

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE



MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE DJILLALI LIABES DE SIDI BEL ABBES



FACULTE DE TECHNOLOGIE
DÉPARTEMENT DE GENIE MECANIQUE

THESE

Pour

L'obtention du diplôme de

Doctorat 3^{ème} cycle

Spécialité : Génie Mécanique

Option : Mécanique et conception des systèmes

Présenté Par :

Mekri Hichem

Soudage Hétérogène par point par friction malaxage

Cas de : Aluminium/Acier

Soutenue le : XX/XX/2018

Devant la commission d'examen :

- | | | |
|----------------------------|--------------------------------------|-----------------------|
| ➤ Mr. BENGUEDIAB Mohamed | Professeur, UDL – SBA - | Président |
| ➤ Mr. BOUCHOUICHA Benattou | Professeur, UDL – SBA - | Directeur de thèse |
| ➤ Mr. IMAD Abdellatif | Professeur, Ecole Polytech. de Lille | Co-directeur de thèse |
| ➤ Mr. MAZARI Mohamed | Professeur, UDL – SBA - | Examineur |
| ➤ Mr. GHAZI Abdelkader | Docteur (MCA), Univ. de Mascara | Examineur |

2017-2018

DEDICACES

DEDICACES

Un grand remerciement à Mon père, Ma Mère et ma famille pour son encouragement. Mon épouse pour tout le temps qu'elle a consacré pour me faciliter la préparation de cette thèse.

_ Mes Amis et Mes collègues qui m'ont encouragé pour achever cette thèse.

_ A tous les gens qui m'ont aidé de près ou de loin.

_ Enfin à Ma petite princesse Hafssa Maria.

REMERCIEMENTS

REMERCIEMENTS

Cette thèse a été effectuée au Laboratoire de Matériaux et Systèmes Réactifs (LMSR), Département de Génie Mécanique, Faculté de technologie, Université Djillali Liabes de Sidi Bel Abbès en collaboration avec le laboratoire de mécanique de Lille (LML) université de Lille 1-France.

*Je tiens à exprimer ma reconnaissance au Professeur **Benattou BOUCHOUICHA**, directeur de thèse de m'avoir guidé et soutenu pour accomplir ce travail ainsi que mon Co- directeur de thèse **IMAD Abdellatif**, Professeur à Polytech de Lille, Université Lille1, et monsieur **CHRISTOPHE Herbelot**, Professeur à Polytech de Lille, Messieurs **ZEMRI Mokhtar**, Professeur à l'U.D.L de Sidi Bel Abbès ,monsieur **RAJASHEKHARA Shabadi**, Professeur à Polytech de Lille Université Lille1, Monsieur **MILOUDI Abdelkader**, maitre de conférence A à l'U.D.L de Sidi Bel Abbés. De m'avoir guidé et pour leur soutien et les nombreuses travaux et discussions scientifiques au cours de la préparation de cette thèse.*

Je remercie en particulier,

*_ Monsieur **BENGUEDIAB Mohamed**, Professeur à l'U.D.L de Sidi Bel Abbès d'avoir accepté de présider le jury de ma thèse.*

*_ Messieurs **MAZARI Mohamed**, Professeur à l'U.D.L de Sidi Bel Abbès et Monsieur **GHAZI Abdelkader**, Maitre de conférences A à l'Université de Mascara d'avoir accepté de juger ce travail de thèse.*

Je remercie également tous les membres du laboratoire LMSR pour leurs hospitalités, leurs conseils et leurs contributions considérables pour la réalisation de ce travail.

