 : A mes chers parents qui m'ont aidé par leur présence et leur soutien.

À mes frères et sœurs

A mes chers oncles. Et à tous les membres de la famille ARAB et la famille ALI AHMED

Aussi, je dédie ce travail à tous mes chers amis surtout :
Mohammed- Abde Rahim – Radoune – Hamou - Yakoub
– Abde Latife ...

Sans oublier tous mes collègues des promotions
Mécaniques des chantiers pétroliers MACP18

ARAB AHMED

Dédicace 02

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

Un grand remerciement à mon Père, ma mère et ma famille pour son encouragement.

Mes amies et mes collègues des promotions H18.
A tous les gens qui m'a ont aidée de près ou de loin.

MOHAMMED DIREM

ملخص

تركز في هذا البحث على دراسة نؤزفة اللحام بالاحتكاك الخلطي، وتطبيقها في التجميعات الميكانيكية والهياكل المعدنية باستخدام سبائك الألومنيوم 0707. يهدف البحث إلى تقليل وزن هذه الهياكل واستبدال طرق التجميع التقليدية مثل المسامير الميكانيكية بعمليات اللحام لتحقيق هذا الهدف، قمننا بلحام صنفائح الألومنيوم باستخدام اعماق غطس مختلفة وسرعة دوران ثابتة. لؤد استخدما طرق تخطيطية بسيطة وفعالة لتؤؤؤؤؤؤ جودة اللحام وتأثيره على الخصائص الميكانيكية للمواد الأساسية. تضمنت هذه الطرق اختبارات ميكانيكية مثل اختبار الشد واختبار الصلابة. نم أيضا إجراء دراسة موجهة للتحقق من مناطق اللحام المختلفة، ونم تحديدها على أنها ZAT و ZM و ZATM. تشكل هذه المناطق نتيجة للحرارة المولدة نتيجة الاحتكاك بين الأداة وصنفائح الألومنيوم. لاحظنا أن زيادة عمق اختراق الكف يزيد من قوة اللحام، حيث حققنا قوة شد تصل إلى 0707 كيلو نيوتن عند سرعة دوران قدرها 0077 دورة في الدقيقة وعمق اختراق بلغ 312 مم ني اللحام بنقطة واحدة و 07 كيلو نيوتن ني اللحام بنقطتين عند عمق اختراق بلغ 370 مم.

Abstract

In this research we have concentrated on the study of the technique of friction stir spot welding, and its application in mechanical assemblies and metal structures using 7075 t6 aluminum alloy. The research aims to reduce the weight of these structures and replace traditional assembly methods such as mechanical rivets with welding processes. To achieve this goal, we welded the aluminum sheets using different depths of penetration and a constant rotation speed. We used simple and effective analytical methods to evaluate the quality of welding and its impact on the mechanical properties of the base materials. These methods included mechanical tests such as tensile and hardness tests. A macro and microscopic study was also conducted to verify the different welding areas, and it was identified as ZM, ZAT and ZATM. These zones are the result of the heat generated by the friction between the tool and the aluminum sheets. We observed that increasing the depth of penetration of the shoulder increases the strength of the weld joint, as we achieved tensile strength of up to 7.75 kN at a rotation speed of 1400 rpm and a penetration depth of 2.3 mm for single point welding and 15 kN for two-point welding at a penetration depth of 2.4 mm.

Résumé

Dans cette recherche, nous avons concentrés sur l'étude de la technique de soudage par point par friction malaxage, et son application dans les assemblages mécaniques et les structures métalliques utilisant l'alliage d'aluminium 7075 t6. La recherche vise à réduire le poids de ces structures et à remplacer les méthodes d'assemblage traditionnel tel que les rivets mécaniques par des procédés de soudage. Pour atteindre cet objectif, nous avons soudé les tôles d'aluminium en utilisant différentes profondeurs de plongée et une vitesse de rotation constante. Nous avons utilisé des méthodes analytiques simples et efficaces pour évaluer la qualité du soudage et son impact sur les propriétés mécaniques des matériaux de base. Ces méthodes comprenaient des essais mécaniques tels que l'essai de traction et l'essai de dureté. Une étude macro et microscopique a également été menée pour vérifier les différentes zones de soudage, et il a été identifié comme ZM, ZAT et ZATM. Ces zones sont le résultat de la chaleur générée par le frottement entre l'outil et les tôles d'aluminium. Nous avons observé que l'augmentation de la profondeur de pénétration de l'épaulement augmente la résistance du joint de soudure, car nous avons atteint une résistance à la traction pouvant atteindre 7,75 kN à une vitesse de rotation de 1400 tr/min et une profondeur de pénétration de 2,3 mm cas de soudage par un seule point et de 15 kN à un soudage de deux points à une profondeur de pénétration de 2,4 mm

Sommaire

REMERCIEMENT

SOMMAIRE

LISTE DES FIGURES

LISTE DES TABLEAUX

INTRODUCTION GENERALE	1
I) CHAPITRE1:ETUDEBIBLIOGRAPHIQUE	4
I.1) Partie 1 : Soudage par friction malaxage	5
I.1.1) Introduction	6
I.1.2) Principe du soudage par friction malaxage	7
I.1.3) Les différents types de soudage par friction malaxage	8
I.2) Partie 2 : Soudage par point par friction malaxage	10
I.2.1) Introduction	11
I.2.2) Le principe général du procédé FSSW	11
I.2.3) Présentation de l’outil FSSW	12
I.2.4) Les différentes technologies d’outil	16
I.2.5) Avantages et limitations du procédé FSSW	18
I.2.6) Les cycles de soudage FSSW	18
I.2.7) Macrostructure du joint soudé des plaques FSSW	19
I.2.8) Essais de traction classique sur les matériaux	21
I.2.9) Essais de traction-cisaillement sur les éprouvettes soudées	22
I.2.10) Technique de corrélation d’images numérique	25
I.3) Partie 3 : Aluminium et ses alliages	27
I.3.1) Introduction	28
I.3.2) Principales caractéristiques de l’aluminium pur	28
I.3.3) Les Nuances des alliages d’aluminium	28
I.3.4) Alliages de la série 7XXX	29
I.3.5) Alliage d’aluminium AA7075	29
I.3.6) Soudabilité	31
I.3.7) Soudage FSSW des alliages d’aluminium	31
I.3.8) Conclusion	32

II) CHAPITRE 2 : TECHNIQUES ET PROCEDURES EXPERIMENTALE	33
II.1) Etude expérimentale.....	34
II.1.1) Outil de soudage.....	34
II.1.2) Machine de soudage	35
II.1.3) Les paramètres de soudage.....	38
II.1.4) Les différentes configurations assemblées	38
II.1.5) Caractérisation des soudeurs	39
III) CHAPITRE 3 : RESULTATS ET DISCUSSION	46
III.1) Introduction.....	47
III.2) Analyses microstructurales	47
III.2.1) Macrographie du Joint soudé.....	47
III.2.2) L'évolution de la microstructure.....	48
III.3) Comportement mécanique global	50
III.3.1) Essai de traction-cisaillement du joint avec un point	50
III.3.2) Essai de traction-cisaillement du joint avec 2 points de soudures.....	51
III.3.3) L'effet de la profondeur de pénétration sur le mode de rupture	52
III.4) Comportement mécanique local.....	55
III.4.1) Microdureté	55
III.4.2) Corrélation d'images numérique	57
CONCLUSION.....	69
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	72

Liste des figures

Figure 1 : Principe du soudage par friction malaxage.....	7
Figure 2 : Etapes du soudage bout à bout.....	8
Figure 3 : Principe du FSW par recouvrement.....	9
Figure 4 : Principe du soudage par point par friction malaxage.....	9
Figure 5 : Procédé du soudage par point par friction malaxage.....	12
Figure 6 : Surface supérieure de soudage par points.....	12
Figure 7 : Schématisation de l’outil FSSW.....	13
Figure 8 : Différentes géométries et formes utilisées pour l'épaulement d'un outil FSSW.....	14
Figure 9 : Synthèse des géométries et des formes utilisées pour le pion FSSW.....	15
Figure 10 : Outil conventionnel.....	16
Figure 11: Outil FSSW à pion rétractable.....	17
Figure 12: Configuration de l'outil à double épaulement.....	17
Figure 13 : Variation de charge et du couple avec le temps.....	19
Figure 14 : Macrographie typique montrant diverses zones microstructurales de l'alliage FSSW : (a) Coupe transversale, (b) Métal de base, (c) Caractéristiques microstructurales dans les SZ, TMAZ et HAZ [26].....	20
Figure 15 : Géométrie et dimensions de l'éprouvette en forme haltère.....	22
Figure 16: Courbe typique contrainte-déplacement d'une éprouvette Aluminium 6061-T5....	22
Figure 17 : géométrie des éprouvettes utilisées pour les essais de traction-cisaillement.....	23
Figure 18: Essai de traction d'une éprouvette soudée par FSSW.....	23
Figure 19 : courbe typique charge - déplacement (assemblage avec 1 point) Soudée avec une vitesse de 1400 Tr/min avec différents distance de pénétration.....	23
Figure 20 : dimensions des éprouvettes soudées par FSSW avec deux points.....	24
Figure 21 : schéma de principe de la technique de corrélation d'images.....	25
Figure 22 : (a) image référence (initiale). (b) Image déformée (actuelle).....	26
Figure 23 : Tôle en alliage d'aluminium 7075-T6.....	34
Figure 24 : L'outil FSSW.....	35
Figure 25 : machine de soudage (Fraiseuse vertical FU 250*1000/2).....	35
Figure 26 : Représentation schématique des tôles superposées l'une sur l'autre de dimension 100X30X2 mm.....	36

Figure 27 : système de bridage.....	37
Figure 28 Tôles soudées avec un mauvais bridage	37
Figure 29 : Les différentes configurations assemblées : a) un point, b) deux points sur face opposé, c) deux points sur la même face.....	38
Figure 30 : a) Machine de traction (MTS Criterion™ Model 45) b) Eprouvettes préparées pour l'essai de traction.....	39
Figure 31: Matériel utilisé pour la corrélation d'image digitale.....	40
Figure 32: Etapes de préparation des mouchetis sur les éprouvettes	41
Figure 33: les peintures noires et blanches.....	41
Figure 34: Méthode de découpage des échantillons.....	42
Figure 35 : MECATECH 264 (Polissage automatique)	43
Figure 36 : échantillons (2.1/2.2/2.3/2.4)	43
Figure 37 : a) microscope optique b) macroscopie optique	44
Figure 38 : Micro d'uroètre Utilisée (BUELER 1600/4300).....	45
Figure 39 : Représentation schématique des zones testées pendant l'essai de micro dureté....	45
Figure 40: Observation macroscopique des différentes zones des échantillons 2.1, 2.2, 2.3 et 2.4mm.....	47
Figure 41 : microstructure de la ZMB, ZAT et la ZATM dans l'échantillon B.....	48
Figure 42: montre l'évolution de la microstructure Ech 2.4	49
Figure 43 : courbe typique charge - déplacement (assemblage avec 1 point) Soudée avec une vitesse de rotation 1400 tr/min avec différents distance de pénétration.....	50
Figure 44: Effets des différentes profondeurs de pénétration sur : a) la résistance maximale à la traction b) le déplacement	51
Figure 45: courbe typique charge - déplacement (assemblage avec 2 point).....	52
Figure 46 : Histogramme Force-Profondeur entre assemblage avec 1 point et 2points de soudure	52
Figure 47 Illustration du mode de rupture par arrachement total.....	53
Figure 48 Mode de rupture observé aux conditions de soudage par FSSW.....	53
Figure 49 : photographies illustrent l'effet la profondeur de pénétration sur la zone malaxée	54
Figure 50 : Diagramme montrant la relation la profondeur de pénétration et le diamètre et l'épaisseur de l'empreinte du pion de l'outil.....	54
Figure 51 : représentation graphique des résultats de dureté sur les échantillons A, B, C et D	56

Figure 52 : Courbe de traction-cisaillement sur une éprouvette soudée par FSSW A la profondeur de pénétration 2.3mm	60
Figure 53: Illustration de champs de déformation et les champs de déformation d'une éprouvette soudée par FSSW durant un essai de traction-cisaillement avec CID 0.25 KN jusqu'à 2 KN	61
Figure 54 : Illustration de champs de déformation et les champs de déformation d'une éprouvette soudée par FSSW durant un essai de traction-cisaillement avec CID 6 KN jusqu'à 7.75 KN	62
Figure 55: carte de champ déformation montrant la position de la face avant par rapport à l'arrière à une force de 0,25 KN	63
Figure 56: a) - Carte des champs de déformation à 7.75KN avec la ligne centrale,	64
Figure 57: les champs de déformation de la face avant des différents éprouvettes soudés par FSSW	64
Figure 58 : Illustration des champs de déformation d'une éprouvette soudée en deux points sur la même face.....	65
Figure 59 : Profile de déformation prélevée dans la ligne centrale suivant la direction de la traction d'une éprouvette soudée en deux points sur la même face	66
Figure 60 : Profile de déformation prélevée dans la ligne centrale suivant la direction de la traction d'une éprouvette soudée en deux points sur face différentes.....	67
Figure 61 : Illustration des Champs de déformation d'une éprouvette soudée en deux points sur face différentes face.....	68

Liste des tableaux

Tableau 1 : Année d'apparition des principaux procédés de soudage.....	6
Tableau 2 : Synthèse des différents matériaux d'outil couramment utilisés.....	16
Tableau 3: Désignation des alliages d'aluminium.....	29
Tableau 4 : Composition de l'alliage 7075T6	30
Tableau 5 : Caractéristiques physiques et mécaniques de l'alliage 7075 T6.....	30
Tableau 6: Paramètre de la machine de fraisage	36
Tableau 7: Les paramètres utilisés pendant le soudage par FSSW pour 1 point.....	38

Nomenclature:

FSW :	Friction Stir Spot Welding
FSSW :	Friction Stir Spot Welding
ZM :	Zone malaxé
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

INTRODUCTION GENERALE

Introduction générale

Le soudage est l'un des moyens d'assemblage des structures métalliques les plus répandus et les plus utilisés et sans lequel plusieurs applications industrielles n'auraient pas été possibles. C'est pourquoi les procédés de soudage sont en constant développement depuis le XIXe siècle passant par le soudage au chalumeau puis le soudage à l'arc jusqu'au soudage laser. L'un des procédés développé et relativement récent est le soudage par friction malaxage communément connu par FSW « Friction_Stir_Welding », qui présente de nombreux avantages particulièrement dans les secteurs aéronautiques, automobile et spatiale. Ces secteurs industriels exigent un poids minimal dans les structures, des propriétés mécaniques adéquates, facilité de mise en œuvre et fiabilités des assemblages.

Le procédé FSW a été breveté au début des années 90 par TWI (The Welding Institut) en grande Bretagne et consiste à assembler des matériaux en phase solide (à l'état pâteux) grâce à un outil cylindrique spécifique mis en rotation. Ce dernier est constitué d'un épaulement qui sert à générer la chaleur par frottement et d'un pion qui a pour rôle de malaxer la matière plastifiée pour former le cordon de soudure. Le pion pénètre dans la pièce jusqu'à ce que l'épaulement soit en contact avec la face de la pièce à souder puis l'outil commence son avancée le long d'une ligne de soudure tout en gardant la température du matériau inférieure à son point de fusion. Cette technologie présente de nombreux avantages par rapport aux procédés conventionnels. En effet, l'absence de fusion signifie l'absence de problèmes de solidification et de recristallisation, il y a moins de distorsion de la matière et donc moins de contraintes résiduelles. Ce procédé permet aussi l'assemblage des alliages difficilement soudables par les techniques conventionnelles et représente une alternative de soudage.

En 2003, la méthode de soudage par points a été développée par Mazda Motor Company sur la base du soudage par points par friction (FSW), qui est l'une des méthodes de soudage à l'état solide [1,2]. Avec cette méthode appelée soudage par points par friction-malaxage (FSSW), les pièces sont soudées sans fusion. Par conséquent, les défauts de soudage tels que la porosité et les fissures dans le cordon de soudure peuvent être minimisés[3,4]. La technique FSSW, qui présente des propriétés mécaniques élevées et qui engendre une faible distorsion et une faible contrainte résiduelle en raison de la faible différence de température dans le processus de soudage, offre également des avantages tels que la facilité d'utilisation, une résistance élevée à la corrosion, un faible apport d'énergie et faible coût [4,5]. Avec ces propriétés, la technique FSSW remplace le soudage par résistance par points dans l'industrie automobile.

Le FSSW présente certains autres 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 [6].

***I)* CHAPITRE 1:ETUDE
BIBLIOGRAPHIQUE**

I.1) Partie 1 : Soudage par friction malaxage

I.1.1) Introduction

Le soudage FSW, qui peut se traduire par « friction-malaxage », est une technologie prometteuse pour l'assemblage de pièces d'aluminium puisqu'elle permet d'assembler des alliages d'aluminium I à haute résistance, sans passer par la fusion (alliages d'aluminium des séries 2000, 6000 et 7000 par exemple) et sans apport de matière. Ce procédé est également utilisé et très apprécié pour l'assemblage de matériaux dissemblables. Ce procédé d'assemblage, qui est arrivé à maturité depuis quelques années, présente un intérêt certain car une fois les paramètres de soudage fixés, la répétabilité est excellente. De plus il permet une grande souplesse d'utilisation et très peu de risques puisque ce type de soudage ne nécessite pas de gaz de protection.

Le soudage par friction malaxage, plus communément appelé Friction StirWelding (FSW), a été développé par Mr Thomas Wayne à l'institut de soudure Britannique (The Welding Institute, TWI). Le premier brevet sur cette technologie a été déposé en décembre 1991 par TWI.

Le tableau 1 résume l'historique d'apparition des principaux procédés de soudage jusqu'à l'entrée du soudage FSW.

Tableau 1 : Année d'apparition des principaux procédés de soudage [7]

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

Liste non exhaustive d'apparition des procédés de soudage

I.1.2) Principe du soudage par friction malaxage :

La figure 1 illustre le principe du soudage FSW. Le procédé de soudage par friction et malaxage utilise un outil à haute résistance mécanique et thermique qui est constitué d'un épaulement (shoulder) prolongé par un pion (pin) coaxial qui réalise le malaxage. Les tôles à souder sont fixées soigneusement sur un montage d'appui. La chaleur, générée par le frottement de l'épaulement et celle du pion, transforme la matière à l'état pâteux au voisinage de l'outil et facilite la pénétration et le déplacement de l'outil le long du joint à souder pour former la soudure après refroidissement. Les matériaux, utilisés pour les outils de soudage des tôles à base d'aluminium, sont, principalement, des aciers résistants aux hautes températures. La géométrie de l'outil est très importante dans le développement du procédé Elle joue un rôle essentiel dans le malaxage de la matière et la génération de la chaleur. Le choix des dimensions et du profile du pion dépend de la nature des matériaux constituant les tôles à souder et de leur épaisseur[8].

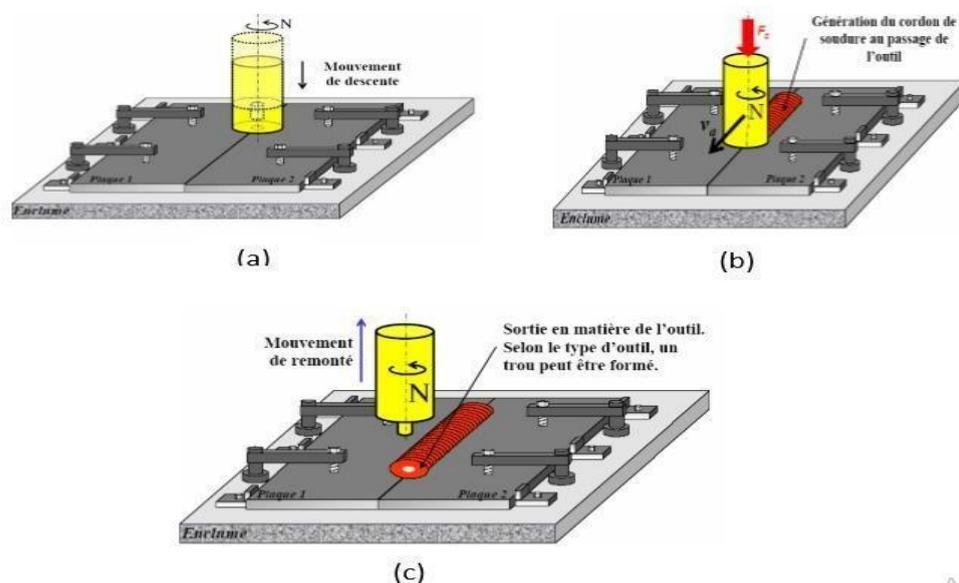


Figure 1 : Principe du soudage par friction malaxage [8]

(a) : Phase de plongée (b) : Phase de soudage (c) : Retrait de l'outil

Les paramètres principaux de conduite de la phase de soudage sont :

- La vitesse d'avance de l'outil ou vitesse d'avance.
- 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.
- La fréquence de rotation N .
- L'angle d'inclinaison de l'outil dénommé angle de déplacement i

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 [MIS05]. Le choix de ces paramètres est donc primordial

I.1.3) 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 FSW peut être classifié en trois types : le soudage bout à bout, le soudage par recouvrement et le soudage par point.

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 leur écartement. Il permet de réaliser des cordons de soudures linéaires. La soudure est effectuée principalement en trois étapes successives. (Voir figure 2)

- Phase de pénétration
- Phase de soudage
- Phase de retrait

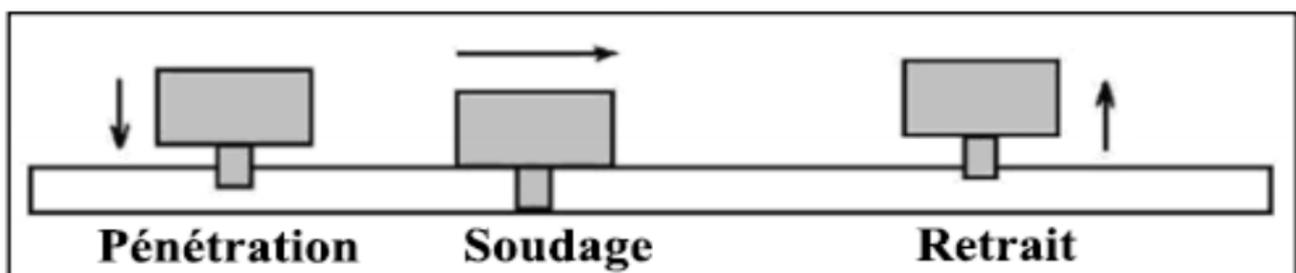


Figure 2 : Etapes du soudage bout à bout

b) Soudage par recouvrement :

La procédure du soudage FSW par recouvrement est semblable à celle d'une soudure bout à bout avec par seule différence la disposition en chevauchement des pièces à souder. Par

conséquent, il y a une complexité additionnelle liée au transfert thermique réel entre les deux pièces. L'outil utilisé pour les joints de recouvrement est différent de celui utilisé pour le soudage bout à bout afin qu'il puisse malaxer les deux matériaux. (Voir figure 3)

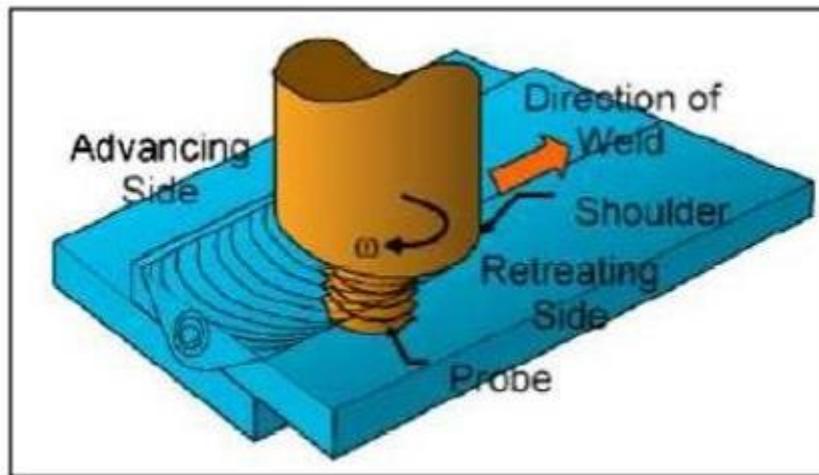


Figure 3 : Principe du FSW par recouvrement

c) Soudage par point:

Le soudage par points par friction malaxage est un processus relativement récent permettant un assemblage par point de différents alliages. Le malaxage de la matière de deux pièces généralement superposées crée un point de soudure. (Voir figure 4)

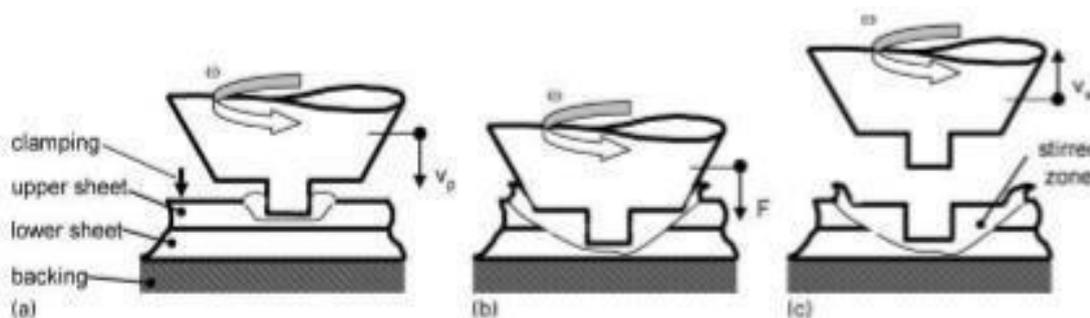


Figure 4 : Principe du soudage par point par friction malaxage [10]

I.2) Partie 2 : Soudage par point par friction malaxage

I.2.1) Introduction

Le soudage par point par friction malaxage (FSSW) est une technologie de soudure dérivée du soudage par friction malaxage FSW sans mouvement latéral de l'outil durant le processus de soudage et appliquée en général pour l'aluminium et ses alliages dans des environnements divers tels que la fabrication d'automobile par exemple [11,12]. Le soudage FSSW possède de nombreux atouts : le procédé est écologique, il ne nécessite pas d'apport de matière et dans la majorité des cas, pas de protection gazeuse. En évitant la fusion des matériaux, il crée des soudures dont la microstructure est de meilleure qualité que le matériau de base. Les contraintes résiduelles relativement faibles et la zone malaxée à grains fins contribuent à offrir d'excellentes propriétés de ductilité et de résistance à la traction. De plus, les déformations étant relativement faibles, les problèmes rencontrés lors du soudage par les procédés traditionnels (soufflures, fissuration à chaud, inclusions) sont considérablement diminués, et ce procédé permet alors d'assembler des matériaux réputés pour être difficilement soudables (certains alliages d'aluminium, alliages de magnésium...).