RESUME

RESUME

La présente étude s'inscrit dans le cadre d'une thèse de doctorat portant sur le soudage hétérogène par point par friction malaxage (Friction Stir spot Welding, FSSW) d'une configuration bimétallique (un alliage d'Aluminium 6061-T5 et d'un acier galvanisé). Le but de cette investigation est d'optimiser les paramètres de soudage FSSW pour l'amélioration des propriétés mécaniques des structures soudées. Le travail préliminaire a ciblé la détermination des propriétés microstructurales et mécaniques des deux matériaux de base utilisés. A ce niveau, l'influence de la distance de pénétration et de la vitesse de rotation a été analysée via un couplage entre des essais de traction monotone et la technique l'émission acoustique (EA) et la corrélation d'image digital (CID). Une étude paramétrique a permis un couplage entre le procédé de soudage FSSW et la qualité des joints soudés en termes de microstructure et de propriétés mécaniques. Ainsi, La morphologie des joints soudés a été mise en évidence en vue de mieux comprendre le flux de matière lors du procédé FSSW d'un multi matériau. De plus, des observations fines microstructurales ont permis de mettre en évidence les évolutions de la taille des grains, de la micro dureté et de la texture des différentes zones définissant un joint soudé. Une analyse micrographique des joints soudés, réalisée à l'aide d'un microscope électronique à balayage « MEB » et La technique de la diffraction des électrons radiodiffusés « EBSD » a contribué à mieux cerner les mécanismes d'endommagement. L'ensemble des résultats nous a permis d'identifier et de quantifier les paramètres opératoires caractéristiques pour réaliser de façon optimale une soudure hétérogène (Aluminium/Acier) par FSSW.

Mots clés : FSSW, soudage hétérogène, distance de pénétration, vitesse de rotation, microstructure, analyse micrographique, essais de traction.

ABSTRACT

The present study is part of a doctoral thesis on heterogeneous spot friction stir welding (Friction Stir Spot Welding, FSSW) of a bimetallic configuration (an aluminum alloy 6061-T5 and galvanized steel). The purpose of this investigation is to optimize the FSSW welding parameters for improving the mechanical properties of welded structures. The preliminary work focused on the determination of the microstructural and mechanical properties of the two basic materials used. At this level, the influence of the penetration distance and the speed of rotation were analyzed via a coupling between monotonic tensile tests and acoustic emission (EA) and digital image correlation (CID) techniques. . A parametric study allowed a coupling between the FSSW welding process and the quality of the welded joints in terms of microstructure and mechanical properties. Thus, the morphology of welded joints has been demonstrated in order to better understand the flow of material during the FSSW process of a multi-material. In addition, fine microstructural observations made it possible to highlight changes in the grain size, the micro hardness and the texture of the different zones defining a welded joint. A micrographic analysis of the welded joints carried out using a scanning electron microscope "SEM" and the technique of diffraction of broadcast electrons "EBSD" has helped to better understand the mechanisms of damage. All the results allowed us to identify and quantify the characteristic operating parameters to optimally achieve a heterogeneous weld (Aluminum / Steel) by FSSW.

Key words: FSSW, heterogeneous welding, penetration distance, rotational speed, microstructure, micrographic analysis, tensile tests.

خلاصة

الدراسة الحالية هي جزء من أطروحة الدكتوراه في لحام اللحام الاحتكاكي غير المتجانسة من تكوين متعلق بنظام المعدنين لتحسين الخواص الميكانيكية (سبيكة الألومنيوم و الفولاذ المجلفن). الغرض من هذه الدراسة هو تحسين معايير اللحام للهياكل الملحومة. ركز العمل التمهيدي على تحديد الخواص التركيبية والميكانيكية للمادة الأساسية المستخدمة على هذا المستوى، تم تحليل تأثير مسافة الاختراق وسرعة الدوران من خلال اقتران بين اختبارات الشد الروتيني والتقنيات الصوتية وتقنيات ارتباط الصورة الرقمية. سمحت دراسة تجريبية بالربط بين عملية اللحام ونوعية المفاصل الملحومة من حيث البنية المجهرية والخواص الميكانيكية. وهكذا تم توضيح مورفولوجية الوصلات الملحومة من أجل فهم أفضل لتدفق المواد للمادة المتعددة. بالإضافة إلى ذلك، جعلت الملاحظات الدقيقة البنية الدقيقة من الممكن تسليط الضوء على التغيرات في حجم الحبيبات والصلابة الدقيقة ونسيج المناطق المختلفة التي تحدد مفصل الملحومة. وقد ساعد التحليل المجهرى للمفاصل على فهم آليات الضرر بشكل أفضل. جميع النتائج سمحت الملحومة ، الذي تم إجراؤه باستخدام المجهر الإلكتروني الماسح لنا بتحديد وقياس معايير التشغيل المميزة لتحقيق اللحام غير المتجانس (الألومنيوم/الصلب) على النـحـوالـأـمـثـل

الكلمات الرئيسية: اللحام غير المتجانس، اختراق المسافة، سرعة الدوران ، البنية المجهرية ، التحليل الميكروغرافي ، اختبارات الشد.

SOMMAIRE

SOMMAIRE

Introduction générale	17
CHAPITRE I - ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE	21
Partie 1. Etat de l'art sur le procédé de soudage FSW	22
I.1. Généralité sur les différents types de soudage	23
I.2. Principe General Du Procédé Soudage Par Friction Malaxage	24
I.2.1. Soudage linéaire (FSW)	26
A. Phase d'approche et de pénétration	26
B. Phase de soudage	27
I.2.2. Soudage par point par friction malaxage (FSSW)	28
I.3. Différentes positions de soudage (fsw)	28
I.3.1. avantages du procédé de soudage (fsw)	29
I.3.2. les inconvénients de (FSW)	29
I.3.3. les outils de soudage	30
A. Description de l'outil de soudage	30
B. Matériaux utilisés pour l'outil	31
I.4. Principaux paramètres relatifs au procédé FSW	32
I.4.1. Présentation d'un cordon de soudure	33
A. Aspect d'un cordon de soudure réalisé par FSW	33
B. Côté avance et côté retrait	34
C. Coupe transversale d'une soudure	35
D. les défauts générés par le malaxage	36
I.4.2. Principaux domaines d'application	36
A. Dans le domaine spatial	36
B. Côté avance et côté retrait	37
C. Coupe transversale d'une soudure	38
Partie 2 - Etat de l'art sur le procédé de soudage FSSW	41
I.5. Introduction	42
I.5.1. Soudage par point par friction malaxage (Friction Stir Spot Welding)	42

I.5.2. Soudages FSSW homogène et hétérogène	44
A. Le soudage homogène	44
B. Le soudage hétérogène	45
C. Les champs thermiques	48
D. l'influence de la géométrie de l'outil sur le FSSW	51
E. Forme d'épaulement de l'outil	51
F. L'influence de la Forme du pion	55
G. L'influence des conditions de soudage dans le FSSW	55
G.1.Cas des alliages d'aluminium 6xxx	57
G.2.Cas des alliages d'aluminium 5xxx	60
H. Microstructure dans la zone de soudure	61
H.1.Les différentes zones affectée	61
H.2. Cas homogène	62
H.3.Cas hétérogène	65
I. Flux de matière	69
J. Résistance mécanique	70
K. Modes de rupture	72

CHAPITRE II - TECHNIQUES EXPERIMENTALE

II. Etude expérimentale	76
II.1. Matériaux utilisés	76
II.2. Conditions de soudage FSSW et instrumentations	78
II.2.1. Machine de soudage	78
II.2.2. Outil de soudage	79
II.2.3. Cycle des temps de soudage	80
II.2.4. Paramètres de soudage	80
II.3.Analyse des résultats et discussion	83
II.3.1.Essais de traction sur les matériaux de base (Eprouvettes alter)	83
A. Analyse de l'aluminium 6061-T5	84
B. Analyse de l'acier	85
II.3.2.Essais de traction-cisaillement sur les éprouvettes soudées	86
A. Assemblage avec un point	87
B. Assemblage avec 2 point de soudure horizontaux et 2 point verticaux	89
C. Influence des paramètres de soudage	90
D. Mesure de température	91

E. Les essais de traction avec (EA) et (DIC)	93
E.1. Technique de corrélation d'images digitales (DIC)	93
E.2. Essais de traction avec la Technique d'Emission Acoustique (EA)	97
 CHAPITRE III – ANALYSES MICROSTRUCTURALES	 103
III.1. L'influence de la vitesse de rotation et la distance de pénétration	104
III.2. Essai de micro dureté (Vickers)	107
III.2.1. Principe	107
III.2.2. Exploitation des résultats	107
III.2.3. Exploitation graphique des résultats de micro dureté (Cartographie)	109
III.3. Mode de rupture	111
III.3.1. Analyse des zones de rupture	112
III.4. Evolution de la Microstructure	114
III.5. Morphologie des grains et détection des zones	117
 CHAPITRE IV - MODELISATION	 120
IV. Modélisation des paramètres de soudages fssw	121
IV.1. Introduction	121
IV.2. Modélisation	121
IV.2.1. Choix des intervalles d'étude	122
IV.2.2. Intervalle d'étude de la vitesse de rotation de l'outil N	122
IV.2.3. Intervalle d'étude de la distance de pénétration	122
IV.3. Influence des facteurs de soudage choisis	122
IV.3.1. Graphique des facteurs significatifs en fonction des paramètres de soudage	124
IV.3.1. Interaction entre la vitesse de rotation et la distance pénétration	126
 Conclusion et Perspectives	 128
Références bibliographique	131