Le soudage par points par friction (FSSW) en tant que modification linéaire du processus FSW a gagné en popularité au point de remplacer le soudage par points par résistance (SW pour spot welding) conventionnel. Cette pratique produit un joint soudé par point unique à partir du chevauchement des composants de matériaux adjacents.

FSSW a été introduit lors du développement du capot et du panneau de porte arrière Manda RX-8 en 2003 remplacement du soudage par points et du rivetage des alliages légers. Cette méthode de soudage peut souder l'alliage d'aluminium dans une position de recouvrement et bout à bout[12]. Grâce à sa haute qualité de produit, le FSSW est parfaitement utilisé dans l'industrie automobile[14,15].

I.2.2) Le principe général du procédé FSSW

Le procédé utilise un outil rotatif qui est plongé dans les tôles à assembler, qui sont en grande partie en configuration de recouvrement. Après avoir atteint la profondeur de plongée définie, l'outil est placé dans cette position pendant une durée spécifique appelée période de repos. Ensuite, l'outil rotatif est retiré des pièces soudées, laissant derrière lui une soudure par points par friction malaxage. La génération de chaleur, le mélange des matériaux (déformation plastique) autour de l'axe, la géométrie de la soudure et les propriétés mécaniques du joint soudé

qui en résultent sont essentiellement déterminées par la pénétration de l'outil et le temps de séjour [15].

Les procédés de soudage par points par friction malaxage utilisent des outils semblables pour joindre différents matériaux [16]. Il a été établi que l'épaule génère la majeure partie de la chaleur de frottement ou de déformation, tandis que le pion facilite la circulation du matériau entre les tôles. La vitesse de rotation de l'outil, la profondeur de plongée de l'outil et le temps de repos sont les autres paramètres concernés par la méthode FSSW. Les paramètres mentionnés ci-dessus jouent un rôle considérable dans la détermination de la résistance et de la surface des joints soudés par points produits. La figure 5 montre les phases du procédé FSSW. Un exemple de soudure par FSSW est illustré par la figure 6.

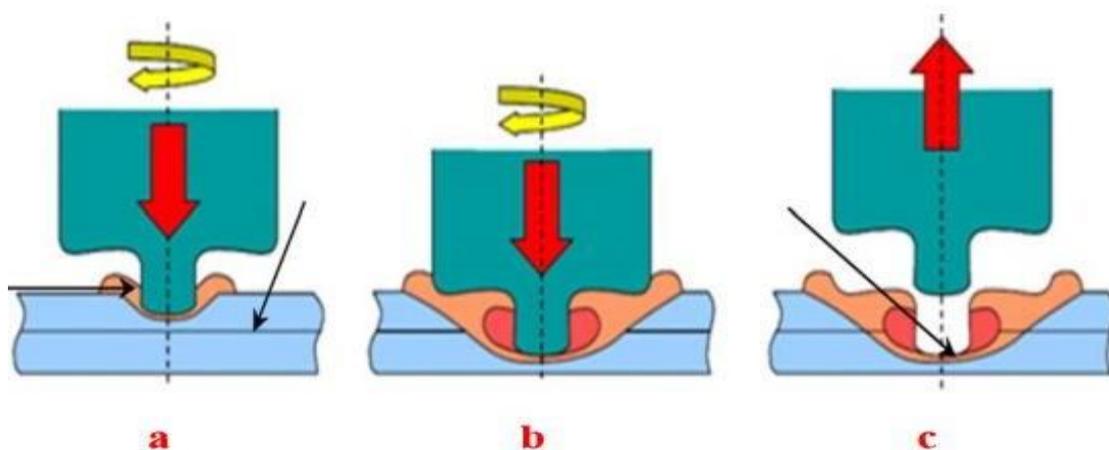


Figure 5 : Procédé du soudage par point par friction malaxage

a) plongée b) maintient c) rétraction [17].



Figure 6 : Surface supérieure de soudage par points [18]

I.2.3) Présentation de l'outil FSSW

Un outil FSSW conventionnel présente deux parties principales un épaulement et un pion. Ces deux entités sont généralement coaxiales (figure 7). Les éléments surfaciques de

chaque partie constituent les zones d'interaction outil/matière.

L'épaulement et le pion peuvent présenter plusieurs formes en fonction des différents profils tels que les rainures, les filets et les gorges du pion. L'outil FSSW a fait l'objet de plusieurs améliorations principalement sur deux axes. Le premier est l'aspect géométrique afin d'avoir un meilleur écoulement de la matière. Le deuxième est au niveau matériau pour élargir la fenêtre d'application du FSSW et assurer la tenue mécanique des soudures dans les conditions sévères de soudage. Un traitement thermique améliore la dureté de l'outil et prolonge sa durée de vie.

a) Épaulement :

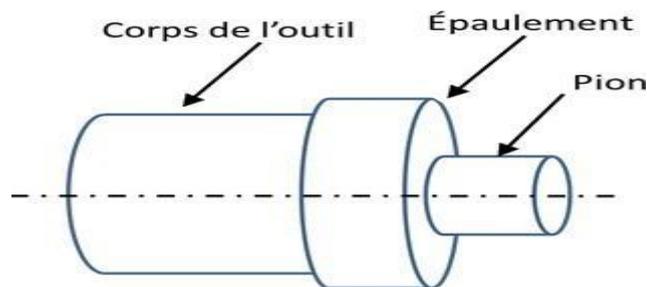


Figure 7 : Schématisation de l'outil FSSW

L'épaulement de l'outil FSSW a deux principaux rôles en soudage par friction malaxage :

Le premier est celui de confiner la matière autour du pion. En effet, 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. La pénétration de l'épaulement (ou indentation de l'épaulement) dans la matière doit être minimale pour ne pas amincir les pièces à souder. Cette pénétration visualisée en surface permet le malaxage de la matière en surface des pièces à souder désigné par le nom flow arm.

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.

Le deuxième rôle de l'épaulement est de fournir un apport de chaleur important par l'effet du frottement dynamique. Le flux de chaleur fourni par frottement aux pièces à souder dépend du diamètre de l'épaulement. L'augmentation du diamètre de l'épaulement assure un apport de chaleur plus important et peut ainsi modifier la morphologie du cordon.

Afin d'améliorer les rôles de l'épaulement décrits précédemment, plusieurs formes ont été ajoutées sur ce dernier. La forme la plus couramment utilisée est le scroll vu sa capacité à engager la matière à l'avant de l'outil pour être malaxée et diminuer ainsi la présence du flash. En effet, le scroll permet de réaliser des soudures sans angle de soudage (tilt). Toutefois, le

choix des formes reste très dépendant de la configuration de soudage. Par exemple, il est déconseillé d'utiliser le scroll pour souder deux pièces d'épaisseur différente. Dans ce cas de figure 8, le scroll intensifie le flash[19].

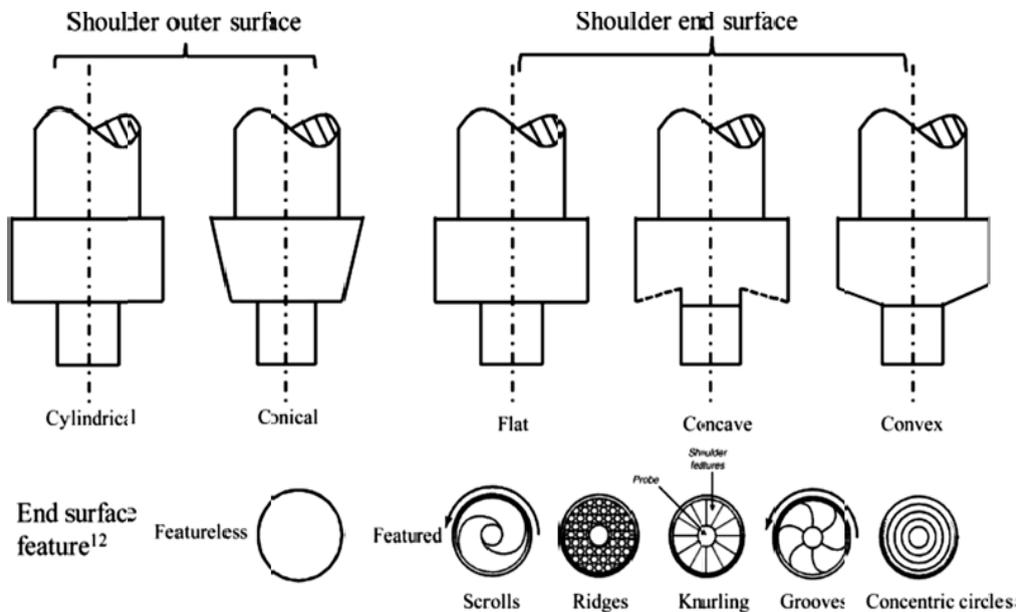


Figure 8 : Différentes géométries et formes utilisées pour l'épaulement d'un outil FSSW [19]

b) Le Pion :

Le pion est l'acteur 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 une amélioration de l'écoulement du matériau et 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.

Le pion peut présenter différentes formes pour améliorer l'écoulement de la matière et ainsi le malaxage du cordon. La figure 9 présente les formes et les géométries principales utilisées pour la conception du pion FSSW.

Le pion FSSW a un double rôle. Il doit assurer à la fois le malaxage de la matière et la génération de la chaleur par frottement et par déformation plastique.

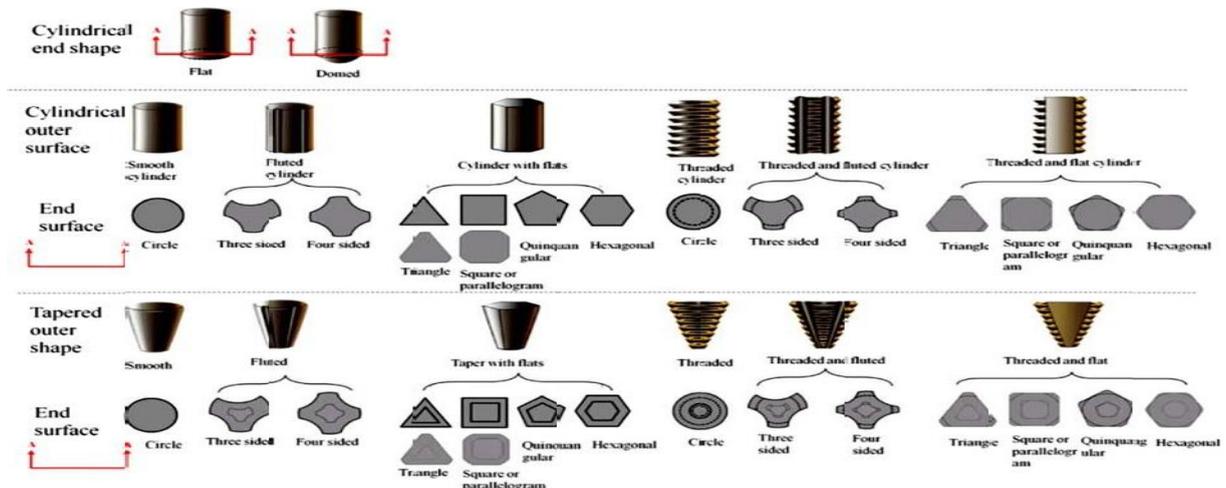


Figure 9 : Synthèse des géométries et des formes utilisées pour le pion FSSW [19]

c) Corps de l'outil

Le corps de l'outil assure le montage et le maintien de l'outil sur la broche de la machine de soudage. Généralement, le corps de l'outil FSSW n'est pas monté directement sur la broche. Il est associé à un porte outil. Dans certains cas, la longueur du corps de l'outil ou du porte-outil permet d'améliorer l'accessibilité à la ligne du joint. L'évacuation de la chaleur de l'outil par convection est assurée par la surface du corps. Pour améliorer le refroidissement de l'outil FSSW au cours du soudage, le corps de l'outil peut contenir des formes géométriques telles que les gorges.

d) Matériaux de l'outil FSSW

En FSSW conventionnel, l'outil est considéré comme non consommable. Néanmoins, les conditions extrêmes de soudage diminuent sa durée de vie et peuvent rapidement l'endommager. Le matériau de l'outil FSSW doit assurer sa résistance aux contraintes exercées par la matière. La partie active de l'outil se dégrade sous l'effet des efforts engendrés lors de l'interaction outil/matière tribologie et les conditions thermiques extrêmes. Pour chaque phase de soudage, l'outil est sollicité à des efforts différents et qui varient selon les conditions opératoires. En phase de pénétration, le pion subit un effort de forgeage important. De même lors de la phase de soudage, l'effort de cisaillement appliqué par la matière au niveau de l'épaule peut provoquer la rupture du pion. L'outil doit assurer à la fois le malaxage et le frottement avec la matière à souder. Ces fonctions dégradent rapidement l'outil, l'alternance du contact outil/matière glissement/adhérence mène à l'usure des formes usinées sur le pion et ou l'épaule.

Les matériaux des outils FSW ont été développés pour répondre aux besoins de soudage de différents types d'alliages. En raison des différentes nuances et épaisseurs des structures soudées en FSW, l'outil doit présenter pour chaque application une bonne dureté à haute température.

Tableau 2 : Synthèse des différents matériaux d'outil couramment utilisés [20]

Alliage	Epaisseur	Matériau Outil
Alliages d'aluminium	< 12 mm	Acier à outil, WC-Co
	< 26 mm	MP159
Alliage de Magnésium	< 6 mm	Acier à outil, WC
Cuivre et ses alliages	< 50 mm	Alliage de nickel, PCBN*, alliage de tungstène
	< 11 mm	Acier à outil
Alliage de titane	< 6 mm	Alliage de tungstène
Acier Inoxydable	< 6 mm	PCBN*, alliage de tungstène
Acier faiblement allié	< 10 mm	WC, PCBN*
Alliage de Nickel	< 6 mm	PCBN*, alliage de tungstène

*PCBN: Polycrystalline cubic boron nitride

I.2.4) Les différentes technologies d'outil

Il existe plusieurs technologies d'outil FSW, ils peuvent être classés dans trois catégories :

a) Outil à pion fixe (conventionnel) :

Où l'épaulement et le pion sont fixes l'un par rapport à l'autre. Généralement, ils sont formés d'un seul block (Figure 10).

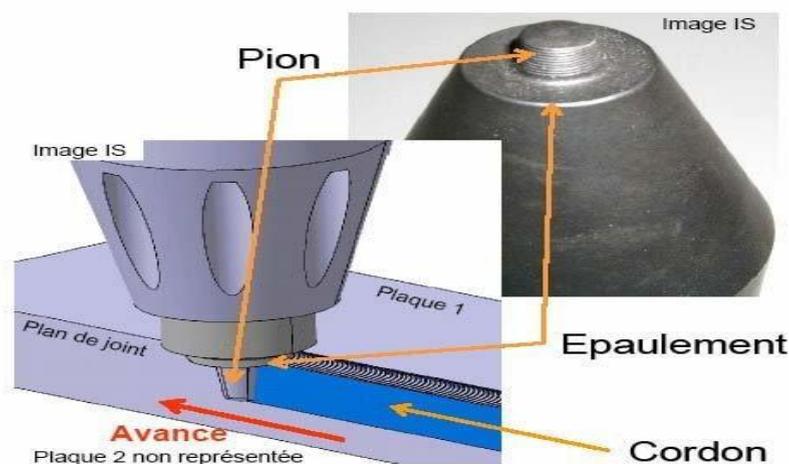


Figure 10 : Outil conventionnel [22]

b) Outil à pion ajustable (rétractable) :

Contrairement à l'outil à pion fixe, cet Outil possède un pion de longueur variable [22]. L'intérêt est de pouvoir rentrer le pion progressivement dans l'épaulement pour pouvoir souder des pièces avec une profondeur de pénétration variable selon l'épaisseur de la plaque à souder. Ces deux technologies d'outil nécessitent l'utilisation d'une enclume à l'envers des pièces pour reprendre l'effort axial F_z appliqué par l'outil sur la surface des pièces (Figure 11).

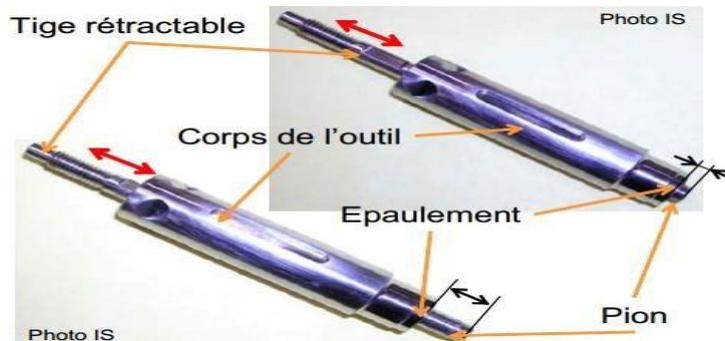


Figure 11: Outil FSSW à pion rétractable

c) Outil à double épaulement :

Deux épaulements reliés par un pion dont la longueur peut être ajustée au cours du soudage (Figure 12). Les deux épaulements viennent pincer les pièces à souder, afin de contenir la matière malaxée et apportent de la chaleur par frottement de manière symétrique [23]. Le cordon obtenu est symétrique par rapport à la demi-épaisseur des pièces, limitant ainsi leur déformation [23]. Cet outil est avantageux lorsqu'il est impossible de mettre une enclume à l'envers des pièces. De plus, à épaisseur identique, les efforts de soudage sont plus faibles que ceux nécessaires pour les deux autres technologies d'outil [23]. Une pénétration totale est toujours assurée avec cet outil.

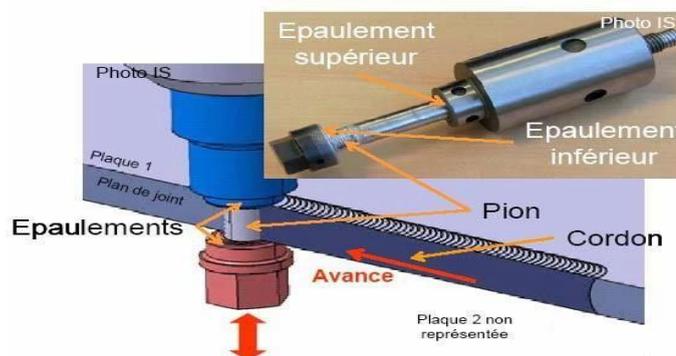


Figure 12: Configuration de l'outil à double épaulement [23]

I.2.5) Avantages et limitations du procédé FSSW :

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

a) Avantages liés au procédé :

- Large gamme d'épaisseurs soudables
- Pas de décapage chimique avant soudure pour alliages légers.
- Possibilité de souder des matériaux différents
- Procédé sans apport de matière pour la réalisation de la soudure

b) Avantages liés à la soudure :

- Gamme de matériaux très étendue
- Possibilité de soudage des alliages qui sont difficiles à souder par les procédés classiques
- Soudage à l'état solide : pas de solidification du bain de fusion (pas de défaut de porosité et pas de fissuration à chaud).
- Propriétés mécaniques bonnes
- Effets limités des contraintes résiduelles.

c) Avantages économiques et environnementaux :

- Procédé non polluant ; pas de projections de gaz nuisibles ni d'émanations de fumées.
- Procédé économique en énergie.
- Pas de circulation d'eau de refroidissement.
- Bon rendement énergétique

d) Avantages liés à l'équipement

- Automatisation facile du procédé ; contrôle par commande numérique.
- Equipement électromécanique de conception simple de type machine-outil
- Pas de protection thermique
- Consommables limités à l'outil et à l'énergie électrique
- Possibilité d'un contrôle en ligne des paramètres

I.2.6) Les cycles de soudage FSSW :

La figure 13 montre les changements de valeurs de charge et de couple pendant le test FSSW à une vitesse de rotation de 500 tr/min. L'abscisse représente le temps de traitement et les ordonnées représentent la charge et les valeurs de couple mesurées avec la cellule de charge

équipée dans le présent système. Étant donné que les éprouvettes pour les essais de soudage actuels sont composées de trois tôles collées, la charge augmente en trois étapes au fur et à mesure que le processus de soudage se poursuit. L'étape 1 est un petit saut de charge en début de plongée qui dure 1,8s, correspondant à la pénétration de la première tôle de l'éprouvette. La deuxième étape est de 1,8 à 5,3 s de temps de séjour, correspondant à la pénétration de la deuxième tôle. La dernière étape de pénétration commence à environ 5,2 s juste après que l'épaulement touche la surface de l'échantillon, et ce dernier processus se poursuit jusqu'à 9,3 s lorsque la valeur maximale de la charge est enregistrée.

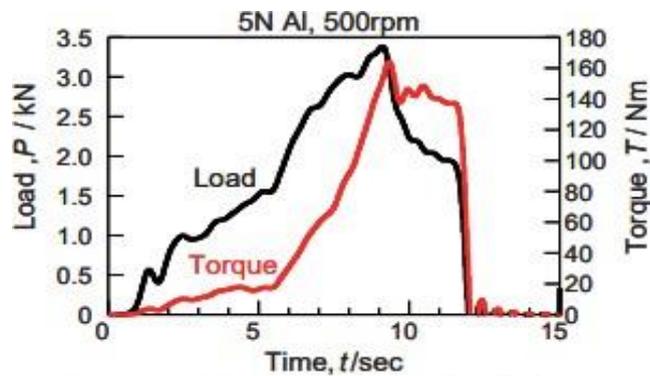


Figure 13 : Variation de charge et du couple avec le temps. [24]

La valeur du couple montre une forte augmentation après le contact de l'épaulement avec l'échantillon et la valeur la plus élevée est mesurée à environ 9,4 s, ce qui est presque le même temps que celui de la courbe de la charge. Au-delà de cette valeur maximale, la courbe de la charge montre une forte baisse jusqu'à 2,0 kN suivie d'une légère diminution jusqu'à 11,8 s. La valeur du couple dans cette étape garde presque la même valeur. La période de séjour contenant la valeur de charge maximale représente une déformation élastique et/ou plastique insuffisamment présente dans le matériau dans lequel la température n'est pas assez élevée pour le faire céder et se déformer plastiquement. Ainsi, la contrainte d'écoulement doit être calculée en utilisant la valeur de charge de cette région douce dans la courbe de charge puisqu'aucune charge supplémentaire n'est mesurée. Les chutes soudaines des valeurs de charge et de couple à 12 s correspondent à la rétraction de l'outil de soudage à la fin du soudage [24].

I.2.7) Macrostructure du joint soudé des plaques FSSW

La macrostructure de la soudure dépend du type de variante de procédé appliquée, de la géométrie de l'outil, des paramètres de soudage et des propriétés du matériau de la pièce telles

que la conductivité thermique et les conditions de refroidissement externes. La figure 14 présente une macrostructure typique d'une soudure par points conventionnelle par friction-malaxage. Sur la base des caractéristiques microstructurales de la taille des grains et des précipités, il a été constaté que la structure de la soudure est symétrique par rapport à l'axe de l'outil. FSSW produit trois zones distinctes, à savoir la zone d'agitation (SZ) ou la pépite, la zone affectée thermo mécaniquement (TMAZ) et la zone affectée par la chaleur (HAZ), qui peuvent être identifiées en séquence de la périphérie du trou de serrure vers le matériau de base. Comme le montre la figure 14, la zone de soudure présente un aspect en forme de bassin puisque le processus de soudure a lieu principalement au niveau de la tôle supérieure. Ces caractéristiques micro et macrostructurales sont également couramment identifiées dans les FSSW sans broche et de recharge. Il convient de noter qu'une zone de soudure elliptique peut être formée dans certaines conditions de soudage dans le FSSW conventionnel [25].

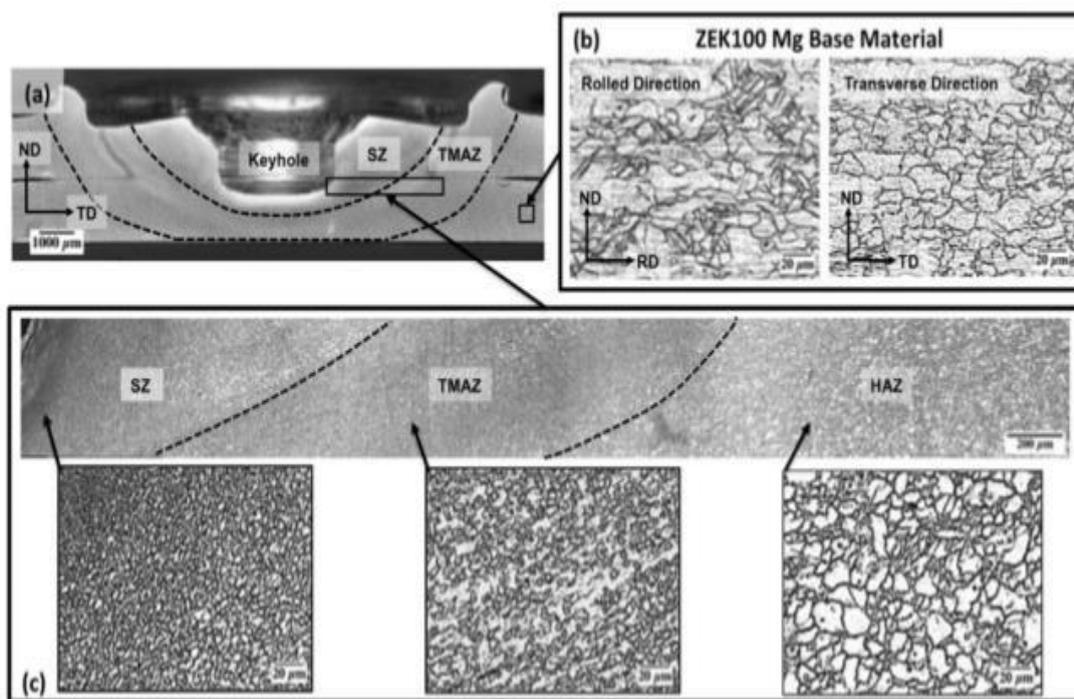


Figure 14 : Macrographie typique montrant diverses zones microstructurales de l'alliage FSSW : (a) Coupe transversale, (b) Métal de base, (c) Caractéristiques microstructurales dans les SZ, TMAZ et HAZ [26].

a) Métal de base (MB) :

Le métal de base (MB) ne subit ni déformation, ni échauffement suffisant pour modifier sa structure. Il s'agit de la partie la plus éloignée du centre de la soudure. Dans cette zone, le matériau n'est pas déformé.

b) Zone affectée thermiquement (ZAT) :

Dans cette zone plus proche du centre de la soudure, le métal a subi un cycle thermique, dont la température maximum dépasserait 250 °C, modifiant ainsi la microstructure ou les propriétés mécaniques. Cependant aucune déformation notable (observable à l'échelle de la microscopie optique notamment) n'a lieu dans cette région. La forme des grains est identique à celle rencontrée dans le métal de base.

c) Zone affectée thermo mécaniquement (ZATM) :

Cette zone, se trouvant autour du noyau. Elle est à la fois déformée plastiquement et affectée thermiquement. La frontière entre la zone centrale de la soudure et la ZATM est généralement très marquée. Une recristallisation partielle est également observée le long de cette frontière. L'évolution de la précipitation se traduit dans la ZATM par une dissolution partielle des précipités durcissant et par une précipitation hétérogène des précipités non durcissant. Dans le cas des alliages d'aluminium, les températures atteintes dans cette région s'échelonnent entre 300 °C et 400 °C.

d) Zone malaxée :

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

I.2.8) Essais de traction classique sur les matériaux:

Pour déterminer les caractéristiques mécaniques globales des matériaux, une machine d'essais de traction pilotée par un logiciel dédié (exemple : MTS) est nécessaire. Les matériaux à caractériser devraient être usinés en éprouvettes de forme haltères (figure 15). 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.

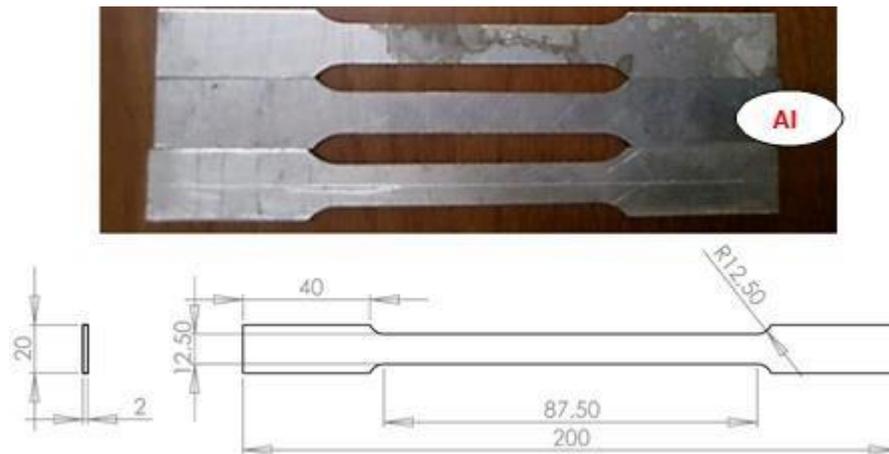


Figure 15 : Géométrie et dimensions de l'éprouvette en forme haltère.

Exemple : La figure 19 donne la courbe contrainte vraie – déformation vraie qui présente un comportement élasto-plastique de l'aluminium 6061-T5 [27]

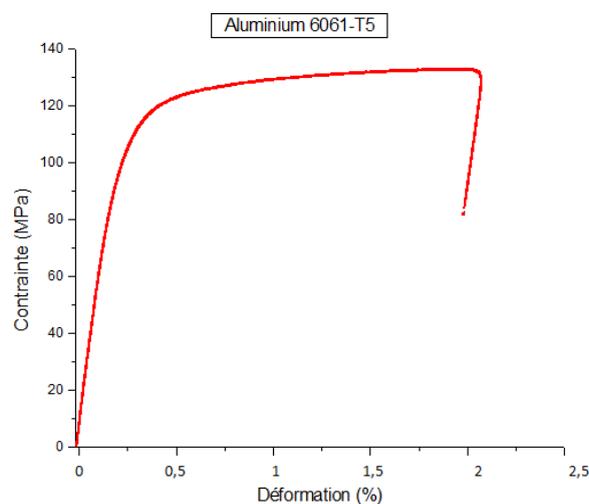


Figure 16: Courbe typique contrainte-déplacement d'une éprouvette Aluminium 6061-T5.

Les caractéristiques mécaniques déduites sont : la limite élastique $R_e = 110 \text{ MPa}$, la résistance à la traction $R_m = 137 \text{ MPa}$, la déformation $\epsilon = 0.178$ et le module de Young $E = 61.8 \text{ GPa}$.

I.2.9) Essais de traction-cisaillement sur les éprouvettes soudées :

Les éprouvettes utilisées sont préparées suivant les indications de la figure 17. La charge et le déplacement sont simultanément enregistrés pendant l'essai de traction (figure 18).

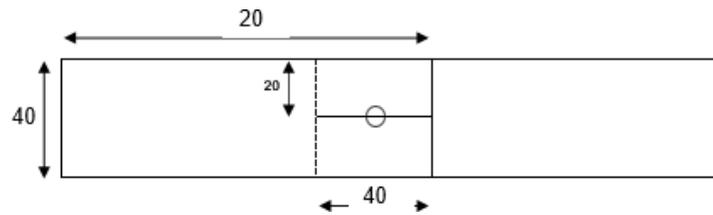


Figure 17 : géométrie des éprouvettes utilisées pour les essais de traction-cisaillement.

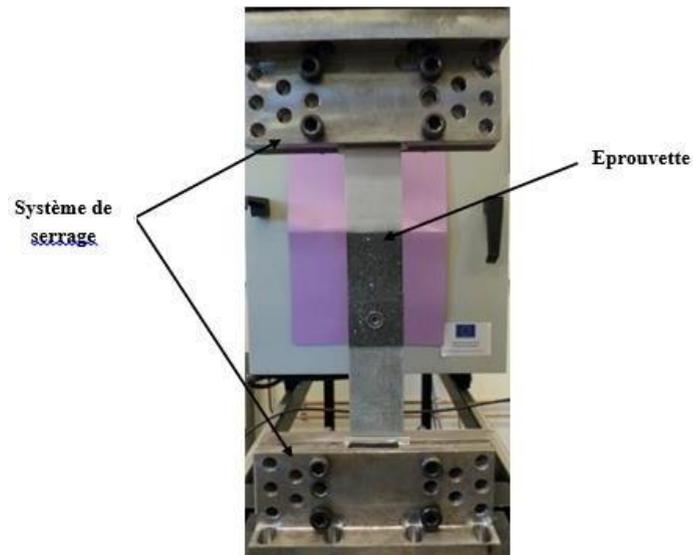


Figure 18: Essai de traction d'une éprouvette soudée par FSSW

a) Assemblage FSSW avec un point :

La figure 19 montre une courbe typique charge-déplacement des soudures réalisées par (Mekri Hichem), sa consiste en fixant la vitesse de rotation pour différents distance de pénétration du pion de l'outil. Il a constaté que plus la pénétration augmente plus la résistance à la traction augmente jusqu'à une certain distance ou la résistance commence a diminué (Figure 19).

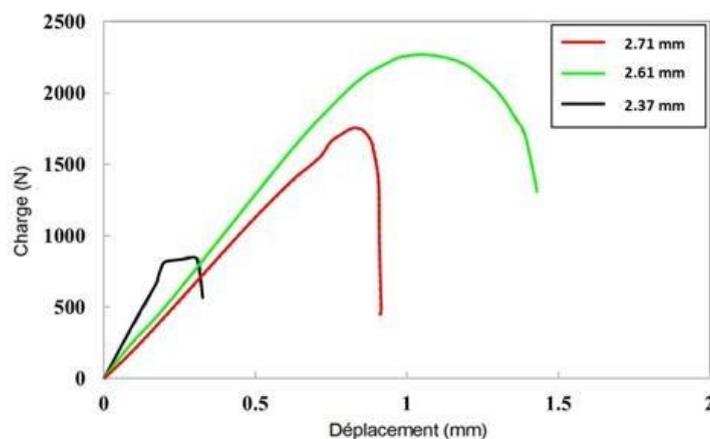


Figure 19 : courbe typique charge - déplacement (assemblage avec 1 point) Soudée avec une vitesse de 1400 Tr/min avec différents distance de pénétration.

b) Assemblage FSSW avec 2 points de soudure :

La figure 20 montre des assemblages FSSW avec deux points de soudures. Une soudure réalisée avec des points suivant la verticale de la tôle (EpV), une autre avec des points suivant l'horizontal de la tôle (EpH). Les courbes de traction montre que la charge appliquée sur l'éprouvette (Ep1 : EpH avec 2.4mm de pénétration) est assez importante et donne une bonne résistance du point de soudure par rapport à celle de (Ep2 : EpV avec 2.4mm).

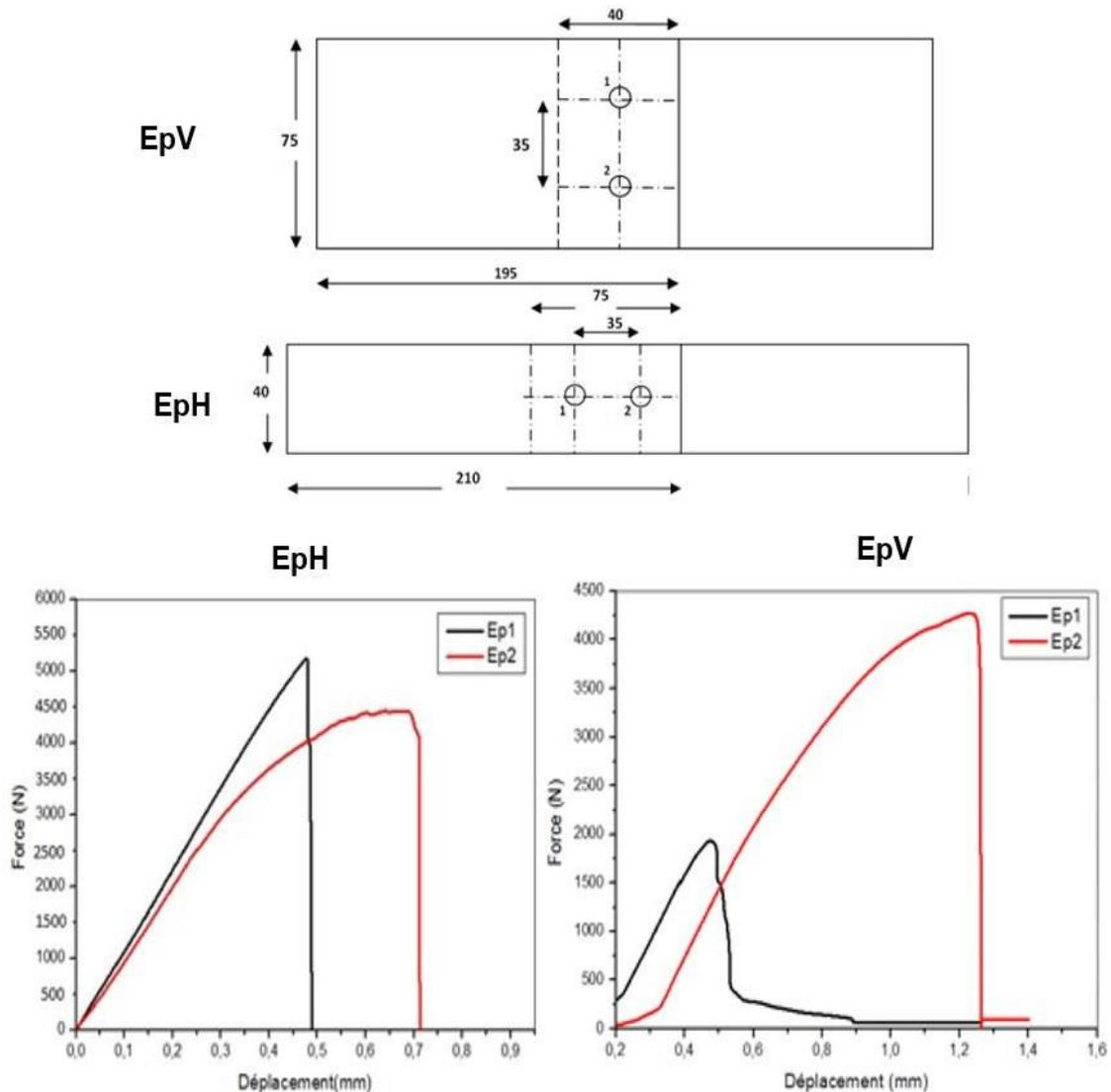


Figure 20 : dimensions des éprouvettes soudées par FSSW avec deux points
 EpH : (Ep1 = 2.4 mm ; Ep2 = 1.9 mm), EpV : (Ep1 = 1.9 mm ; Ep2 = 2.4 mm)

I.2.10) Technique de corrélation d'images numérique :

La méthode de corrélation d'images numérique, développée depuis les années 80 [31, 32] est basée sur la comparaison de deux images à niveaux de gris aléatoires enregistrées avant et après déformation. La première image est dite de «référence» et la deuxième «déformée» [30]. Elle consiste donc à rechercher le degré de ressemblance entre ces deux images. La mesure du déplacement consiste à retrouver « le déplacement » nécessaire pour que le motif de l'image de référence se superpose avec celui de l'image déformée [31]. Cette mesure est devenu possible avec les nouveaux systèmes de caméras ultra rapides [32]. La technique de corrélation d'image numérique couplée à ces systèmes peut fournir alors les champs de déplacement désirés [36, 37].

a) Principe :

Le principe de cette méthode est très simple : et consiste à déposer sur l'objet à étudier un mouchetis, ensemble de taches bien contrasté (noir sur blanc). Une caméra CCD filme l'état initial, puis l'état actuel. Pour un ensemble de zones donné, un logiciel recherche le déplacement qui procure la meilleure corrélation entre les deux zones [35] : C'est le déplacement moyen de celle-ci (figure 21). La méthode est très simple à mettre en œuvre et permet la mesure sur de très grandes structures. La précision est cependant moins bonne que celle donnée par le spéculaire ou les méthodes de moiré, mais peut atteindre jusqu'à 10^{-4} en déformation [36].

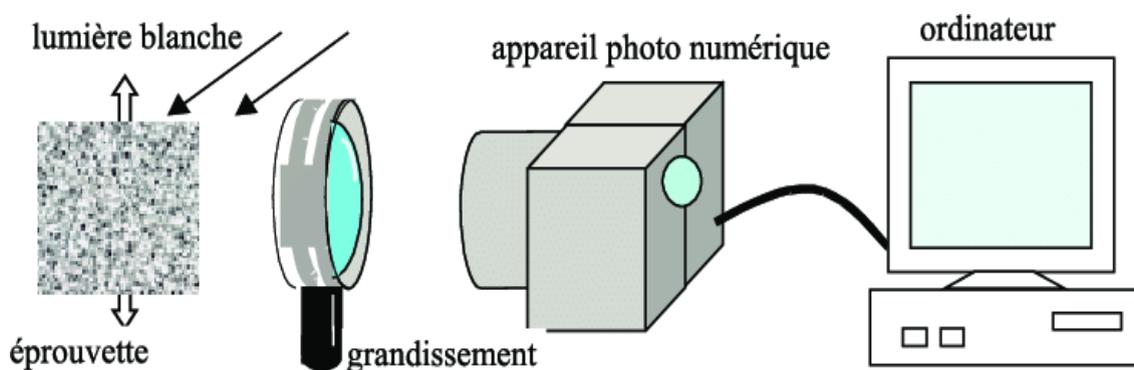


Figure 21 : schéma de principe de la technique de corrélation d'images. [36].

L'extensomètre par corrélation d'images est une technique assez nouvelle, et qui présente de grands avantages par rapport aux anciennes techniques d'extensomètre optique. Il s'agit de mesurer les champs de déplacements qui apparaissent lors d'un essai sur une éprouvette, à partir du film de l'expérience. Pour cela un logiciel permet de comparer deux images successives du

film, et à partir des écarts de luminosité la valeur du déplacement est déduite.

Pour utiliser la technique de la corrélation d'image, on filme un essai avec une caméra. Ensuite, en comparant deux images successives (Figure 22a et 22b), la mesure de la distance qu'a parcourue un point entre un temps t_0 et un temps $t_0 + \Delta t$.

Pour le même point, cette opération est répétée pour les images suivantes : on peut alors obtenir le déplacement total. Ces calculs sont faits pour chaque point repéré par la caméra, on obtient alors le déplacement de la matière [37].

A partir du champ des déplacements, par calcul, on peut de même obtenir le champ de déformations de l'éprouvette ainsi que le champ des contraintes. La caractéristique principale de cette technique est que l'on obtient des champs de déplacements ou de déformations.

L'intérêt de la corrélation d'images est de pouvoir visualiser les champs au sein d'une éprouvette.

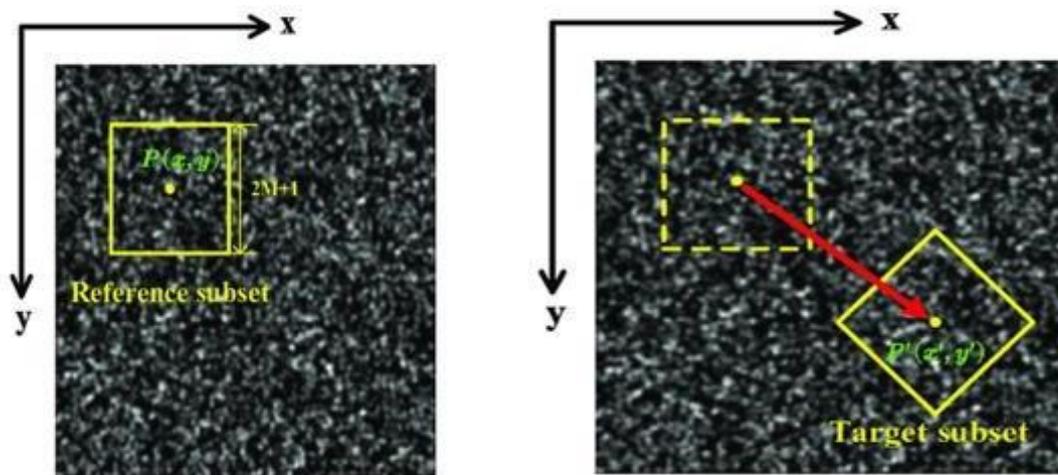


Figure 22 : (a) image référence (initiale). (b) Image déformée (actuelle).

I.3) Partie 3 : Aluminium et ses alliage

I.3.1) Introduction :

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

I.3.2) Principales caractéristiques de l'aluminium pur :

La popularité de l'aluminium ne cesse de s'accroître de plus en plus par les multiples propriétés et qualités de ses alliages,; à savoir : malléabilité, couleur argentée, résistance à l'oxydation, légèreté (densité de 2.7), bas point de fusion (658°C), une ductilité élevée (A% \approx 40%) et un module d'élasticité d'environ 70 GPa [38].

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

I.3.3) Les Nuances des alliages d'aluminium :

L'aluminium pur possède des propriétés mécaniques très médiocres qui imposent une contrainte importante pour son emploi dans certaines applications. Cette contrainte a conduit à la possibilité de l'augmentation de ses propriétés vu que l'aluminium est capable de se combiner avec un grand nombre d'autres éléments pour donner naissance à de multiples alliages ayant des propriétés très variées pour satisfaire un grand nombre d'applications [39].

a) Désignation numérique :

Conformément aux directives de l'aluminium, les alliages d'aluminium sont désignés à l'aide d'un système numérique de quatre chiffres. Ces chiffres identifiant la composition chimique de l'alliage, est parfois suivi d'une lettre indiquant une variante nationale. Il est à noter que la norme européenne EN 573-1 indique que cet ensemble de quatre chiffres doit être précédé pour les alliages destinés à être corroyés par le préfixe EN, les lettres «A» (aluminium), «w» (pour les produits corroyés) et un tiret «-». La notation complète est rarement utilisée. Par souci de simplification (Tableau 4).

b) Signification des désignations :

- Le premier chiffre indique l'élément d'alliage principal.
- Le deuxième chiffre indique une variante de l'alliage initial. Souvent il s'agit d'une

fourchette plus petite dans un ou plusieurs éléments de l'alliage. Décennies

- Les troisième et quatrième sont des numéros d'ordre et servent à identifier l'alliage. La seule exception est la série 1000 ces deux chiffres indiquant le pourcentage d'aluminium.

Tableau 3: Désignation des alliages d'aluminium [40]
[42]

Série	Désignation	Elément d'alliage principal	Phases
Série 1000	1xxx	99% d'aluminium au minimum	-
Série 2000	2xxx	Cuivre (Cu)	Al ₂ Cu - Al ₂ CuMg
Série 3000	3xxx	Manganèse (Mn)	Al ₆ Mn
Série 4000	4xxx	Silicium (Si)	-
Série 5000	5xxx	Magnésium (Mg)	Al ₃ Mg ₂
Série 6000	6xxx	Magnésium (Mg) et Silicium (Si)	Mg ₂ Si
Série 7000	7xxx	Zinc (Zn)	MgZn ₂
Série 8000	8xxx	8xxx Autres éléments	-

I.3.4) Alliages de la série 7XXX :

Les alliages de cette série comportent comme principaux éléments d'addition les éléments Zn, Mg et Cu, et sont avec les alliages de la série 2000 (Al-Cu) les alliages d'aluminium présentant les plus hautes caractéristiques mécaniques. Étant donnée leur faible densité, ces alliages sont naturellement destinés aux applications nécessitant des propriétés mécaniques élevées pour un moindre poids, et pour lesquelles le prix n'est pas le seul argument déterminant.

L'assemblage classique des tôles minces par rivetage induit une augmentation de masse et des concentrations de contrainte néfastes. C'est pourquoi le soudage a été élu comme une meilleure alternative pour résoudre ces problèmes, tandis que ces alliages sont difficiles voire impossibles à souder par les procédés de soudage par fusion, à cause des défauts de soudures, comme (les porosités, les fissurations, etc...) et la modification de l'état de précipitation dans ces alliages à durcissement structurale.