INDEX

DES

NOTATIONS

INDEX DES NOTATIONS

<i>F</i>	<i>[kN]</i>	Force appliqué par l'outil.
<i>Va</i>	<i>[mm/min]</i>	Vitesse de soudage de l'outil suivant l'axe (O, x).
<i>ω</i>	<i>[tr/min]</i>	Vitesse de rotation de l'outil pendant le soudage.
<i>Fz</i>	<i>[kN]</i>	Force appliqué suivant (O, z).
<i>δ_{outil}</i>	<i>[mm/s²]</i>	Accélération verticale de l'outil
<i>ép.</i>	<i>[mm]</i>	Epaisseur soudée
<i>Ts</i>	<i>[s]</i>	Temps de soudage « dwell time »
<i>HV</i>	<i>[HV]</i>	Dureté Vickers
<i>FSW</i>	-	Friction Stir Welding
<i>FSSW</i>	-	Friction Stir Spot Welding
<i>TWI</i>	-	Institute de soudage
<i>ZATM</i>	-	Zone affectée thermo mécaniquement.
<i>ZAT</i>	-	Zone affectée thermiquement.
<i>ZM</i>	-	Zone de malaxage
<i>Plunging depth</i>	<i>[mm]</i>	Profondeur de pénétration.
<i>Q</i>	<i>[J]</i>	Energie thermique résultant du procédé FSSW.
<i>Force</i>	<i>[N]</i>	Force maximale appliquée par l'outil durant sa descente verticale.
<i>Dp</i>	<i>[mm]</i>	Profondeur de pénétration de l'outil
<i>HB</i>	<i>[HB]</i>	Dureté Brinell
<i>HRC</i>	<i>[HR]</i>	Dureté Rockwell
<i>MB</i>	-	Métal de base
<i>Tp</i>	<i>[seconde]</i>	Temps de plongée de l'outil
<i>Tm</i>	<i>[min]</i>	Temps de maintien
<i>Tr</i>	<i>[min]</i>	Temps de retrait de l'outil
<i>Vp</i>	<i>[mm/min]</i>	Vitesse de plongée de l'outil suivant l'axe (O, z).
<i>Cst</i>	-	Constant
<i>rot</i>	<i>[Tr/min]</i>	Vitesse de rotation
<i>Wel</i>		Welding
<i>Tem</i>	<i>[seconde]</i>	Temps

<i>Dis</i>	<i>[mm]</i>	Distance
<i>rot*rot</i>	<i>[Tr/min]</i>	Vitesse de rotation