I.3.5) Alliage d'aluminium AA7075 :

La nuance générale 7075 présente des caractéristiques exceptionnelles et est utilisée comme matériau à haute résistance pour les pièces structurales très sollicitées et principalement dans la fabrication d'avions, automobile et autres applications aérospatiales.

a) Composition de l'alliage 7075T6 :

Avec le zinc comme élément d'alliage dominant, l'alliage d'aluminium 7075 a été le premier alliage de haute résistance composé par Al-Zn-Mg-Cu qui a été en mesure de combiner avec succès les avantages de l'inclusion de chrome pour développer une résistance élevée à la fissuration par corrosion sous contrainte dans les produits en feuilles. La composition de l'alliage d'aluminium AA 7075 se compose de 87,1 - 91,4% d'aluminium, tandis que le zinc est présent dans une concentration de 5 - 6%. Il contient également de 2,1 à 2,9 % de magnésium, de 1,2 à 2 % de cuivre et pas plus de 0,5 % de silicium, de titane, de chrome, de fer, de manganèse et d'autres métaux [41] comme indiqué dans le tableau 5 :

Tableau 4 : Composition de l'alliage 7075T6 [41]

Cu	Mg	Si	Fe	Mn	Zn	Ti	Cr	Autres Chaque	éléments Total
1.2 2.0	2.1 2.9	0.4	0.5	0.3	5.1 6.1	0.2	0.18 0.28	0.05	0.15

b) Quelques propriétés mécaniques et physiques :

Le tableau 6 ci-dessous donne plus de détails sur les caractéristiques physiques et mécaniques de l'alliage 7075 T6.

Tableau 5 : Caractéristiques physiques et mécaniques de l'alliage 7075 T6. [41]

Masse volumique	3000 (kg /m3)
Température de fusion	483 C°
Module D'Young	70 GPa
Coefficient de poisson	0.32
Allongement	11%
Dureté(HV)	160
Limité à la rupture Rm	560 MPa
Limité élastique Rp	480 Mpa

c) Le domaine d'application 7075 :

L'application croissante d'Al 7075 dans les industries automobile et aérospatiale contribue généralement à la réduction de la masse totale du véhicule. Dans l'industrie de l'aviation, l'Al

7075 est couramment utilisé pour produire des composants structuraux de la cellule, y compris le revêtement des ailes, l'empennage ou la queue, et le fuselage. La résistance élevée à la corrosion, la résistance élevée à l'impact et la durabilité de l'Al 7075 rendent le matériau souhaitable pour les applications de composants structurels [43] et aussi à l'industrie militaire, des véhicules blindés et de munitions.

d) Avantages et Inconvénients de AL 7075 T6 :

➤ **Avantage :**

- Haute résistance mécanique
- Résistance à la corrosion
- Faible densité
- Bonnes propriétés d'usinage

➤ **Inconvénients :**

- Coût élevé
- Difficile à souder en raison de sa haute résistance, ce qui peut limiter son utilisation dans certaines applications.
- Rigidité ce qui peut rendre difficile la fabrication de certaines formes ou la fabrication de pièces qui nécessitent une certaine flexibilité.

I.3.6) Soudabilité :

La soudabilité par fusion est un grand problème majeur qui s'impose pour cet alliage. En raison de la présence de cuivre, cet alliage est d'une extrême sensibilité à la fissuration de solidification des soudures ainsi qu'à la fissuration de la zone affectée thermiquement (ZAT). Parmi les moyens pour faire face à ce problème, l'utilisation d'un alliage d'aluminium d'apport approprié non traitable à la chaleur (par exemple, Al-Mg ou Al-Si), permet de surmonter le problème de la fissuration de solidification des soudures ; les efficacités de joint qui en résultent sont intolérables (très faibles).

I.3.7) Soudage FSSW des alliages d'aluminium :

La méthode de soudage par points par friction malaxage (FSSW) est utilisée comme choix pour le soudage des alliages d'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 réalisé 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 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 peuvent être soudés de manière satisfaisante par des technologies de soudage par friction. 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 sont extrêmement variés, allant de la forme cylindrique, triangulaire, 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 a été possible en intégrant des vibrations ultrasonores dans le FSSW, par ailleurs 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 émergents dans chacune des variétés innovantes de FSSW. [44]

I.3.8) Conclusion

Le soudage par point par friction malaxage est un procédé de soudage innovant et efficace pour les alliages d'aluminium tel que la nuance AA7075. Les avantages de ce procédé sont que des assemblages de très haute qualité peuvent être réalisés, que ce procédé est beaucoup plus rapide que les procédés traditionnels, sans mentionner la facilité de mise en œuvre. De plus, ce procédé présente d'importants avantages environnementaux tels que l'absence d'émission de fumées, rayonnements électromagnétiques et la possibilité de soudage sans aucun métal d'apport ou gaz de protection.

***II) Chapitre 2 : TECHNIQUES ET
PROCEDURES EXPERIMENTALE***

II.1) Étude expérimentale

Le soudage par friction-malaxage avec outil non tournant (FSSW, de l'anglais "Friction Stir Spot Welding") est une méthode de soudage innovante largement utilisée dans diverses industries, notamment l'aérospatiale, l'automobile et la construction navale. Cette technique offre plusieurs avantages par rapport aux méthodes conventionnelles de soudage, tels que l'absence de fusion, une faible déformation thermique et une excellente qualité de joint. L'objectif de la partie expérimentale de cette étude est d'évaluer les performances du FSSW dans des conditions spécifiques, en examinant les paramètres de soudage et en analysant les propriétés mécaniques des soudures obtenues. Cette analyse expérimentale vise à fournir des informations précieuses sur la qualité et la fiabilité des joints réalisés par FSSW Matériaux utilisés

Sur des plaques en alliage d'aluminium 7075-T6 de dimension 300X200X2 mm on a découpé des tôles rectangulaires de dimension 100X30X2 mm au sein de l'atelier de mécaniques de CRTI (Figure 23).



Figure 23 : Tôle en alliage d'aluminium 7075-T6.

II.1.1) Outil de soudage :

Notre outil de soudage est réalisé par l'acier H11 réputé par sa grande résistance de travail à chaud. La géométrie de l'outil est composée d'un pion cylindrique ($D=6$ mm) et de longueur 2 mm avec un épaulement plat de diamètre 20 mm (Figure 24).

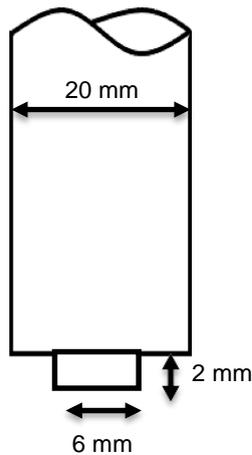


Figure 24 : L'outil FSSW.

II.1.2) Machine de soudage :

L'opération du soudage par friction par point malaxage (FSSW) a été réalisée au niveau de l'atelier de département de fabrication mécanique à l'Université SAAD DAHLEB de Blida.

Le principe de base du procédé FSSW est effectué sur une fraiseuse Universelle semi-automatique trois axes (figure 25). Cette machine est largement utilisée pour les opérations d'usinage dans l'industrie. L'outil FSSW en rotation placé dans la fraiseuse reste fixe par rapport à la surface des pièces tout au long du soudage. C'est la table de la machine qui se déplace vers l'outil en rotation.



Figure 25 : machine de soudage (Fraiseuse vertical FU 250*1000/2)

Caractéristique de la fraiseuse :*Tableau 6: Paramètre de la machine de fraisage.*

Puissance	6.5 KW
Puissance de table	4 KW
La gamme de vitesse de rotation	450 à 2800 tr/min
La gamme de vitesse d'avance	56 à 355 tr/min
Masse total	2 tonne
Fréquence	50 HZ
Fabrication-N°	3123/89

Réalisation des soudures :

Pour réaliser un point soudure il faut suivre les étapes suivantes :

- Superposées les tôles (voir figure 26)
- Positionnées les tôles sur un plateau fixé où ce dernier est posé sur le bâti de la machine.
- Vérifier l'alignement des tôles.
- Eliminer tous degré de liberté des tôles à souder en insérant des cales tous autour.
- Centrée l'outil sur les tôles.

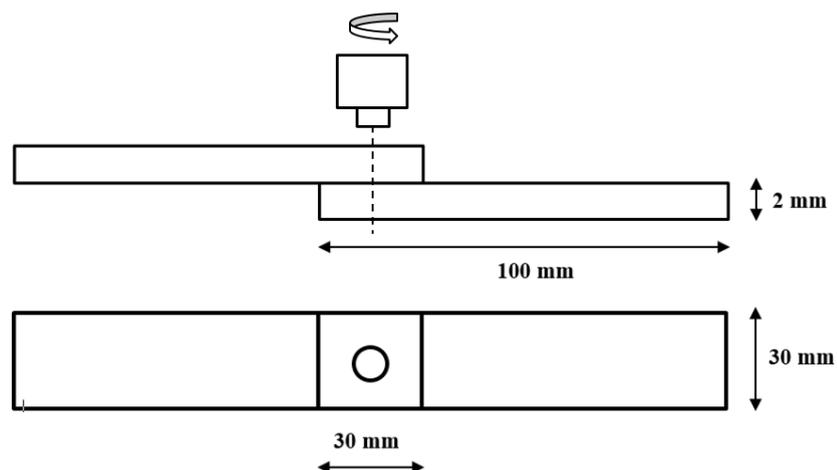


Figure 26 : Représentation schématique des tôles superposées l'une sur l'autre de dimension 100X30X2 mm



Figure 27 : système de bridage

Système de bridage :

Le bridage est essentiel dans le FSSW car il permet d'assurer que les pièces à souder restent bien en place et en contact étroit pendant le processus de soudage. Cela garantit une soudure uniforme et de haute qualité.

Le mauvais bridage lors du processus de soudage FSSW peut entraîner une diminution de la qualité de la soudure et de la force de liaison. Le mauvais bridage favorise les débordements de matières sur les côtés qui est causé par plusieurs facteurs tel que : la vitesse de rotation de l'outil, la pression d'appui, la température de soudage (figure 28).

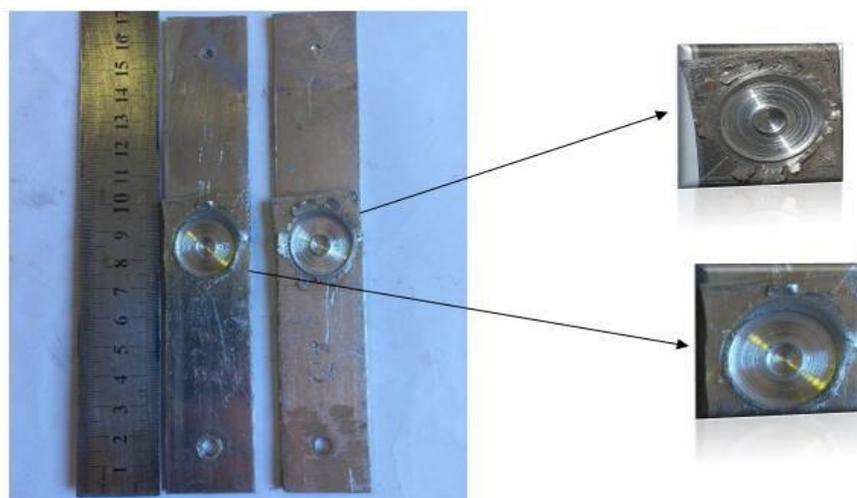


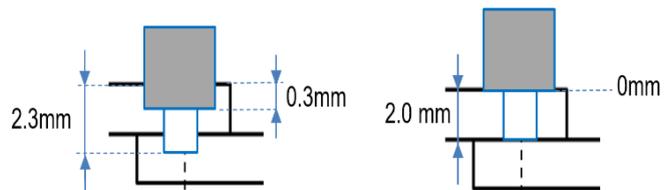
Figure 28 Tôles soudées avec un mauvais bridage

II.1.3) Les paramètres de soudage

Les paramètres utilisés sont la vitesse de rotation (w), le temps de maintien et la distance de pénétration (D_p) (Tableau 8). Sachant que la longueur du pion est de 2mm fixe, nous avons fait varier la profondeur de pénétration de l'outil dans la matière à souder de 2.1 à 2.4 mm. Etant donné que la longueur du pion est fixée à 2mm, c'est la pénétration de l'épaulement dans la matière qui change de 0.1 à 0.4mm. La vitesse de rotation de l'outil fixé à 1400 tr/min (cette vitesse est choisie sur la base des résultats des étudiants de l'année dernière, considérée comme la vitesse idéale) et le temps de maintien est fixé à 10s.

Tableau 7: Les paramètres utilisés pendant le soudage par FSSW pour 1 point.

Vitesse de rotation (tr/min)	Profondeur de pénétration (mm)
1400	2.1
1400	2.2
1400	2.3
1400	2.4



II.1.4) Les différentes configurations assemblées :

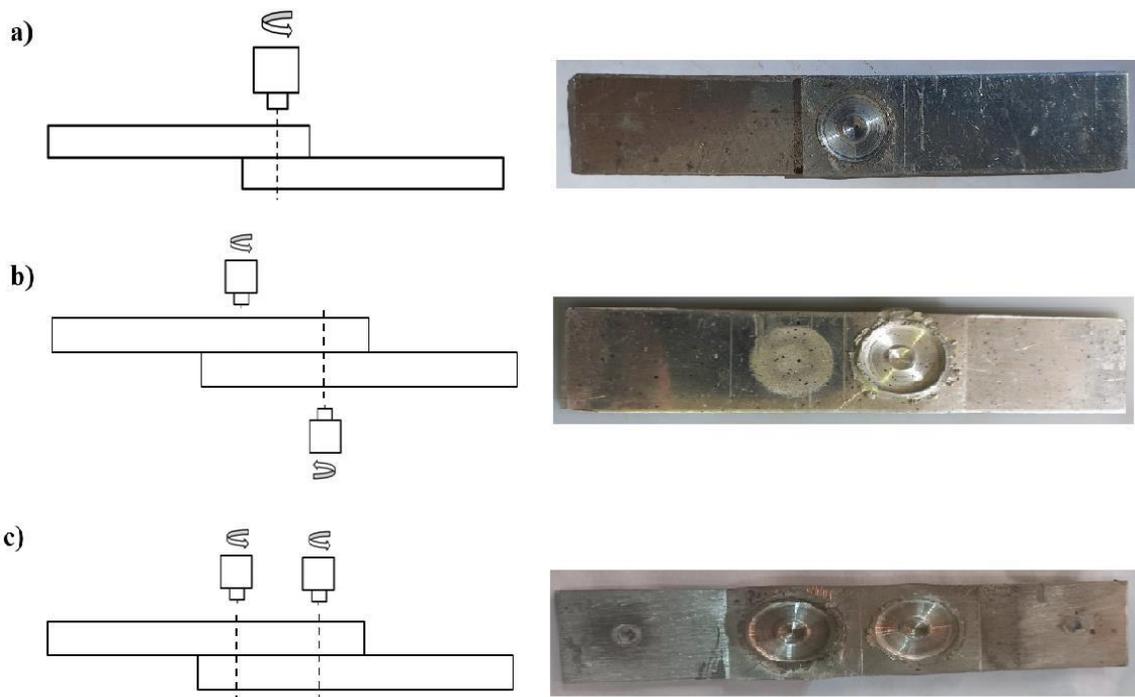


Figure 29 : Les différentes configurations assemblées : a) un point, b) deux points sur face opposé, c) deux points sur la même face

II.1.5) Caractérisation des soudeurs

a) Comportement mécanique :

Dans notre étude nous avons étudié le comportement mécanique global des joints soudés en utilisant l'essai de traction cisaillement, ainsi que le comportement mécanique local via des essais de micro-dureté et de corrélation d'image numérique. Le protocole expérimental de chaque essai est présenté ci-dessus.

a.1) Comportement mécanique global :

Les essais de traction cisaillement ont été réalisés sur la machine de traction MTS CriterionTM Model 45 – 100KN (Figure 30) au niveau du laboratoire mécanique du CRTI. Les mesures sont effectuées suivant la norme iso-6892-1. La vitesse de déformation de la traverse est fixée à 0.05 mm/min.

Les éprouvettes utilisées ont été préparées suivant les indications de la figure 30. Des petites plaques de soutien sont exigées pour les éprouvettes afin d'éviter la force asymétrique de cisaillement de la zone de soudure pendant l'essai de traction.

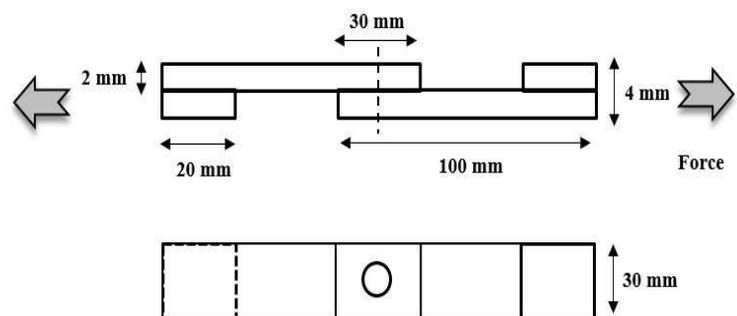


Figure 30 : a) Machine de traction (MTS CriterionTM Model 45) b) Eprouvettes préparées pour l'essai de traction.

a.2) Les essais de traction cisaillement local : Technique de corrélation d'images digitales (CID)

Au cours des essais sous chargement traction cisaillement, la méthode de corrélation d'images numériques est le principal outil utilisé pour capter les champs de déformations locales à travers tous nos joints soudés par FSSW. La technique consiste à réaliser sur la zone observée un motif aléatoire appelé mouchetis (Figure 32). Ce mouchetis est effectué à l'aide de peinture (Figure 33). Au cours de la déformation de l'échantillon, une série d'images est enregistrée à l'aide de deux caméras face est arrière de 48Mpixel (eledyne DALSA) afin que le logiciel puisse, en post-traitement, comparer ces images numériques et calculer les champs de déplacement et de déformation en comparant l'image de référence à l'image déformée (Figure 31). Dans le cadre de cette étude, le logiciel Ncorr est utilisé (voir annexe).

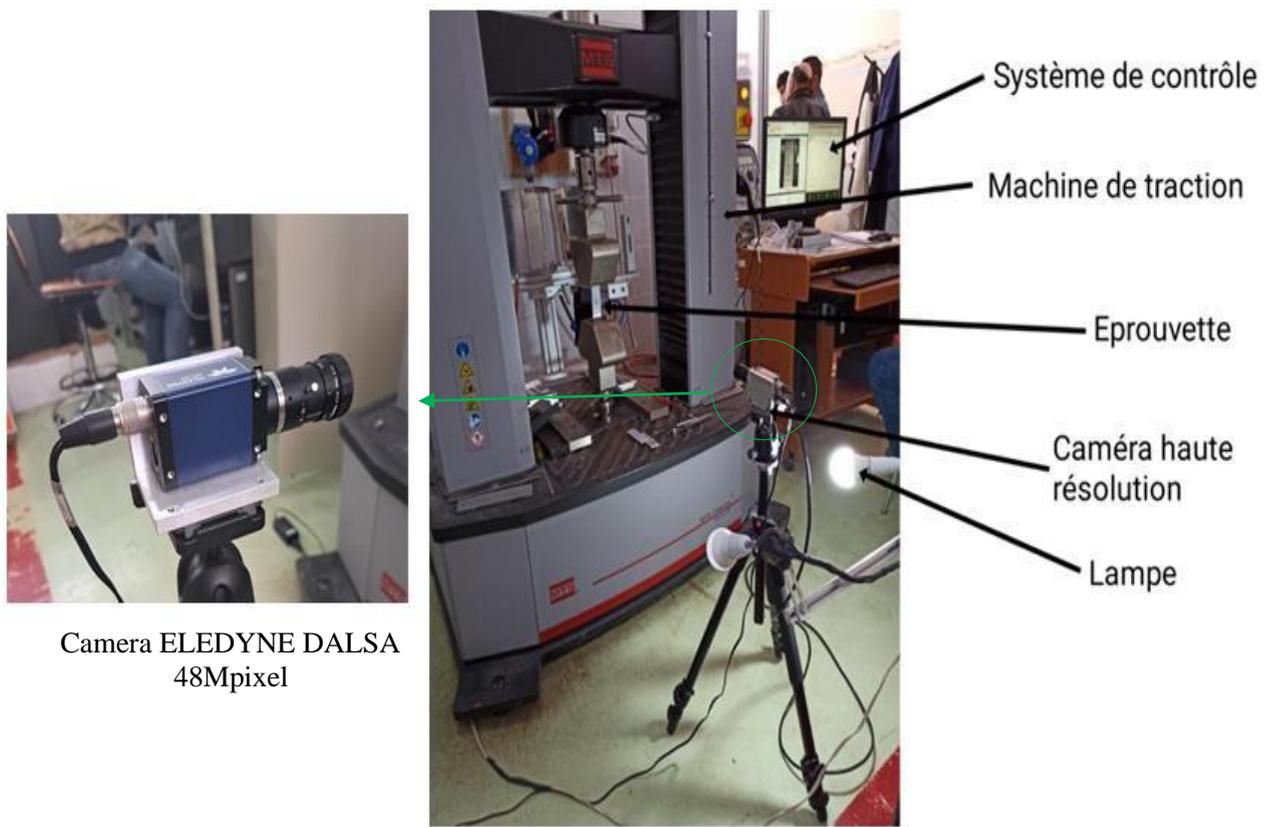


Figure 31: Matériel utilisé pour la corrélation d'image digitale.

Le mouchetis est l'ensemble de petites tâches en noirs et blancs d'un diamètre moyen de 30 μm disposées de façon aléatoire sur la surface à étudier.

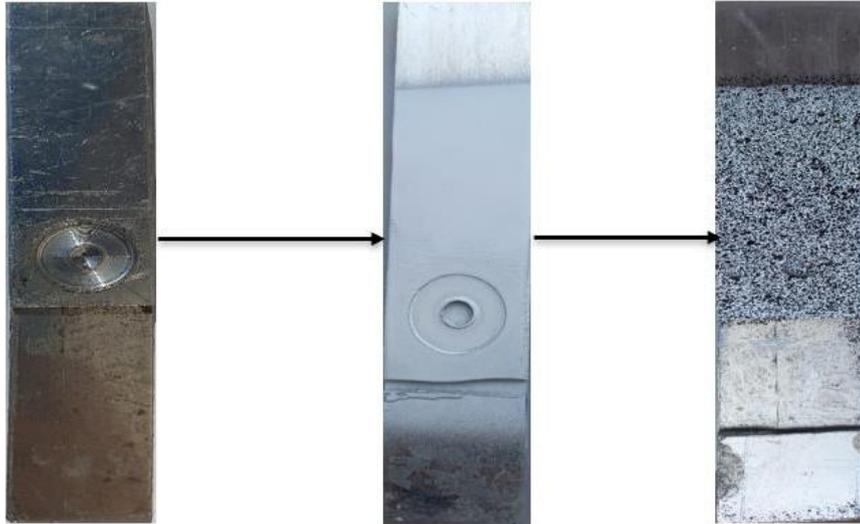


Figure 32: Etapes de préparation des mouchetis sur les éprouvettes

Pour préparer un mouchetis on utilise :

- Une peinture noire
- Une peinture blanche
- Un décapant : Un décapant est un produit chimique utilisé pour éliminer des couches minces de peintures.



Figure 33: les peintures noires et blanches

b) Caractérisation microstructurale

Après les opérations de soudage des plaques d'aluminium, on prélève des échantillons pour l'étude microstructurale en utilisant le microscope optique et le macro. Les échantillons à étudier vont être préparés de la manière suivante :

- Enrobage
- Un Polissage mécanique
- Une Attaque chimique

b.1) Pré-polissage et polissage de finition

L'examen microscopique est effectué sur une coupe transversale sur quatre joints soudés par FSSW (figure 34).

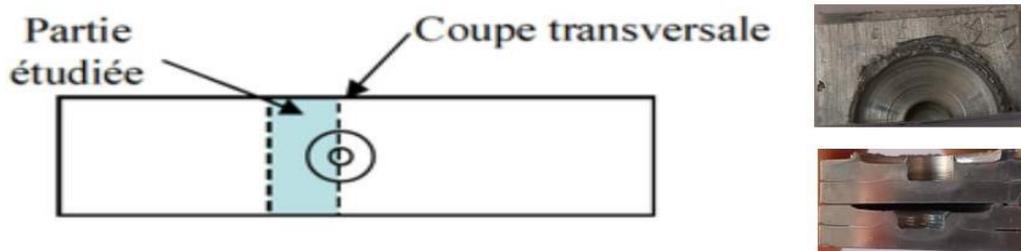


Figure 34: Méthode de découpage des échantillons

Cette opération a été réalisée sur une polisseuse à disque abrasif. C'est une opération mécanique qui permet d'avoir un état de surface semblable à celui d'un miroir. Ce polissage a été effectué en plusieurs étapes avec des disques en papier abrasif en carbure de silicium (de plus gros au plus fin, 800, 1000, 1200, 2400 et 4000) qui tourne avec une vitesse de 150 à 300 tr/min, cette opération a été faite sous aspersion d'eau pour éviter l'échauffement de l'échantillon. La figure 39 montre la polisseuse utilisée au niveau de du centre de recherche CRTI.

Le polissage de finition a été réalisé avec la pâte diamanté sur un papier feutre afin d'avoir une surface à l'état miroir.



Figure 35 : MECATECH 264 (Polissage automatique)

b.2) L'attaque chimique

Le réactif chimique utilisé pour notre aluminium ces échantillons seront attaqués chimiquement par un réactif Keller. Les échantillons furent immergés durant 30 à 40 secondes, lavés à l'eau et séchés à l'aide d'un sèche-cheveux ordinaire.

b.3) Enrobage

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

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

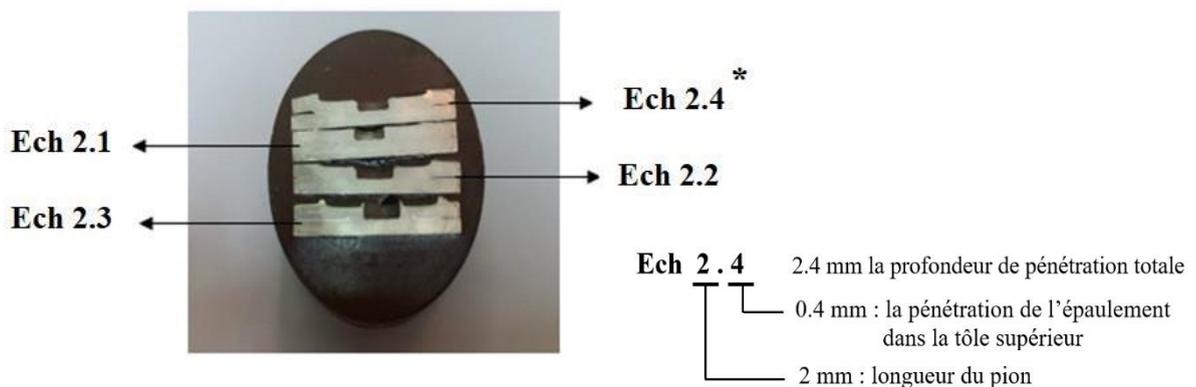


Figure 36 : échantillons (2.1/2.2/2.3/2.4)

b.4) Microscopie et le macroscopie optique :

Nous avons utilisé un microscope et un macroscopie optique de type Carl Zeiss doté d'une caméra numérique avec des objectifs d'agrandissement de X5 à X100 pour le micro et X0.625 à X3 pour la macro. Le microscope nous a permis de capturer l'hétérogénéité de la microstructure dans le métal de base, la ZAT, ZATM et le noyau (Figure 37).

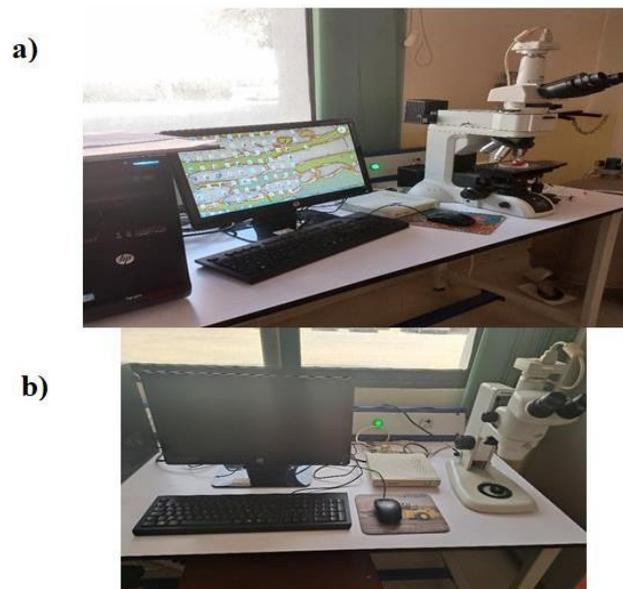


Figure 37 : a) microscope optique b) macroscopie optique

b.5) 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 figure 38. 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

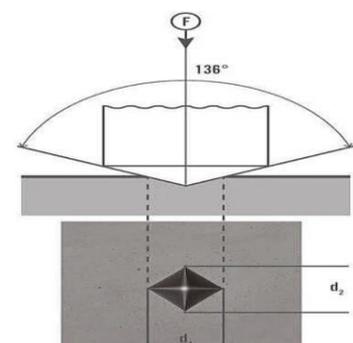
HV = Dureté Vickers.

F = Force appliquée [N]

d = Moyenne des diagonales de l'empreinte [mm]

$$HV = \text{constant} \times \frac{\text{test force } F}{\text{surface of the indentation}} = 0,102 \times \frac{2F \sin \frac{136^\circ}{2}}{d^2} = 0,1891 \times \frac{F}{d^2}$$

$$d = \frac{d_1 + d_2}{2} \text{ (average diagonal length)}$$



Le degré de dureté, noté HV, est ensuite lu sur un abaque (Une table) ; il y a un abaque par force d'appui.

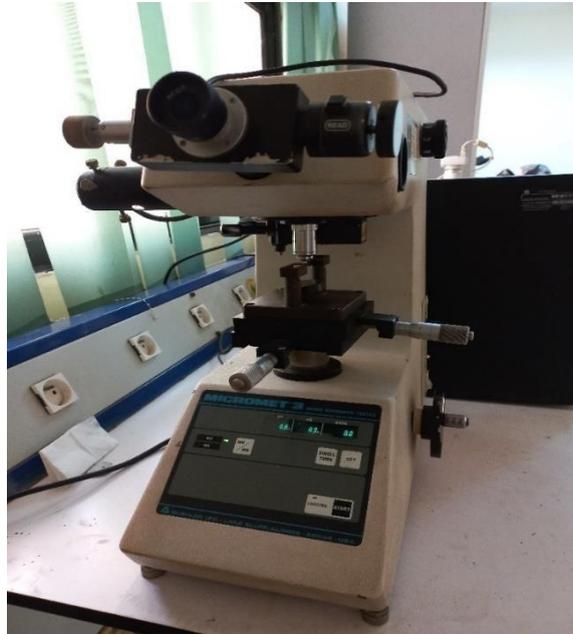


Figure 38 : Micro d'uromètre Utilisée (BUELER 1600/4300).

Les empreintes de micro-dureté prise avec une charge de 300g sur nos échantillons A et B, C et D sont représentées dans la figure 39. Les empreintes de la ligne 1 et 2 sont prises avec un pas de 1 mm suivant X et les empreintes de la ligne 3 sont prises avec un pas de 0.2mm à cause de sa courte distance. Il s'agit de balayer tout le long de nos éprouvettes assemblées par FSSW.

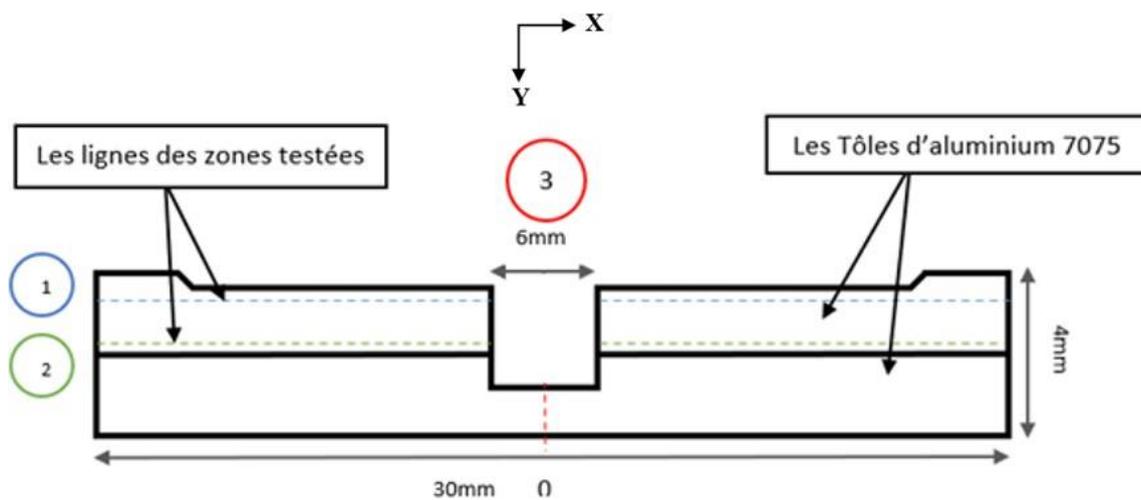


Figure 39 : Représentation schématique des zones testées pendant l'essai de micro dureté

III)

**Chapitre 3 : RESULTATS ET
DISCUSSION**

III.1) Introduction :

Ce chapitre présente l'impact du procédé de soudage FSSW et ses paramètres sur les caractéristiques mécaniques et métallurgiques du joint soudé. Dans notre étude, on s'est focalisé sur la variation de la profondeur de pénétration de l'outil, et son impact sur les caractéristiques microstructurales, le comportement mécanique global caractérisé par des essais de traction-cisaillement. Le comportement mécanique local caractérisé par des essais de microdureté et de corrélation d'image numérique.

III.2) Analyses microstructurales

III.2.1) Macrographie du Joint soudé

La Figure 40 présente une macrographie caractéristique du joint soudé par FSSW à différentes profondeurs de plongée de l'outil (2.1, 2.2, 2.3 et 2.4 mm).

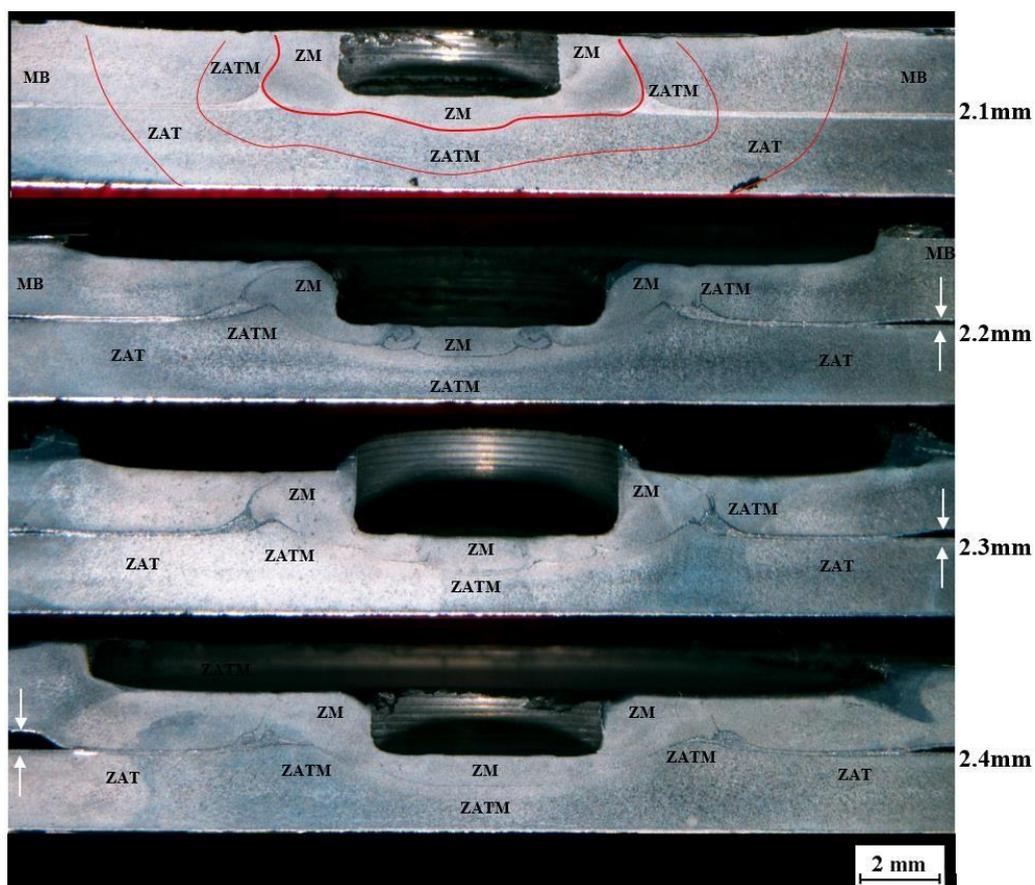


Figure 40: Observation macroscopique des différentes zones des échantillons 2.1, 2.2, 2.3 et 2.4mm

En examinant la section transversale de la soudure, on distingue les cinq zones typiques du procédé FSSW, à savoir le métal de base (MB), la zone affectée par la chaleur (ZAT), la zone

affectée thermo mécaniquement (ZATM), la zone malaxer (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. En fonction de la profondeur de plongée, on peut observer des variations dans la forme et la taille des différentes zones des joints soudés. On constate que plus la pénétration de l'épaulement augmente, plus la zone soudée augmente. Plus encore, l'éclatement de l'interface du joint à la périphérie de l'épaulement augmente à force que la pénétration augmente.

III.2.2) L'évolution de la microstructure :

La figure 41 montre la microstructure du joint 2.1. On a constaté que la taille des grains diminue en allant du MB vers le centre de la soudure (ZM). Cet affinement du grain est dû à la déformation plastique sévère qui est provoqué par l'outil de soudage. Dans la ZATM et la ZAT les grains présente un caractère moins équiaxes avec une taille supérieure à celle du la ZM. Il faut noter que dans la ZATM les grains sont sévèrement déformés.

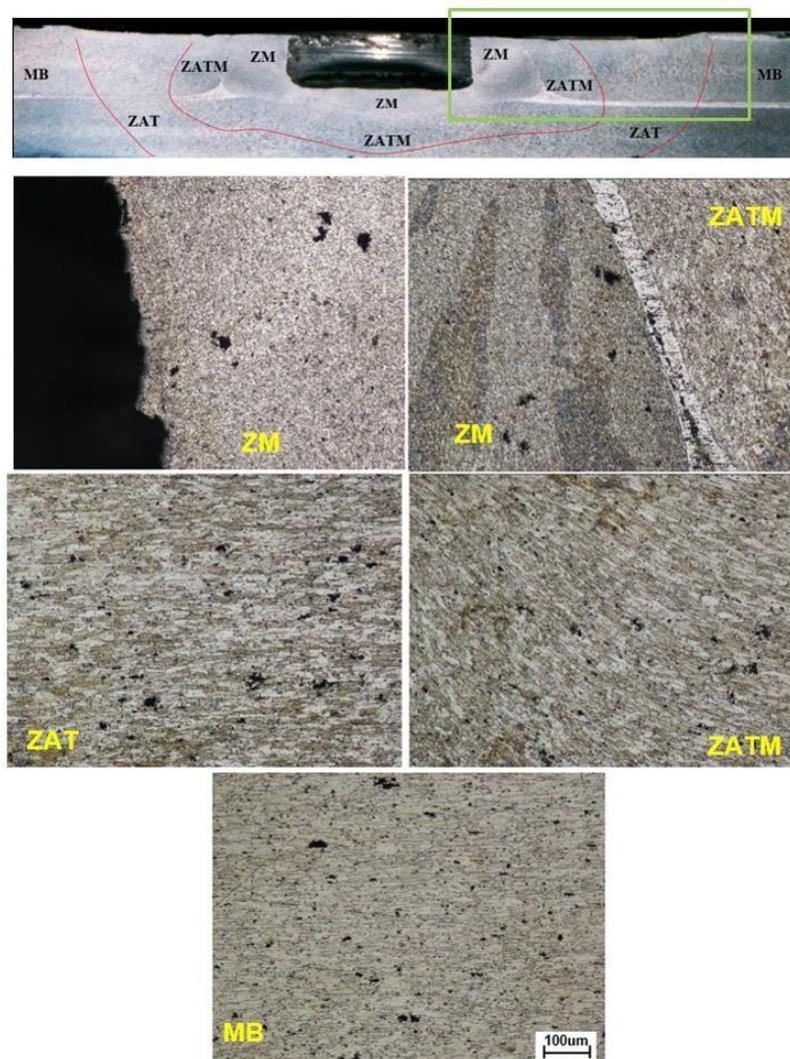
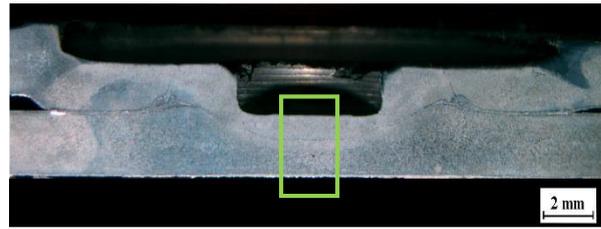
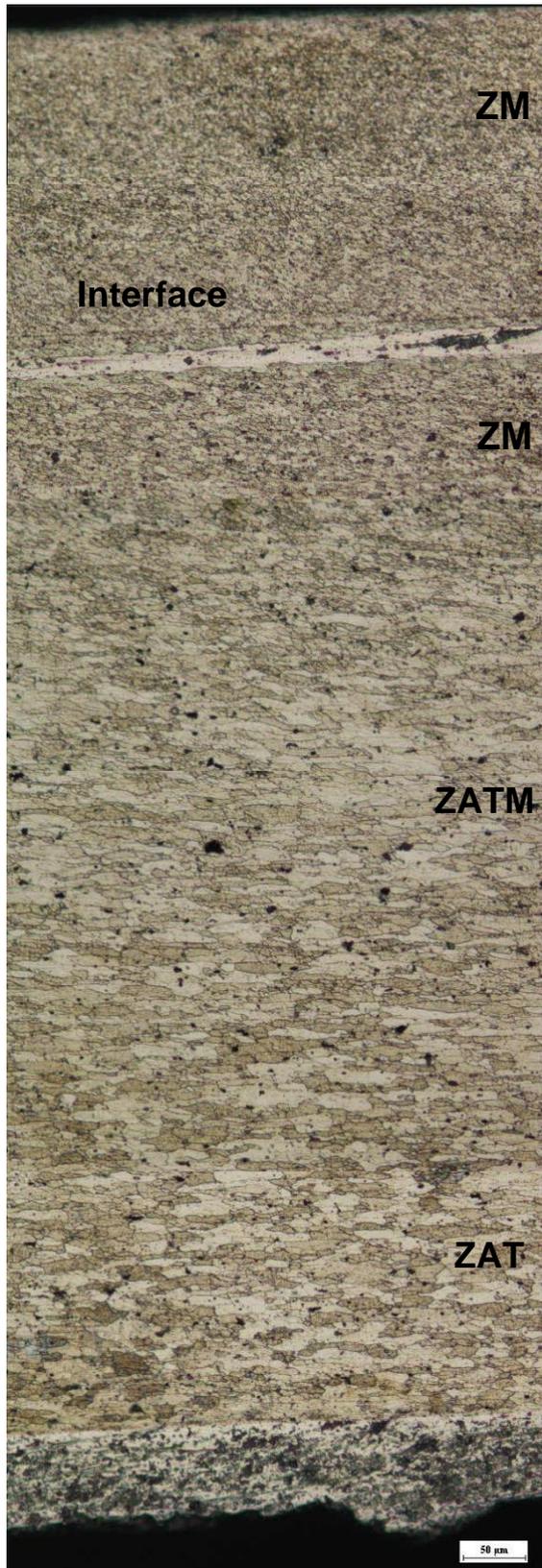


Figure 41 : microstructure de la ZMB, ZAT et la ZATM dans l'échantillon B



La figure 42 montre l'évolution de la microstructure le long de l'épaisseur du fond de l'empreinte jusqu'à la face inférieure du joint. On remarque que l'étendu de la ZM dépasse l'interface entre les deux plaques. Une ZATM beaucoup plus large que la ZAT en longueur du joint. Cela est dû à la température très élevée au centre du pion. On remarque aussi la disparition de la zone MB dû au gradient de température élevé jusqu'à la face inférieure.

Figure 42: montre l'évolution de la microstructure Ech 2.4

III.3) Comportement mécanique global :

III.3.1) Essai de traction-cisaillement du joint avec un point :

La figure 43 présente la relation charge-déplacement pour la différente distance de pénétration (D_p) lors du soudage à une vitesse de 1400 tr/min. Il est évident que les meilleurs résultats en termes de résistance à la traction-cisaillement sont obtenus avec les paramètres $\omega = 1400$ tr/mn et $D_p = 2.3$ mm, tandis que la résistance la plus faible est observée pour $D_p = 2.1$ mm. Le point de soudure réalisé avec une distance de pénétration $D_p=2,4$ mm, représenté par la courbe en bleu, montre une résistance à la traction-cisaillement inférieur à $D_p=2.3$ malgré une profondeur de pénétration supérieur.

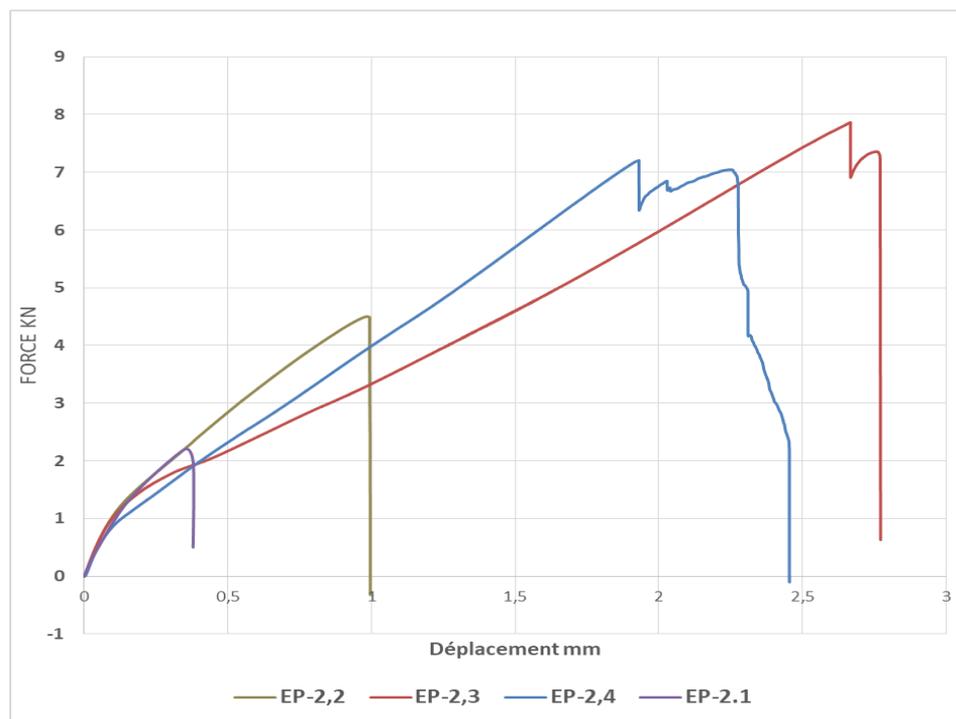


Figure 43 : courbe typique charge - déplacement (assemblage avec 1 point) Soudée avec une vitesse de rotation 1400 tr/min avec différents distance de pénétration

La figure 44 (a et b) montre que pour une pénétration de l'épaulement de 0.3mm soit l'équivalent de 15% de l'épaisseur de la tôle, les propriétés mécanique résultantes sont les meilleurs. Pour une pénétration de l'épaulement de 20% (0.4mm), on aura une légère diminution de la charge maximale à la rupture de l'ordre de 8% par rapport à la meilleure soudure. Cependant, une pénétration inférieure à 0.3mm, les charges à la rupture ainsi que le déplacement auront une fortement tendance à la baisse de l'ordre de 42% pour 0.2mm et 71% pour 0.1mm de pénétration.

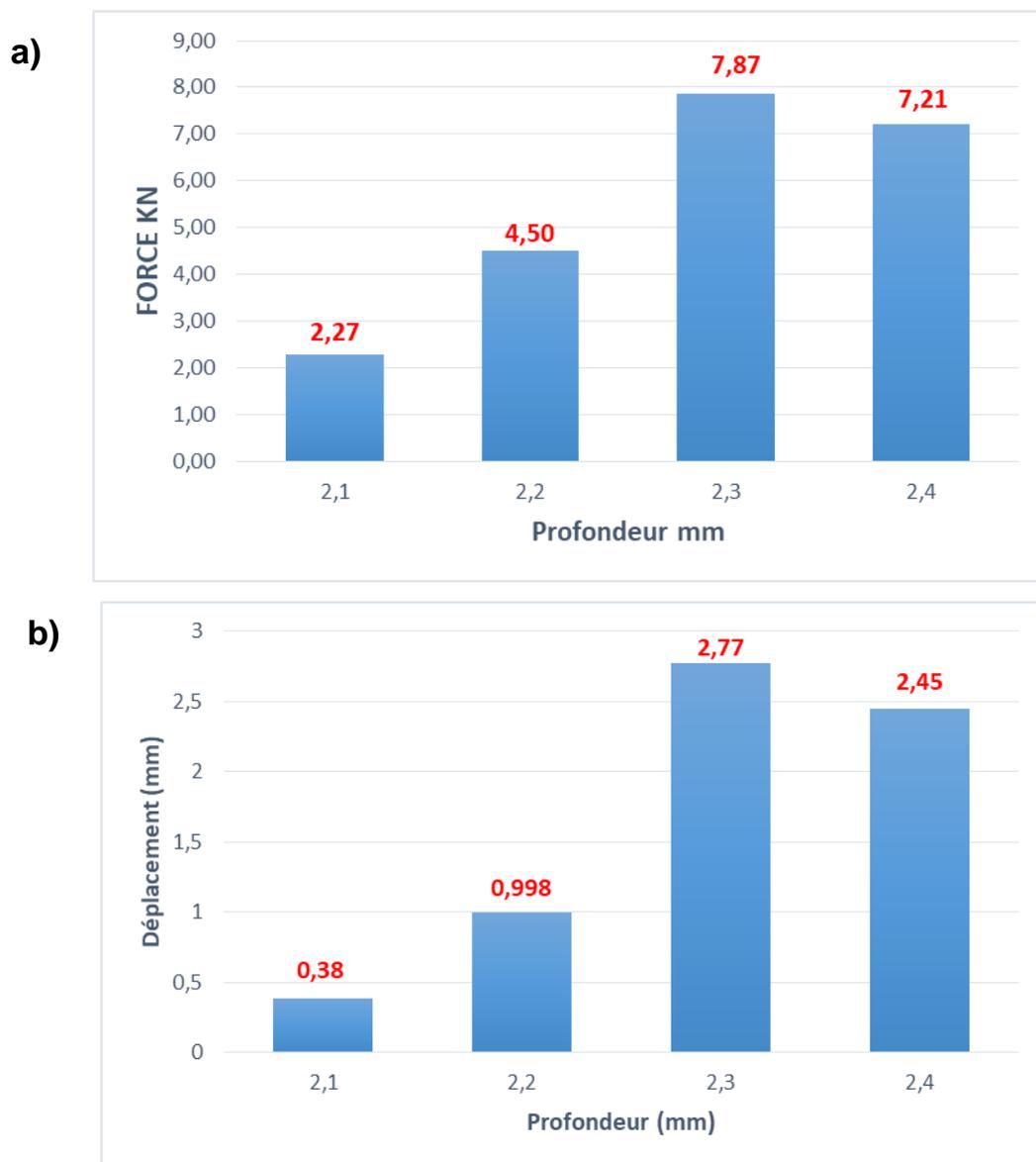


Figure 44: Effets des différentes profondeurs de pénétration sur : a) la résistance maximale à la traction b) le déplacement

III.3.2) Essai de traction-cisaillement du joint avec 2 points de soudures :

Les courbes de traction présentées dans la figure 45 démontrent que lorsqu'une charge significative est appliquée sur l'éprouvette assemblée par deux points sur face opposées, cela offre une résistance à la rupture supérieure au point de soudure par rapport à l'éprouvette assemblée par deux même faces. Par contre, pour ce qui est du déplacement on retrouve l'inverse. D'après la figure 46, on utilisant la profondeur de pénétration optimale 2.3mm pour réaliser les soudures à deux points, on a constaté qu'elles représentent presque le double en termes de charge à la rupture d'une soudure a un point.