INTRODUCTION GENERALE

INTRODUCTION GENERALE

La demande croissante de l'économie d'énergie dans différents secteurs industriels a mené à la nécessité d'employer les alliages légers et les aciers de haute résistance. Un tel intérêt a créé la nécessité de développer les technologies de soudage fiables qui peuvent permettre des processus multi matériel de fabrication de conception et de coût bas. Le soudage par point par friction malaxage (Friction Stir Spot Welding) (FSSW) est un procédé de soudage thermomécanique : un outil constitué d'un épaulement et d'un pion est mis en rotation rapide et pénètre dans les deux tôles superposées à assembler. La chaleur produite par le frottement de l'outil sur les tôles provoque un ramollissement de la matière. La rotation du pion permet alors de malaxer la matière des deux tôles. L'outil se retire ensuite en laissant une empreinte. Le FSSW permet ainsi le soudage de l'aluminium grâce à un malaxage entre les deux tôles. L'écoulement de la matière dans la zone de malaxage a pu être identifié. Il existe précisément deux flux distincts : des remontées externes de la matière et un malaxage interne le long de la paroi du pion. Il en résulte alors l'apparition de stries dans la zone de malaxage, qui correspondent à des films de matière fondue provenant du dessous du pion. D'un point de vue microstructurale, le mécanisme de recristallisation dynamique continue a été identifié, si bien que la zone de malaxage correspond à une zone de petits grains recristallisés, entrecoupés de stries de grains plus fins d'environ $1\mu\text{m}$, et de composition chimique différente. Quant aux propriétés mécaniques, elles sont fortement liées à l'écoulement de la matière et à la microstructure qui en résulte, comme le montre notamment les mécanismes de rupture. La rupture a lieu par la propagation de la fissure située à l'extrémité de l'interface entre les deux tôles. Cette fissure se propage généralement en contournant la zone de malaxage qui présente une forte dureté due à l'affinement des grains, en empruntant le chemin marqué par le resserrement des stries. Ainsi, un moyen évident de retarder la rupture est donc d'obtenir une zone de malaxage la plus large possible. Mais il ne s'agit pas du seul facteur pour optimiser la tenue mécanique des points de soudure. L'inclinaison de la fissure à l'extrémité de l'interface est une autre donnée très influente. L'assemblage entre l'aluminium et l'acier galvanisé, quant à lui, est rendu possible grâce à une accroche, c'est-à-dire à une remontée d'acier dans la tôle d'aluminium. Il y a alors formation de composés intermétalliques à l'interface entre l'accroche d'acier et l'aluminium grâce à un effet thermomécanique. Les précipités intermétalliques qui en résultent au niveau des accroches et une dureté qui diffère fortement selon leur nature, allant jusqu'à 800 HV. Ces zones

intermétalliques deviennent alors des zones très fragiles qui peuvent détériorer le comportement mécanique des soudures. Lorsque ces précipités sont trop nombreux, et que leur microdureté est élevée, la rupture des points de soudure provient de nombreuses fissures qui apparaissent au niveau des zones intermétalliques [41]. Mais ils restent nécessaires, car s'ils sont quasi inexistantes, la tenue mécanique est très faible, la rupture ayant lieu par une rapide décohésion entre l'accroche d'acier et l'aluminium. Ainsi, pour une tenue mécanique optimale, une certaine quantité d'intermétalliques est nécessaire, ce qui correspond également à une surface d'accroche plus importante. Dans ce cas, l'accroche étant plus robuste, la rupture a lieu par déchirure de la tôle d'aluminium. L'ensemble des résultats a permis de montrer le fort potentiel du FSSW pour des applications hétérogènes entre l'aluminium et l'acier.

Notre objectif dans ce travail est d'étudier l'effet des paramètres de soudage (vitesse de rotation, vitesse de soudage, distance de pénétration,.....) sur la tenue mécanique et sur les caractéristiques mécaniques des joints de soudure hétérogène soudée par points par friction malaxage (FSSW) entre un alliage d'aluminium et un acier galvanisé. Cette étude consiste à déterminer les propriétés mécaniques des points de soudure à partir des essais de traction uniaxiale à l'aide de la technique de l'émission acoustique (EA) et la technique de la corrélation d'image (CID), essais de micro dureté et une étude macro et micro structurale des joints soudés.

Ce travail est présenté sous forme d'une étude bibliographique (chapitre 1) traitant d'une manière le comportement du soudage par friction malaxage linéaire et par point.

La deuxième partie comprend une étude expérimentale (chapitre 2) qui touche le comportement des assemblages hétérogène soudés par point par friction malaxage. Dans cette partie nous évaluons la résistance du joint soudé et des caractéristiques mécaniques à l'aide des essais de traction monotone en se basant sur deux techniques : l'émission acoustique et la corrélation d'images.

Une troisième partie comprend une étude macro et micro structurale (chapitre 3), Cette partie consiste à étudier les propriétés des joints soudés comme la taille des grains, l'orientation des grains pour différencier les zones qui composent le joint de soudure, afin d'évaluer l'étendue de la microstructure affectée par le procédé. S'appuyant sur des essais de micro dureté et des observations micrographiques à l'aide d'un microscope électronique à balayage « MEB » et la technique de la diffraction des électrons radiodiffusés « EBSD ».

Cette approche purement expérimentale sera appliquée sur un alliage d'aluminium de la famille 6000 (6061 T5) et un acier galvanisé de nuance H300LAD+Z. Ces études vont nous

permettent d'identifier et de quantifier les paramètres opératoires caractéristiques pour réaliser de façon optimale une soudure hétérogène par FSSW.