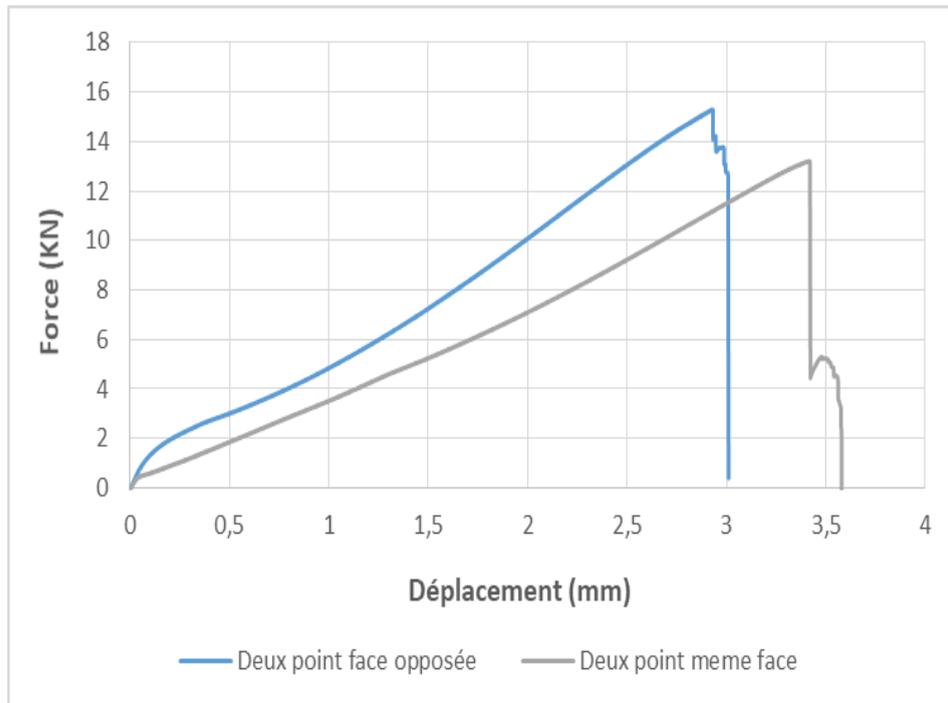


Figure 45: courbe typique charge - déplacement (assemblage avec 2 point)

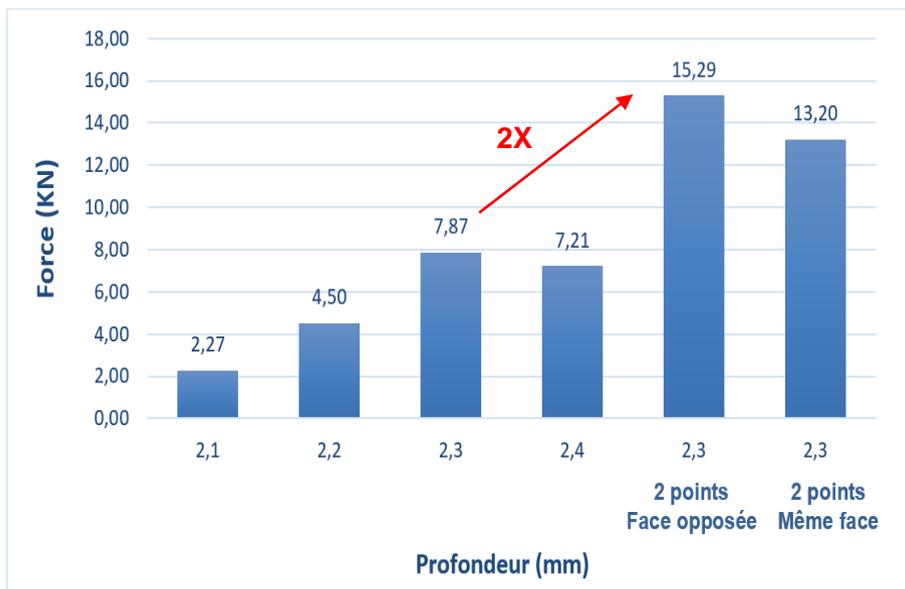


Figure 46 : Histogramme Force-Profondeur entre assemblage avec 1 point et 2points de soudure

III.3.3) L’effet de la profondeur de pénétration sur le mode de rupture

Le mode de rupture observé dans notre étude est le Mode 1 « arrachement total du noyau » un mode similaires aux les travaux précédents. Dans ce mode la fissure de rupture

commence par la destruction de la zone collée puis se propage au noyau qui s'arrache totalement de son logement pour détruire le joint soudé (Figure 47).

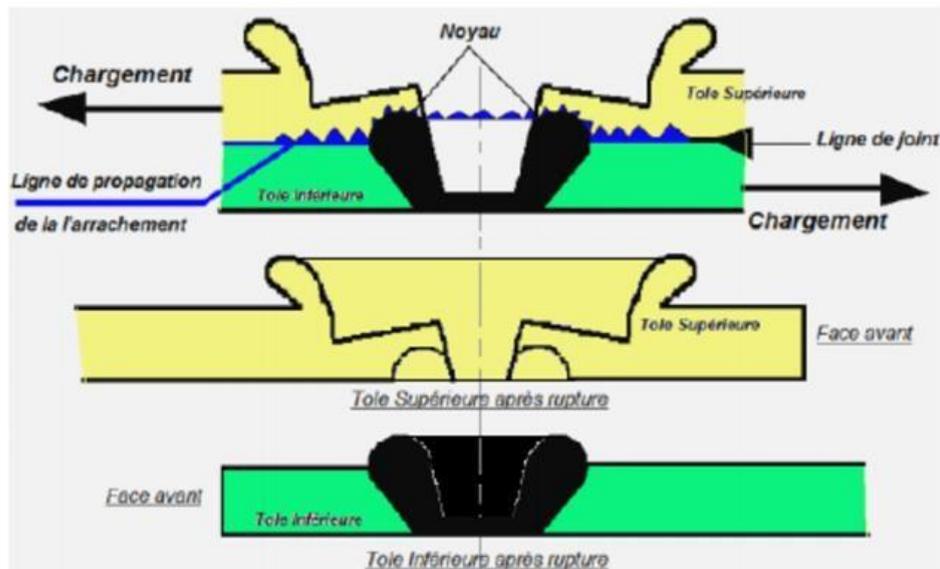


Figure 47 Illustration du mode de rupture par arrachement total

La figures 48 montre la plaque supérieure est complètement séparée de la plaque inférieure. Lors de l'essai de traction, on observe un mode de défaillance présumé sous la forme d'un arrachement de matériau au niveau de la plaque supérieure causé par une bonne pénétration de l'outil de soudage. La zone de cisaillement est clairement visible, indiquant une déchirure de la tôle supérieure en périphérie de la zone soudée.

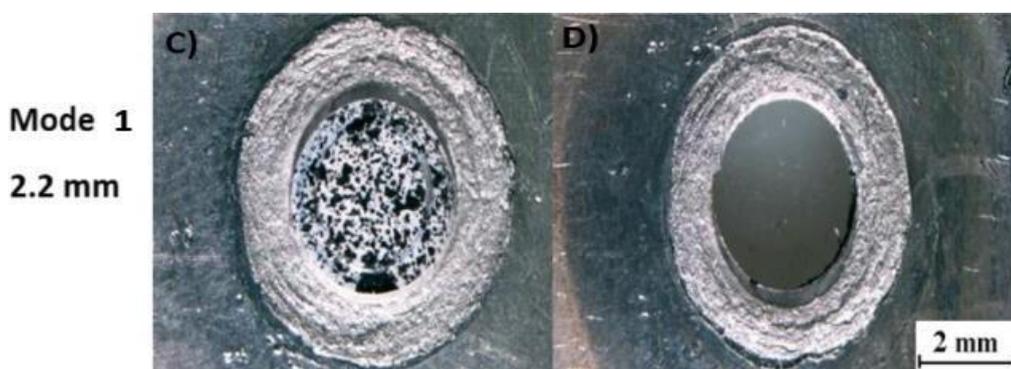


Figure 48 Mode de rupture observé aux conditions de soudage par FSSW

a) Analyse des zones de rupture :

La relation directe entre l'augmentation de la profondeur de pénétration et les dimensions de l'empreinte du pion est clairement illustrée dans la figure 49. L'analyse des zones de rupture

confirme les résultats macroscopiques, montrant que la longueur de la zone soudée augmente avec une plus grande profondeur de pénétration. De plus, la force centrifuge provoque une augmentation du diamètre de l'empreinte, comme le montrent les figures 49 et 50.

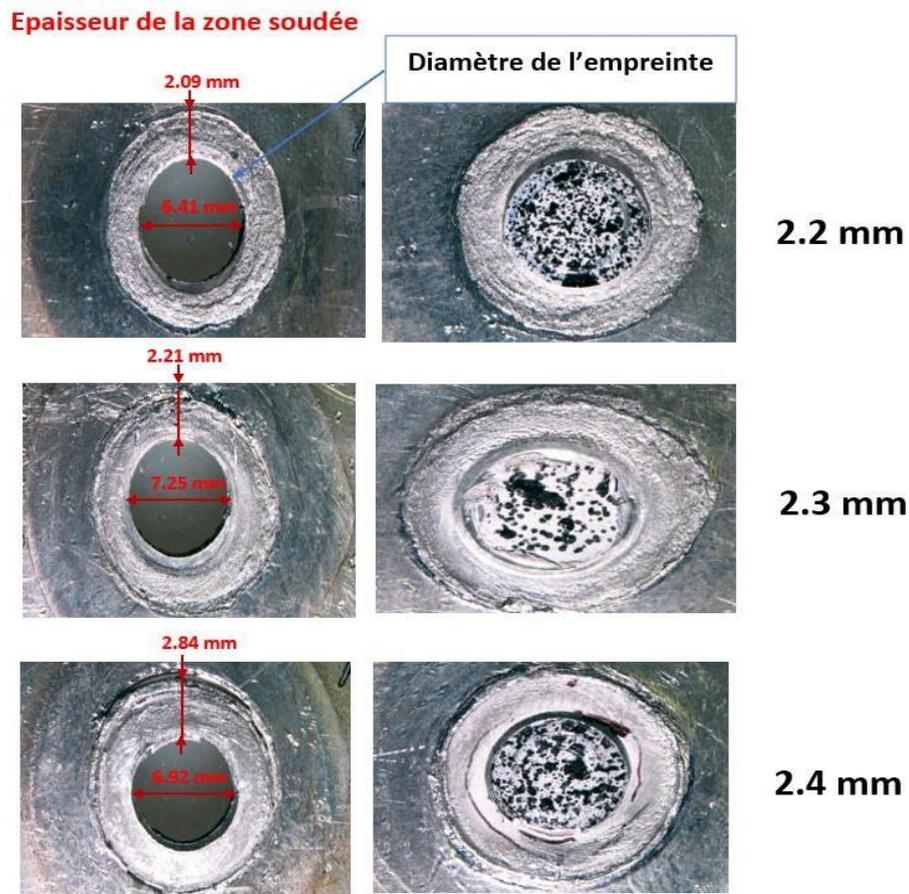


Figure 49 : photographies illustrent l'effet la profondeur de pénétration sur la zone malaxée

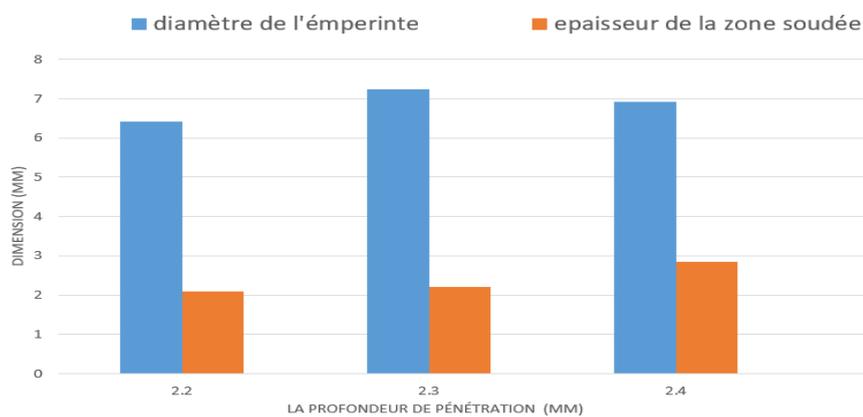
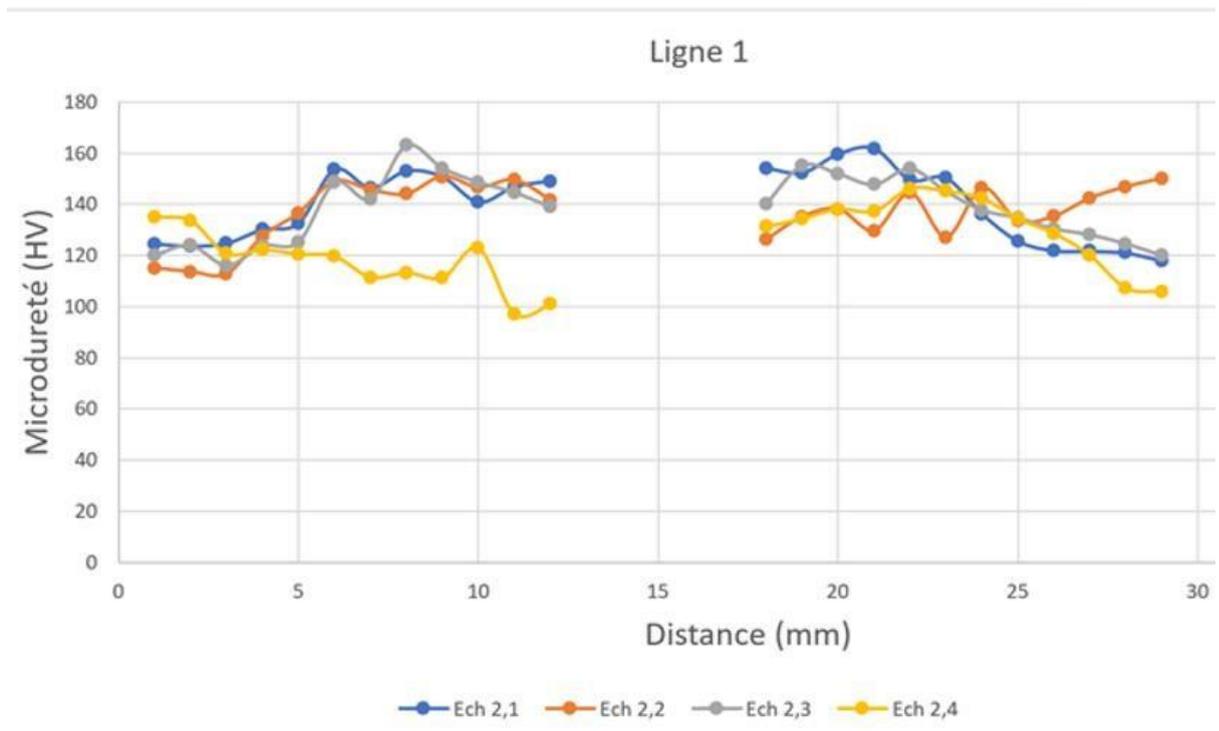
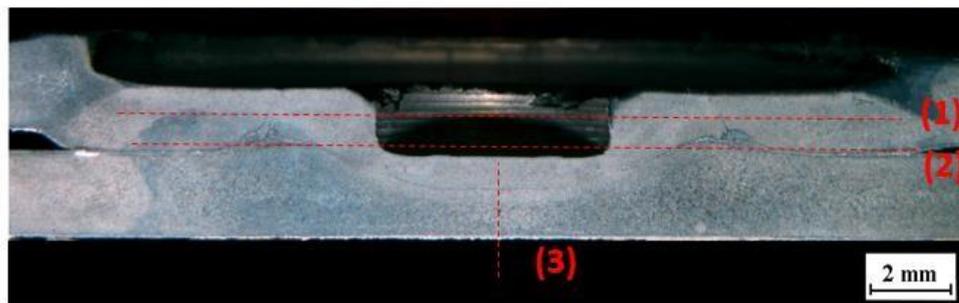


Figure 50 : Diagramme montrant la relation la profondeur de pénétration et le diamètre et l'épaisseur de l'empreinte du pion de l'outil.

III.4) Comportement mécanique local

III.4.1) Microdureté

La figure 51 montre la variation de la micro-dureté le long des 3 lignes cité précédemment. Pour ce qui est de la ligne 1, la variation de profondeur a un faible effet sur les valeurs de microdureté puisqu'elles sont similaires dans la même zone pour chaque joint sauf le joint 2.4. Cela est dû au soulèvement vers le haut de l'interface du joint provoqué par la pénétration excessive de l'épaulement. Des valeurs minimales de micro dureté de l'ordre de 95HV à 120 HV ont été mesuré aux régions ZAT / ZATM ce qui est en concordance avec le grossissement de grains au niveau de ses zones comparé au MB. Des valeurs maximales de l'ordre de 150HV à 165 HV sont mesurées dans la ZM.



Par ailleurs, il est notable qu'il y a une baisse substantielle de la dureté au niveau de la jonction des plaques d'aluminium allant 26HV 1.

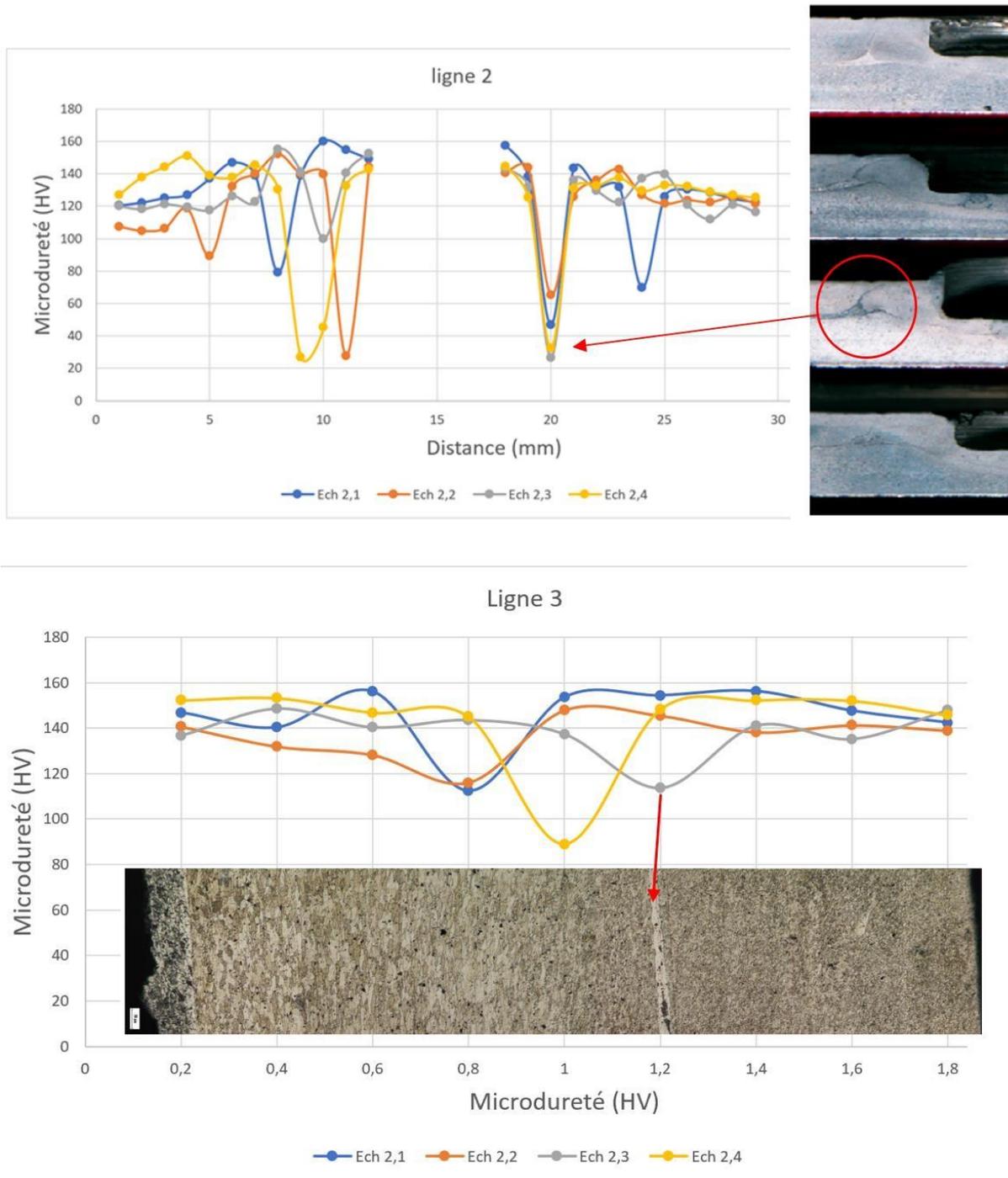


Figure 51 : représentation graphique des résultats de dureté sur les échantillons A, B, C et D

III.4.2) Corrélation d'images numérique :

Cette partie, nous abordons les résultats expérimentaux de l'éprouvette en utilisant le logiciel libre de corrélation d'images digitales Ncorr qui a été développé en utilisant Matlab.

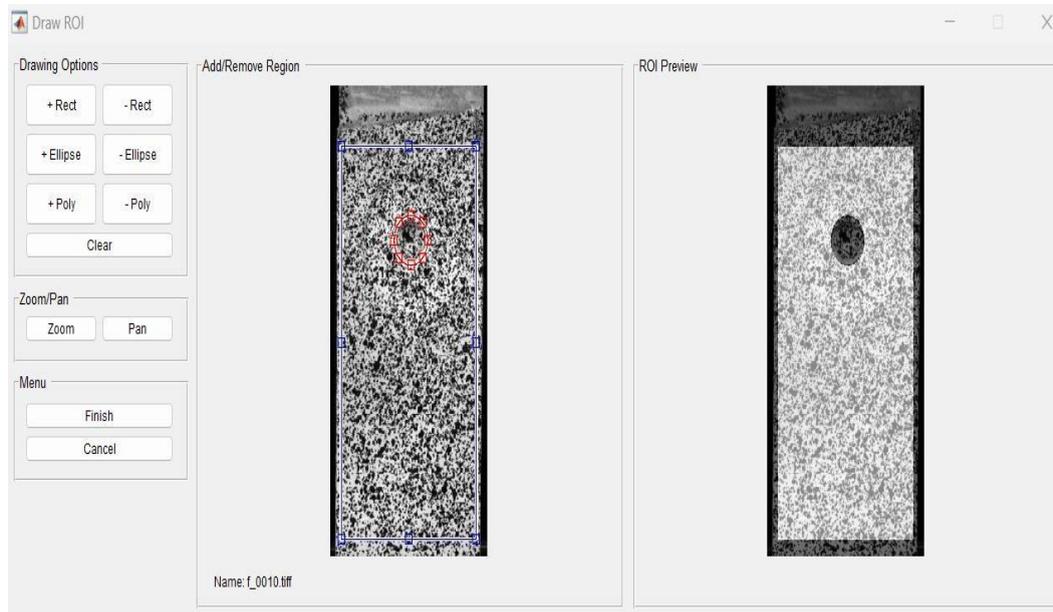
a) Le code open source DIC-Ncorr

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

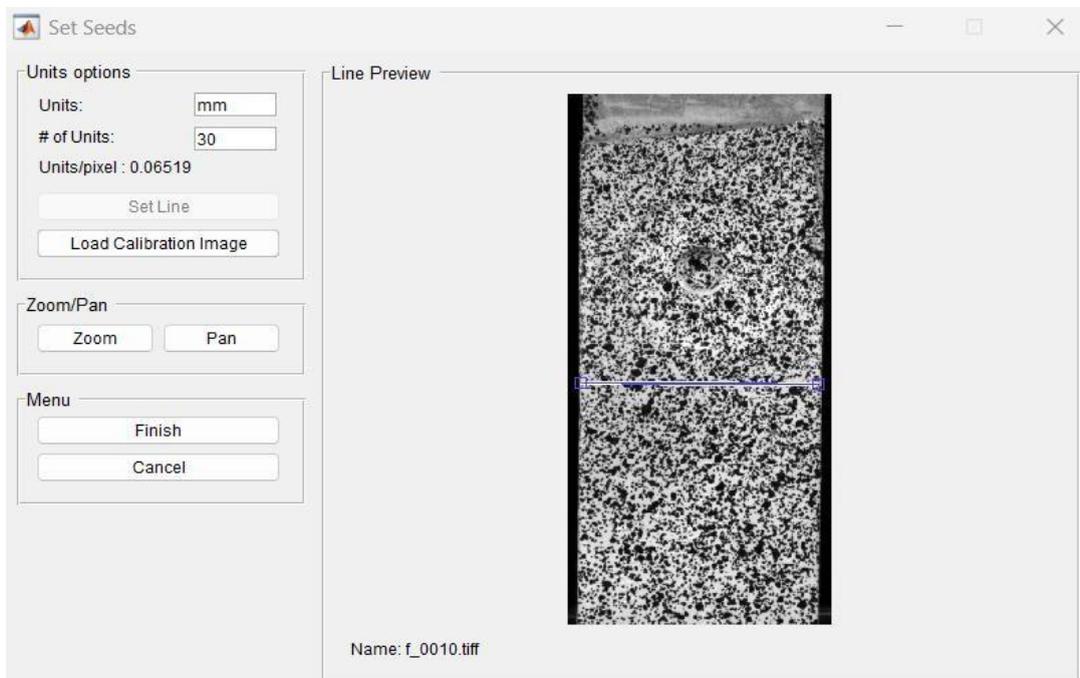
Étape 01 : Importer une image de référence ainsi que les images actuelles.

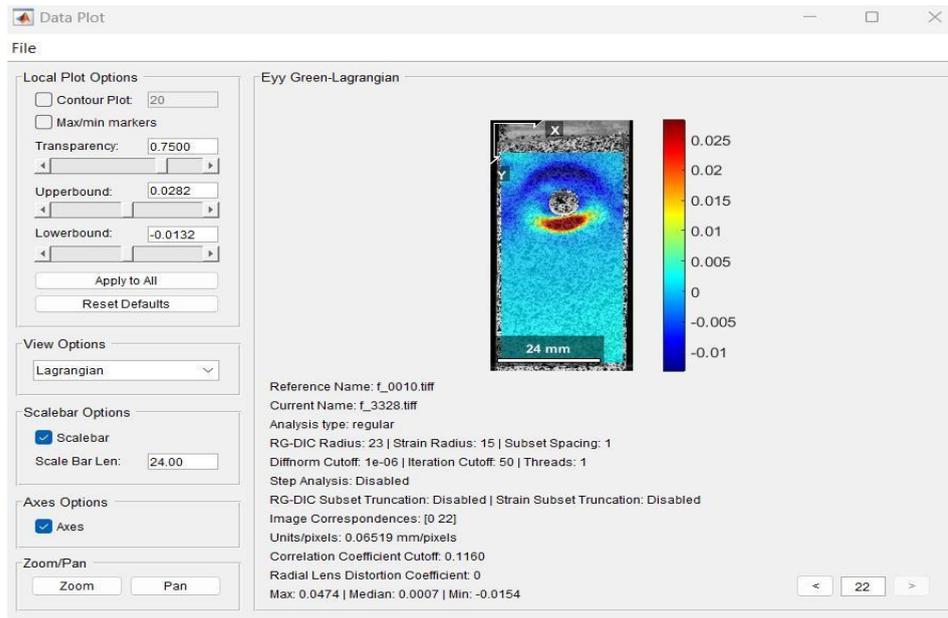


Étape 02 : Sélection de la zone à analyser.



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



Étape04 : Afficher les résultats déplacements/déformations "display déplacement/strains"**➤ Remarque :**

Nous effectuerons les étapes similaires sur la face arrière afin d'observer le champ de déformation dans la même zone pendant l'essai de tension.

b) Champs de déplacement et de déformation :

Afin de mieux appréhender le mécanisme de rupture et sa relation avec la structure interfaciale (zone de liaison) entre les deux plaques supérieure et inférieure, la déformation de la soudure lors des essais de cisaillement par traction a été surveillée grâce à la technique de corrélation d'image numérique. Cependant, en raison des caractéristiques géométriques de l'assemblage FSSW, il est impossible d'observer directement la zone inter faciale de rupture.

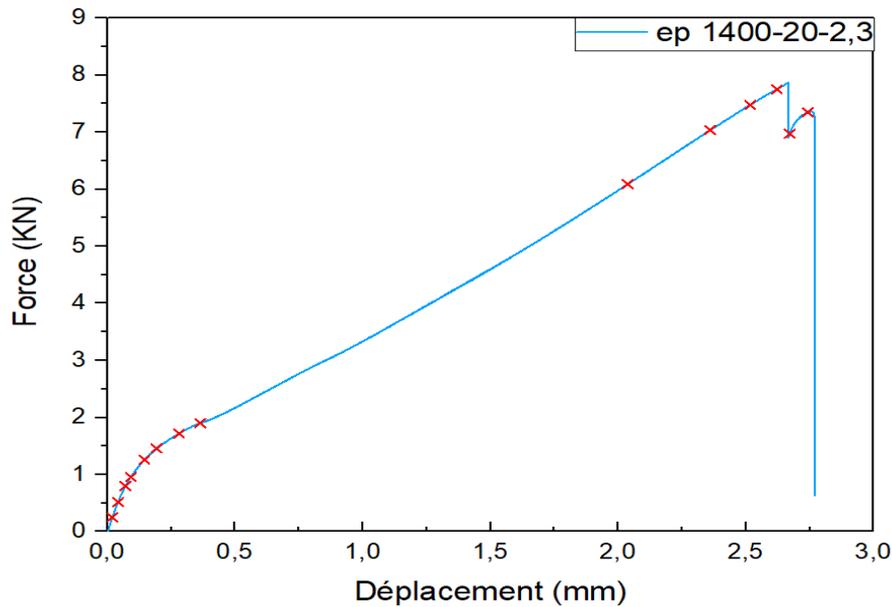


Figure 52 : Courbe de traction-cisaillement sur une éprouvette soudée par FSSW A la profondeur de pénétration 2.3mm

Étant donné l'intégralité du joint, les régions interfaciales (zones de liaison) subissent une déformation qui se reflète sur la surface de la tôle. En général, une concentration de déformation sur la surface peut entraîner la formation de fissures internes dans la direction de l'épaisseur de la tôle. À partir de ces mesures, une déformation équivalente a été calculée à différents stades de chargement, allant de 0,25 kN jusqu'à la charge maximale avant rupture de 7,75 kN, comme illustré dans les figures 53 et 54. Ces étapes sont également indiquées sur la courbe de traction-cisaillement présentée dans la figure 52. Ces images nous donnent une chronologie de notre essai de traction, et il convient de noter que le point de soudure réalisée par FSSW est situé au milieu de l'éprouvette.

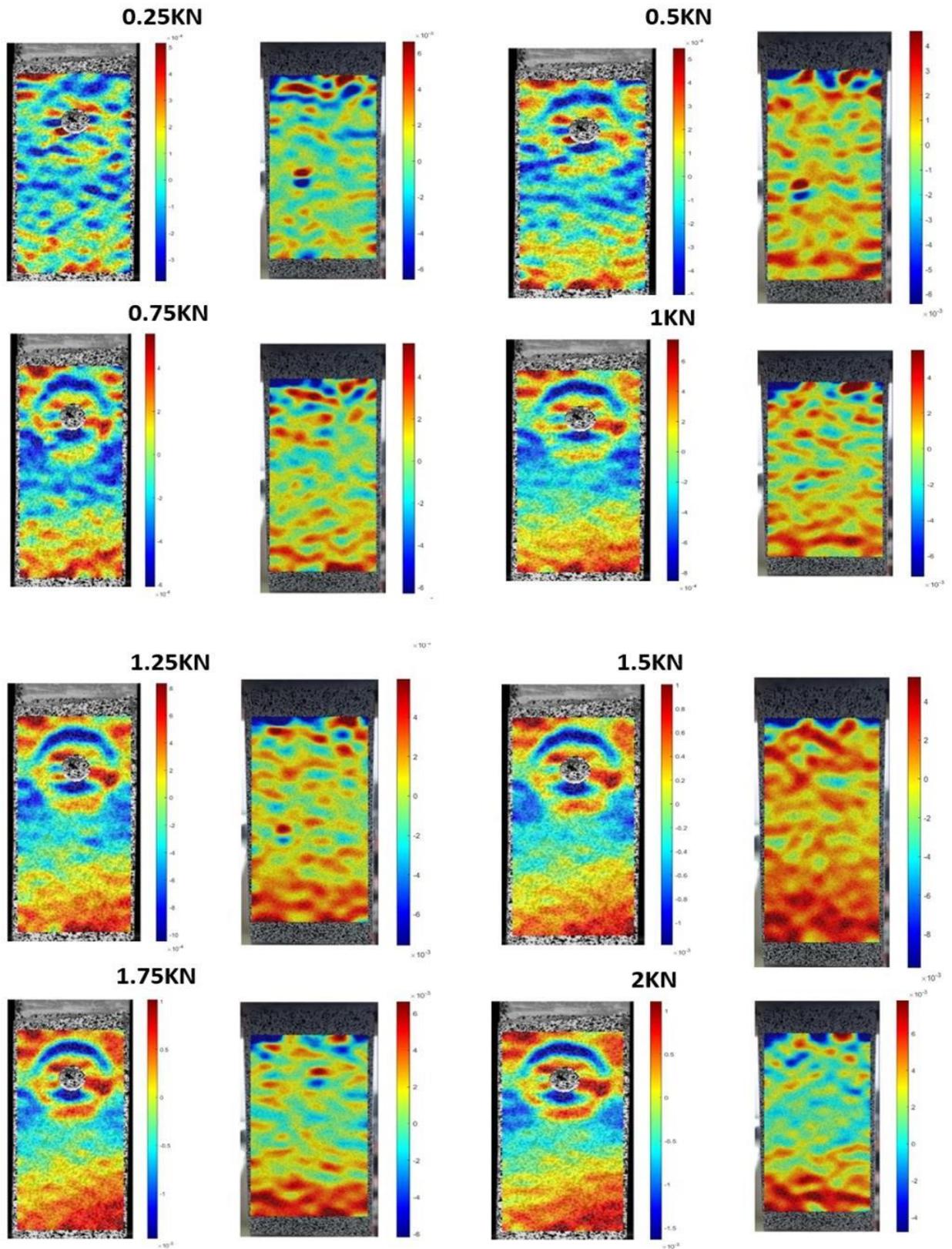


Figure 53: Illustration de champs de déformation et les champs de déformation d'une éprouvette soudée par FSSW durant un essai de traction-cisaillement avec CID 0.25 KN jusqu'à 2 KN

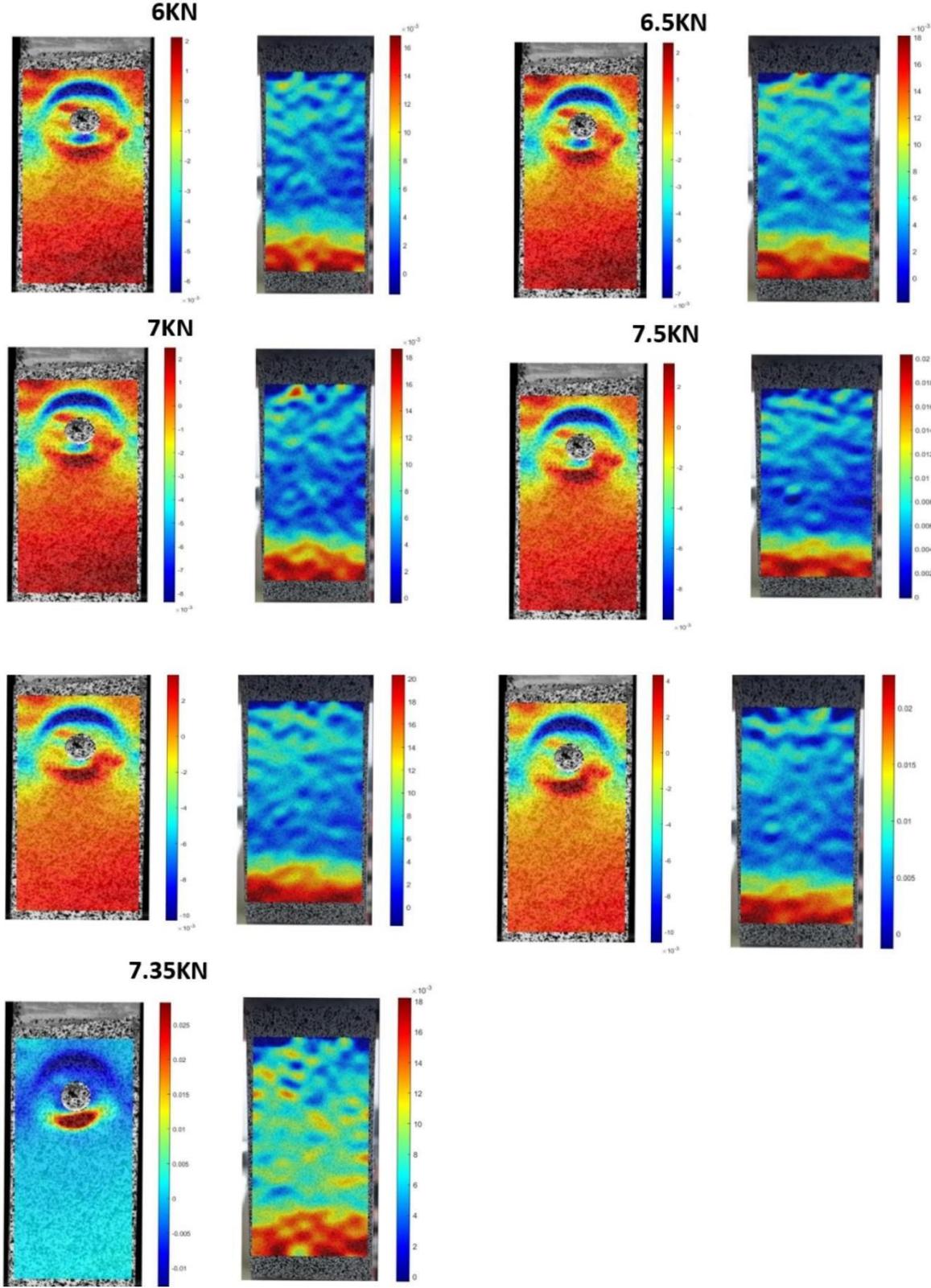


Figure 54 : Illustration de champs de déformation et les champs de déformation d'une éprouvette soudée par FSSW durant un essai de traction-cisaillement avec CID 6 KN jusqu'à 7.75 KN

Dans les Figures 53 et 54, le champ de déformation démontre que dans les premiers stades de déformation, celle-ci se localise uniquement dans les régions extérieures de la zone de soudure (ZS). Lorsque la force maximale est atteinte, la déformation se concentre principalement dans la région entourant l'empreinte du pion et de l'épaulement.

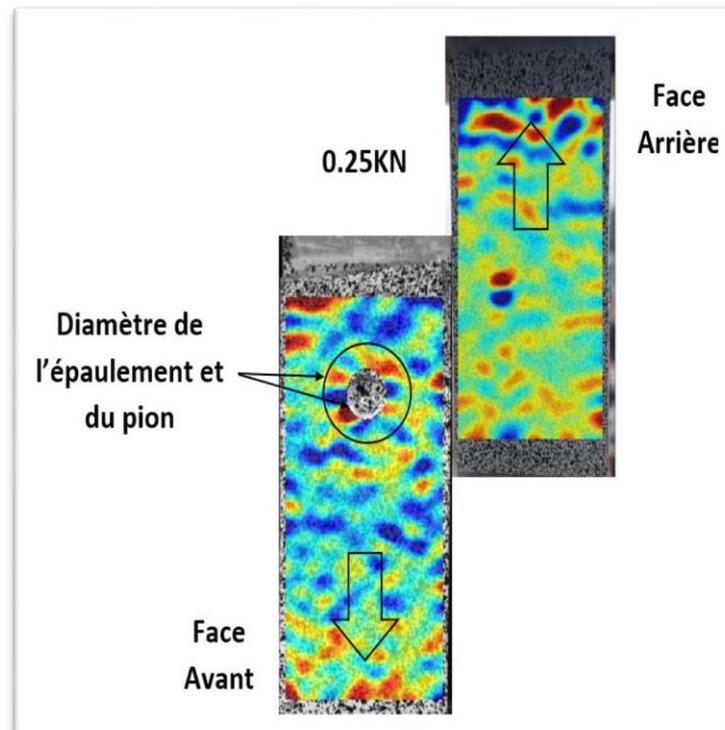


Figure 55: carte de champ déformation montrant la position de la face avant par rapport à l'arrière à une force de 0,25 KN.

Lors de l'essai de cisaillement par traction, du côté chargé de la plaque supérieure, des contraintes de traction se développent le long de l'interface, tandis que le côté libre subit des contraintes de compression. Par conséquent, les fissures apparaissent d'abord du côté chargé, entraînant des déformations globales plus importantes que du côté libre (Figure 55).

La distribution détaillée des déformations le long de l'axe de charge révèle clairement l'asymétrie des déformations (Figure 56). Du côté soumis à la charge, les déformations augmentent localement dans toutes les régions interfaciales avec l'augmentation de la force, ce qui signifie que l'ensemble de l'interface Al/Al contribue à la résistance.

La distribution des déformations le long de l'axe de charge, illustrée dans la Figure 56, montre que seules les déformations des interfaces a et b augmentent de manière significative avec la force appliquée.

Une observation importante est que la valeur maximale de déplacement se produit à une

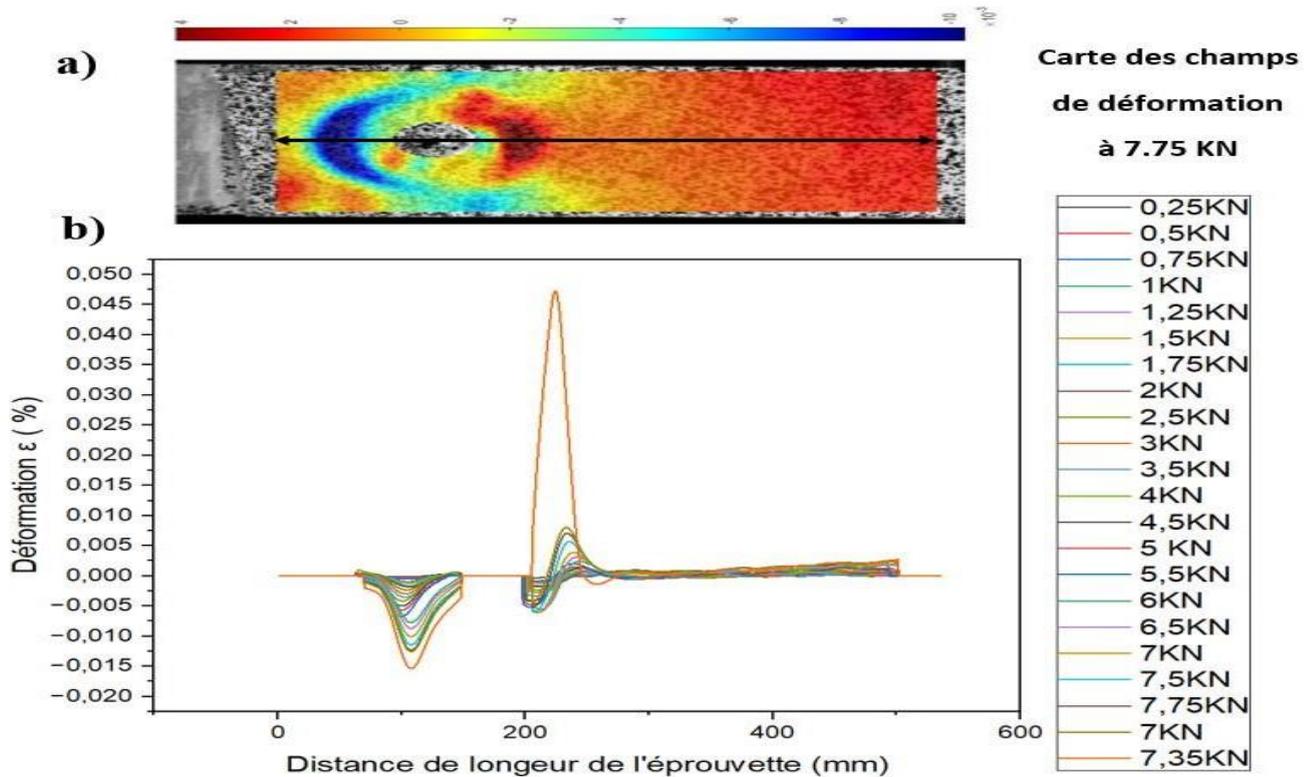


Figure 56: a) - Carte des champs de déformation à 7.75KN avec la ligne centrale,

b) - Profile de déformation prélevée dans la ligne centrale suivant la direction de la traction

c) Comparaison les champs de déformation des différents échantillons :

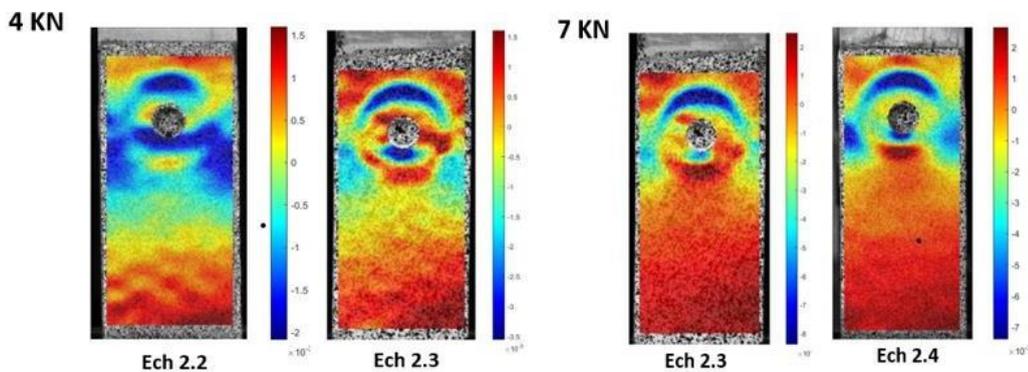


Figure 57: les champs de déformation de la face avant des différents éprouvettes soudés par FSSW.

On observe que le champ de déformation à la force 4KN localise dans les zones extérieures de la zone de soudure (ZS) et commence à apparaître la région entourant l'empreinte du pion et de l'épaule Ech 2.3.

A la force 7 KN la déformation se concentrent principalement dans la région entourant

l'empreinte du pion et de l'épaulement dans les deux échantillons (Ech 2.3, 2.4).

d) Champs de déformation d'une éprouvette soudée en deux points sur la même face

On constate que le point de soudure de la basse encaisse plus la charge appliquée que le point du haut. Cela indique que celui du bas est plus susceptible de rompre en premier. (Voir figure 58)

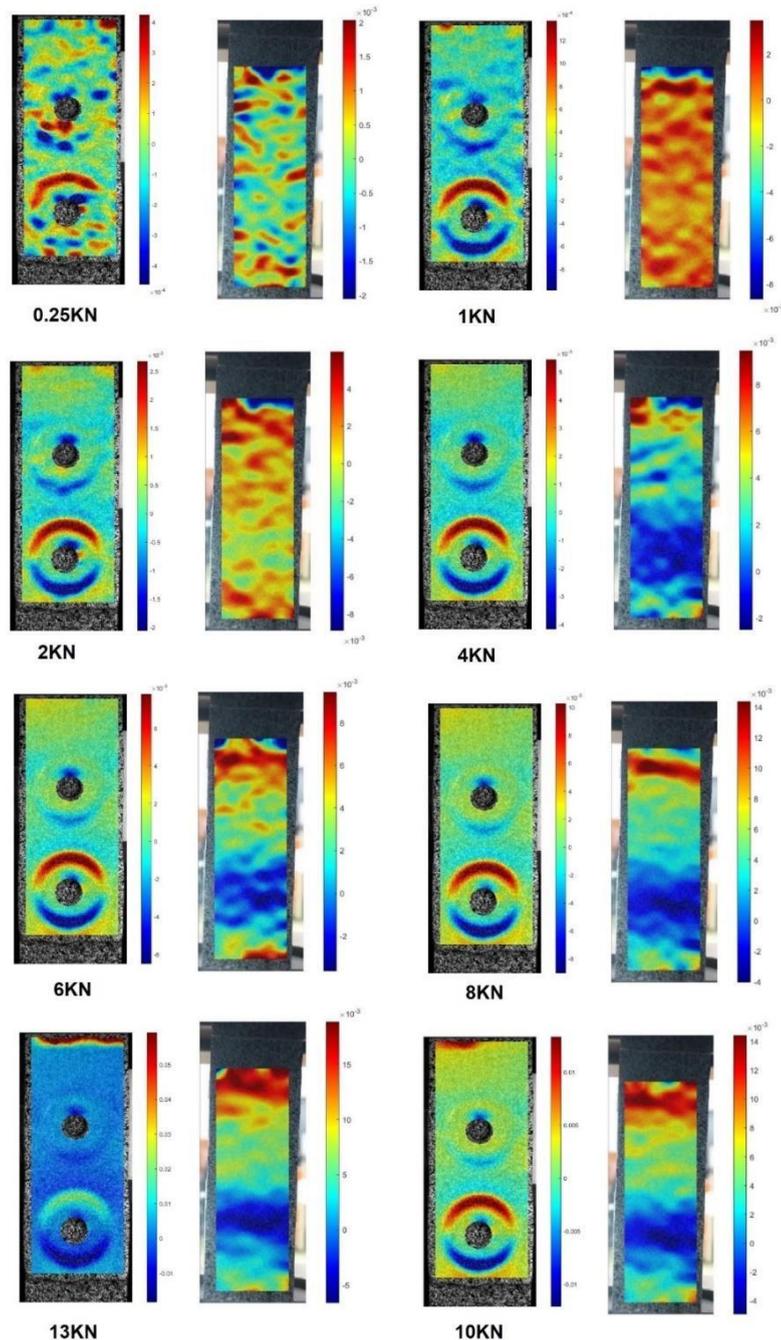


Figure 58 : Illustration des champs de déformation d'une éprouvette soudée en deux points sur la même face

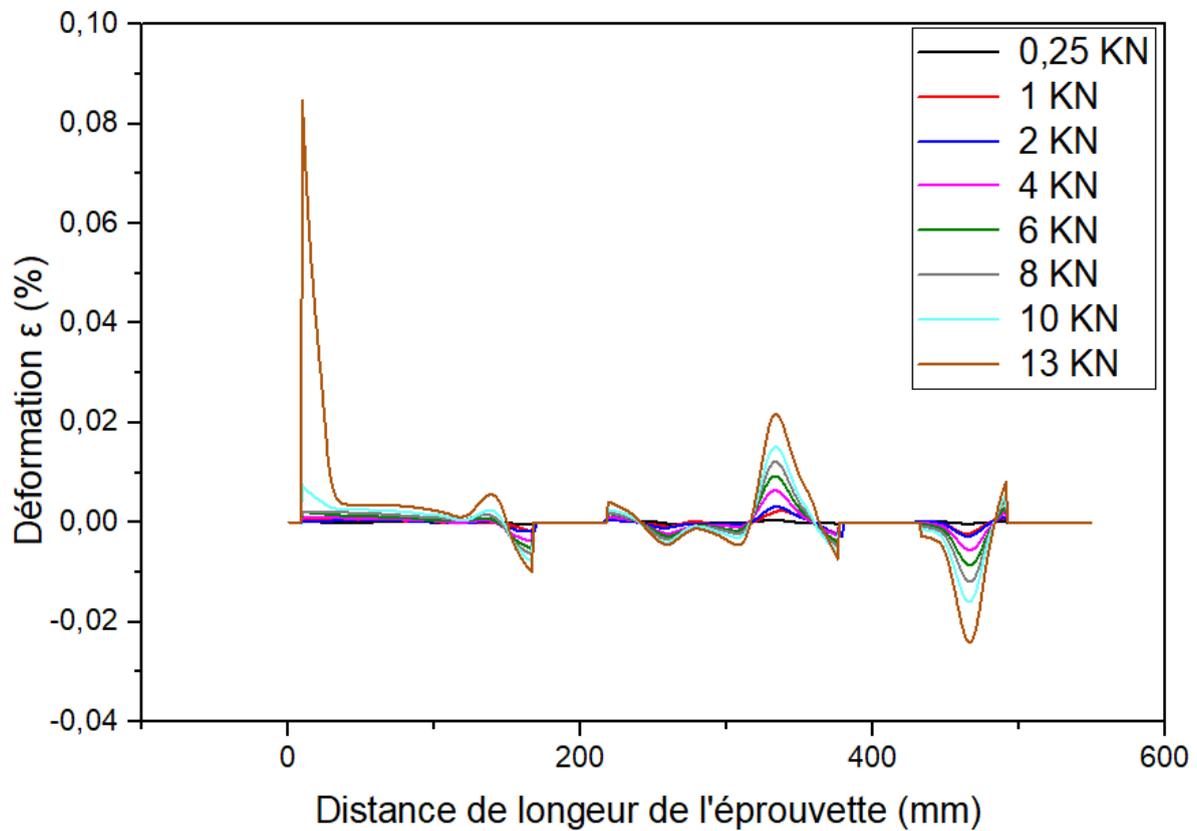


Figure 59 : Profile de déformation prélevée dans la ligne centrale suivant la direction de la traction d'une éprouvette soudée en deux points sur la même face.

e) Champs de déformation d'une éprouvette soudée en deux points sur face différentes :

On constate que le point de soudure de la face arrière c'est déformé doublement que le point de la vue de face. La raison est que le point de la face arrière c'est rompu en second après le premier (figure de 60 et 61).

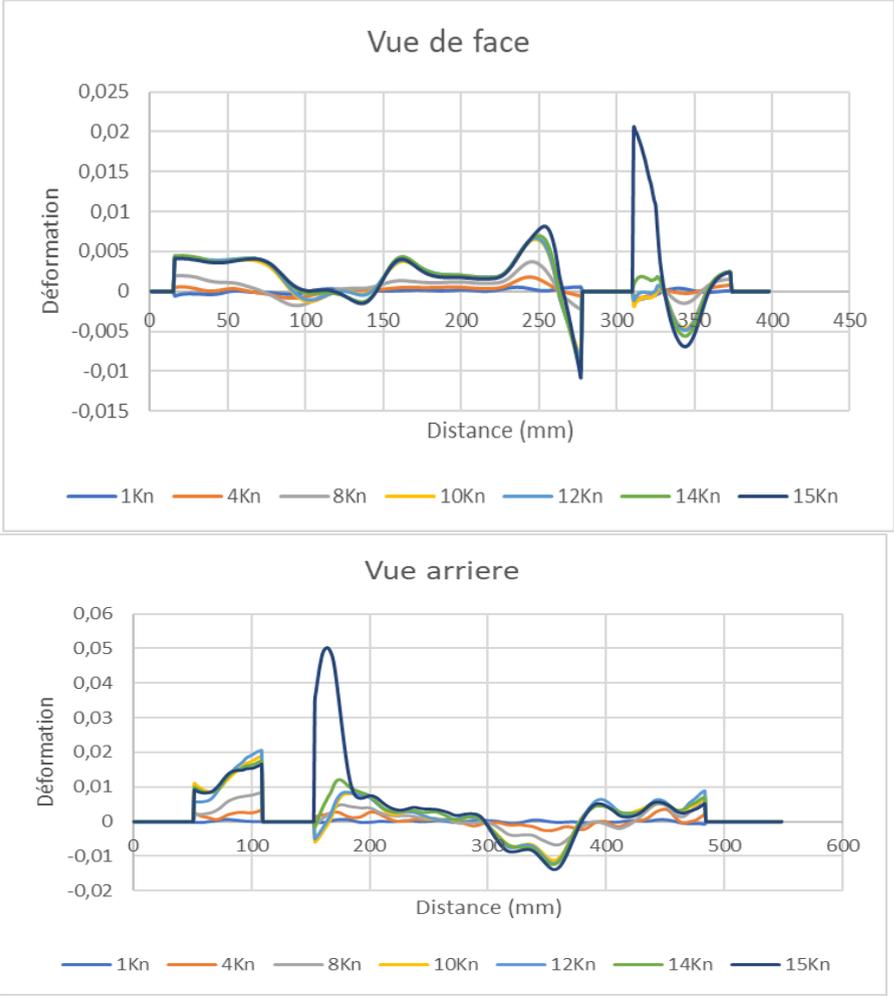


Figure 60 : Profile de déformation prélevée dans la ligne centrale suivant la direction de la traction d'une éprouvette soudée en deux points sur face différentes.

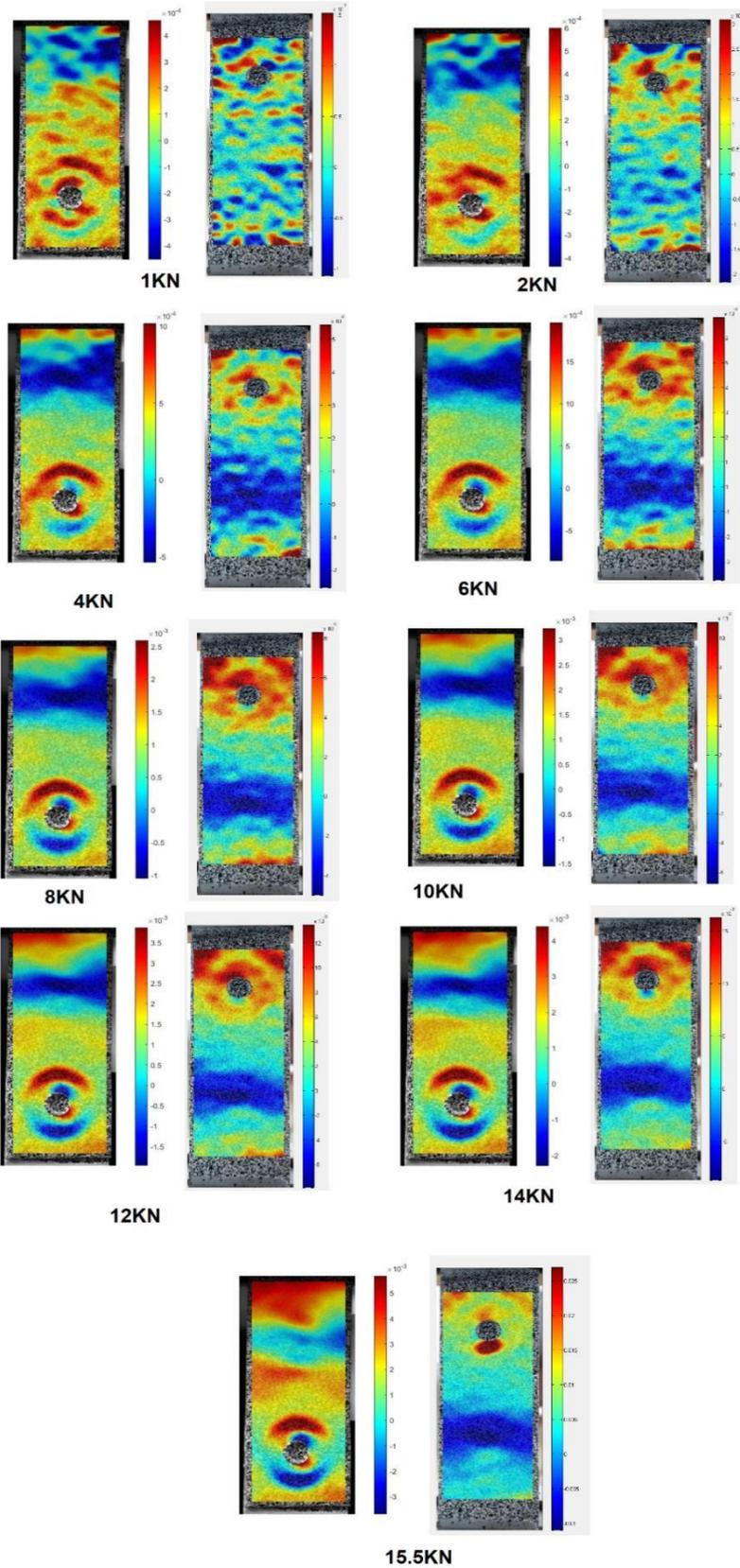


Figure 61 : Illustration des Champs de déformation d'une éprouvette soudée en deux points sur face différentes face

Conclusion

Conclusion générale

Le procédé de soudage par point par friction-malaxage présente de nouvelles opportunités dans l'assemblage des tôles et offre des avantages en termes de performances et de coûts par rapport aux méthodes de soudage conventionnelles. Cette étude a notamment souligné son fort potentiel pour réaliser des soudures entre différents alliages d'aluminium.

Les travaux réalisés dans le cadre de cette étude ont également permis de mettre en évidence l'évolution de la microstructure obtenue après soudage et l'influence de divers facteurs de soudage sur la résistance et l'efficacité de ce processus de soudage.

Les résultats de l'étude actuelle ont démontré avec succès l'assemblage d'alliages d'aluminium 7075 en utilisant le soudage par points par friction-malaxage. L'effet des paramètres de soudage sur les performances mécaniques et la microstructure a été minutieusement étudié.

Les principales conclusions tirées de ce travail sont

- Une augmentation de la profondeur de pénétration 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.
- Lorsque la force et la profondeur de pénétration augmentent, la résistance à la traction atteint un maximum. À une profondeur de 2.3 mm et une vitesse de rotation de 1400 tr/min, la charge de cisaillement maximale est obtenue. En revanche, à faible profondeur de pénétration, la charge de cisaillement en traction est faible. Cela pourrait être dû à la formation de microfissures dans la zone malaxée, Ce qui entraîne une diminution de la charge de cisaillement en traction.
- La dureté maximale a été observée à une profondeur de 2.3 mm et à une vitesse de rotation de 1400 tr/min. Ensuite, elle a progressivement diminué lorsque la profondeur de pénétration a été réduite. L'augmentation de la taille du trou de serrure était principalement due à la déformation plastique plutôt qu'à la zone de mélange et à la zone affectée thermiquement. Les paramètres de soudage ont eu un impact significatif sur la micro-dureté. Cela est dû à des différences importantes dans les coefficients de dilatation thermique, de mélange et d'incorporation entre les plaques 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 micro-dureté dans la ZATM et ZAT pour les différents paramètres de soudage atteint 159 Hv0.5, inférieure à celle du métal

de base qui est de 195 Hv0.5.

- 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 profondeur de pénétration est un facteur significatif sur l'effort de rupture.

Les résultats obtenus démontrent clairement que le procédé de soudage FSSW présente un potentiel considérable pour souder les alliages d'aluminium 7075-T6. Cette nouvelle technique de soudage peut constituer une alternative intéressante aux méthodes conventionnelles qui souffrent de défauts de soudage importants. En tant qu'approche économe en énergie électrique, elle peut être largement adoptée dans des secteurs tels que le pétrole, le gaz, l'automobile, l'aérospatiale et les transports.

Il est recommandé de prendre en compte les points suivants :

- Effectuer des simulations numériques afin d'étudier l'impact du soudage sur les propriétés mécaniques des matériaux.
- Réaliser des modélisations numériques en utilisant différents types d'outils.
- Effectuer des tests de corrosion pour obtenir des informations essentielles sur la qualité et l'efficacité de ce type de soudage (FSSW) dans des environnements agressifs tels que ceux contenant de la salinité ou des contaminants typiques des milieux industriels.

REFERENCES
BIBLIOGRAPHIQUES

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] Z. Shen, X. Yang, Z. Zhang, L. Cui, and T. Li, “Microstructure and failure mechanisms of friction stir spot welded 7075-T6 aluminum alloy joints,” *Mater. Des.*, vol. 44, pp. 476–486, 2013, doi: 10.1016/j.matdes.2012.08.026.
- [2] Z. Zhang, X. Yang, J. Zhang, G. Zhou, X. Xu, and B. Zou, “Effect of welding parameters on microstructure and mechanical properties of friction stir spot welded 5052 aluminum alloy,” *Mater. Des.*, vol. 32, no. 8–9, pp. 4461–4470, 2011.
- [3] J. Shen, D. Min, and D. Wang, “Effects of heating process on the microstructures and tensile properties of friction stir spot welded AZ31 magnesium alloy plates,” *Mater. Des.*, vol. 32, no. 10, pp. 5033–5037, 2011.
- [4] Y. Tozaki, Y. Uematsu, and K. Tokaji, “A newly developed tool without probe for friction stir spot welding and its performance,” *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 210, no. 6–7, pp. 844–851, 2010.
- [5] Y. Sun, H. Fujii, S. Zhu, and S. Guan, “Flat friction stir spot welding of three 6061-T6 aluminum sheets,” *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 264, pp. 414–421, 2019.
- [6] A. Lounis, “Influence des paramètres de soudage par point par friction malaxage (FSSW) sur le comportement de deux types de plaques en polymères: étude expérimentale et numérique,” 2020.
- [7] S. Zimmer, “Contribution to the industrialization of friction stir welding.” Arts et Métiers ParisTech, 2009.
- [8] E. Experimentale and E. T. Numerique, “THESE DE DOCTORAT Présentée à UNIVERSITE DJILLALI LIABES DE SIDI BEL ABBES FACULTE DES SCIENCES DE L’INGENIEUR DEPARTEMENT DE GENIE MECANIQUE Pour l’obtention du diplôme de DOCTEUR...,” no. January, 2019.
- [9] C. Herbelot, T. D. Hoang, A. Imad, and N. Benseddiq, “Damage mechanisms under tension shear loading in friction stir spot welding,” *Sci. Technol. Weld. Join.*, vol. 15, no. 8, pp. 688–693, 2010.
- [10] G. R. Bradley and M. N. James, “Geometry and microstructure of metal inert gas and friction stir welded aluminium alloy 5383-H321,” *Univ. Plymouth*, pp. 1–78, 2000.
- [11] M. Merzoug, M. Mazari, L. Berrahal, and A. Imad, “Parametric studies of the process of friction spot stir welding of aluminium 6060-T5 alloys,” *Mater. Des.*, vol. 31, no. 6, pp. 3023–3028, 2010.

- [12] I. J. Ibrahim and G. G. Yapici, "Application of a novel friction stir spot welding process on dissimilar aluminum joints," *J. Manuf. Process.*, vol. 35, pp. 282–288, 2018.
- [13] M. A. Tashkandi, J. A. Al-Jarrah, and M. Ibrahim, "Spot welding of 6061 Aluminum alloy by friction stir spot welding process," *Eng. Technol. Appl. Sci. Res.*, vol. 7, no. 3, pp. 1629–1632, 2017.
- [14] M. Paidar, A. Khodabandeh, M. L. Sarab, and M. Taheri, "Effect of welding parameters (plunge depths of shoulder, pin geometry, and tool rotational speed) on the failure mode and stir zone characteristics of friction stir spot welded aluminum 2024-T3 sheets," *J. Mech. Sci. Technol.*, vol. 29, pp. 4639–4644, 2015.
- [15] H. Badarinarayan, *Fundamentals of friction stir spot welding*. Missouri University of Science and Technology, 2009.
- [16] T. J. Minton, "Friction stir welding of commercially available superplastic aluminium." Brunel University School of Engineering and Design PhD Theses, 2010.
- [17] Y. Hovanski, M. L. Santella, and G. J. Grant, "Friction stir spot welding of hot-stamped boron steel," *Scr. Mater.*, vol. 57, no. 9, pp. 873–876, 2007.
- [18] T. Nasir *et al.*, "The experimental study of CFRP interlayer of dissimilar joint AA7075-T651/Ti-6Al-4V alloys by friction stir spot welding on mechanical and microstructural properties," *Nanotechnol. Rev.*, vol. 10, no. 1, pp. 401–413, 2021, doi: 10.1515/ntrev-2021-0032.
- [19] Y. N. Zhang, X. Cao, S. Larose, and P. Wanjara, "Review of tools for friction stir welding and processing," *Can. Metall. Q.*, vol. 51, no. 3, pp. 250–261, 2012.
- [20] W. Arbegast, "RS Mishra and MW Mahoney, Friction Stir Welding and Processing." ASM international, 2007.
- [21] F. Erdogan and G. C. Sih, "On the crack extension in plates under plane loading and transverse shear," 1963.
- [22] B. C. Smith, "Friction Stir Welding and Processing, chapter 11 Robots and machines for friction stir welding/processing, Friction Stir Welding and Processing," *ASM Int.*, 2007.
- [23] F. Dardouri, "Dispositif d'assistance associé à des robots manipulateurs utilisés dans des procédés de fabrication/FSW." Paris, ENSAM, 2018.
- [24] I. Date, "Osaka University Knowledge Archive : OUKA Friction Stir Spot Welding of Pure Aluminum Sheet in View of," 2011.
- [25] M. Fujimoto, D. Watanabe, N. Abe, S. S. Yutaka, and H. Kokawa, "Effects of process

- time and thread on tensile shear strength of Al alloy lap joint produced by friction stir spot welding,” *Weld. Int.*, vol. 24, no. 3, pp. 169–175, 2010.
- [26] Z. Shen, Y. Ding, and A. P. Gerlich, “Advances in friction stir spot welding,” *Crit. Rev. Solid State Mater. Sci.*, vol. 45, no. 6, pp. 457–534, 2020, doi: 10.1080/10408436.2019.1671799.
- [27] M. Hichem, “Mekri Hichem Soudage Hétérogène par point par friction malaxage Cas de: Aluminium / Acier,” 2018.
- [28] M. A. Sutton, W. J. Wolters, W. H. Peters, W. F. Ranson, and S. R. McNeill, “Determination of displacements using an improved digital correlation method,” *Image Vis. Comput.*, vol. 1, no. 3, pp. 133–139, 1983.
- [29] S. Song, M. Liao, and J. Qin, “Multiresolution image motion detection and displacement estimation,” *Mach. Vis. Appl.*, vol. 3, pp. 17–20, 1990.
- [30] F. Bremand, J. C. Dupre, and A. Lagarde, “Mesure de déformations sans contact par analyse d’images,” *Proc. Photomech.*, pp. 171–177, 1995.
- [31] F. Hild, “Mesure de champs de déplacement par corrélation d’images et applications en mécanique des solides,” 2004.
- [32] J. Kajberg, K.-G. Sundin, L. G. Melin, and P. Ståhle, “High strain-rate tensile testing and viscoplastic parameter identification using microscopic high-speed photography,” *Int. J. Plast.*, vol. 20, no. 4–5, pp. 561–575, 2004.
- [33] H. W. Schreier and M. A. Sutton, “Systematic errors in digital image correlation due to undermatched subset shape functions,” *Exp. Mech.*, vol. 42, pp. 303–310, 2002.
- [34] G. Besnard, F. Hild, and S. Roux, “‘Finite-element’ displacement fields analysis from digital images: application to Portevin–Le Châtelier bands,” *Exp. Mech.*, vol. 46, pp. 789–803, 2006.
- [35] M. Gad-el-Hak, “Flow physics in microdevices,” *Handb. MEMS*, 2002.
- [36] F. Hild, B. Raka, M. Baudequin, S. Roux, and F. Cantelaube, “Multiscale displacement field measurements of compressed mineral-wool samples by digital image correlation,” *Appl. Opt.*, vol. 41, no. 32, pp. 6815–6828, 2002.
- [37] F. Amiot, F. Hild, and J. P. Roger, “Mesure de champs de déplacement micrométrique d’une surface par corrélation de sa topographie,” *Instrumentation, Mes. Métrologie*, vol. 5, pp. 33–43, 2005.
- [38] R. Develay, “Propriétés de l’aluminium et des alliages d’aluminium corroyés,” *Rapp. Tech. Tech. l’Ingénieur M*, vol. 440, p. 1992, 1992.
- [39] C. VARGEL, *Métallurgie de l’aluminium*. Ed. Techniques Ingénieur, 2010.

- [40] W. F. Miao and D. E. Laughlin, "Effects of Cu content and preaging on precipitation characteristics in aluminum alloy 6022," *Metall. Mater. Trans. A*, vol. 31, pp. 361–371, 2000.
- [41] L. A. Dobrzański, "Advanced Composites with Aluminum Alloys Matrix and Their Fabrication Processes," *Adv. Alum. Compos. Alloy.*, p. 3, 2021.
- [42] <https://www.makeitfrom.com/material-properties/7075-T6-Aluminum/>, "No Title."
- [43] J. Hirsch, "Recent development in aluminium for automotive applications," *Trans. Nonferrous Met. Soc. China*, vol. 24, no. 7, pp. 1995–2002, 2014.
- [44] O. O. Ojo, E. Taban, and E. Kaluc, "Friction stir spot welding of aluminum alloys: a recent review," *Mater. Test.*, vol. 57, no. 7–8, pp. 609–627, 2015.
- [45] D. Fersini and A. Pirondi, "Fatigue behaviour of Al2024-T3 friction stir welded lap joints," *Eng. Fract. Mech.*, vol. 74, no. 4, pp. 468–480, 2007.
- [46] S. ZIMMER *et al.*, "Manuel Pédagogique, Le soudage par friction malaxage, friction stir welding," *Proj. COROUSSO Livrable*, no. 2.4, p. 59, 2006.
- [47] H. U. Hong, B. S. Rho, and S. W. Nam, "A study on the crack initiation and growth from δ -ferrite/ γ phase interface under continuous fatigue and creep-fatigue conditions in type 304L stainless steels," *Int. J. Fatigue*, vol. 24, no. 10, pp. 1063–1070, 2002.