En fin nous achevons notre travail par une modélisation par la méthode des plans d'expériences (chapitre 4) a fin d'optimiser les paramètres les plus influents sur l'évolution de la température au cours de l'opération de soudage par point par friction malaxage.

CHAPITRE I

BIBLIOGRAPHIE

Partie 1

Etat de l'art sur le procédé de soudage FSW

I.1.GENERALITE SUR LES DEFERENTS TYPES DE SOUDAGE :

Le soudage est défini comme étant une opération consistant à réunir deux ou plusieurs parties constitutives d'un assemblage, de manière à assurer une continuité entre les parties à assembler, soit par chauffage, soit par intervention de pression, soit par l'un et l'autre, avec ou sans emploi d'un produit d'apport dont la température de fusion est du même ordre de grandeur que celle du matériau de base [1].

Les premières pièces soudées sont apparues vers 3000 av JC avec le travail des métaux. Des pièces en bronze sont alors soudées à la poche, puis des pièces en fer sont soudées à la forge. Il faudra attendre la fin du 19ème siècle pour voir l'apparition des procédés de soudage oxyacétylénique, aluminothermique, à l'arc électrique et le soudage par résistance [2].

La mise au point de ces technologies a donné une alternative à l'assemblage mécanique non démontable tel que le rivetage et a permis d'assurer un gain de temps de production. Les procédés de soudage sont aujourd'hui prépondérants en matière d'assemblage et ont une incidence considérable sur le coût de fabrication et la qualité des produits. De ce fait, tout au long du 20ème siècle, de nouvelles technologies de soudage sont apparues répondant aux besoins industriels. Le tableau1 montre une grande variété de procédés de soudage qui a été développée jusqu' à ce jour. Ainsi, selon l'application, il est nécessaire de sélectionner le plus performant en termes de coût et de respect du cahier des charges fonctionnelles.

	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
	1943	Soudage MIG	électrique
1950	1955	Soudage MAG	électrique
	1956	Soudage par faisceaux d'électrons	faisceau à haute énergie
	1956	Soudage par friction rotative	mécanique
	1957	Soudage par explosion	chimique
1960	1965	Soudage Laser	faisceau à haute énergie
1990	1991	Soudage par friction malaxage	mécanique

Tableau 1 : Année d'apparition des principaux procédés de soudage [3].

L'un des derniers procédés mis au point est le soudage par friction-malaxage. Ce procédé, breveté en 1991 par le TWI, est une variante du soudage par friction [3]. Le soudage par friction-malaxage est plus communément appelé Friction Stir Welding, FSW. Contrairement au procédé de soudage par friction « classique », les pièces à assembler n'ont pas de mouvement relatif l'une par rapport à l'autre. Ceci lui offre un plus large choix de configurations de joints soudables. Ce procédé, innovant, permet de souder à l'état « solide », C'est-à-dire sans atteindre la température de fusion. Ceci lui permet, en théorie, de souder tous les métaux, même ceux réputés difficilement soudables par fusion à cause de problèmes de fissurations à chaud, de soufflures, ou d'abatement trop important des propriétés mécaniques.

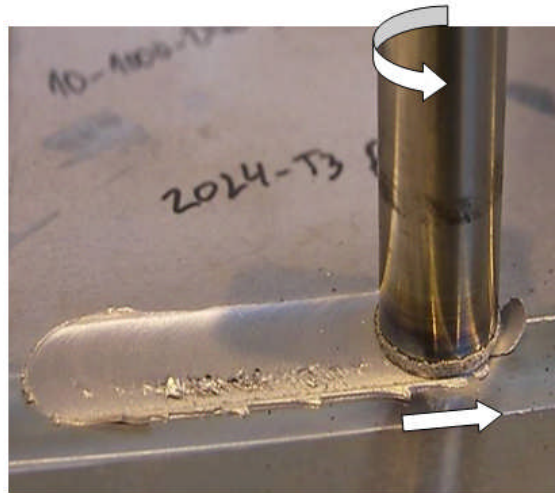
Ses caractéristiques offrent à ce procédé de réels potentiels de développements industriels, surtout pour les métaux malléables à chauds et à bas point de fusion tels que l'aluminium ou le cuivre.

I.2.PRINCIPE GENERAL DU PROCEDE SOUDAGE PAR FRICTION MALAXAGE

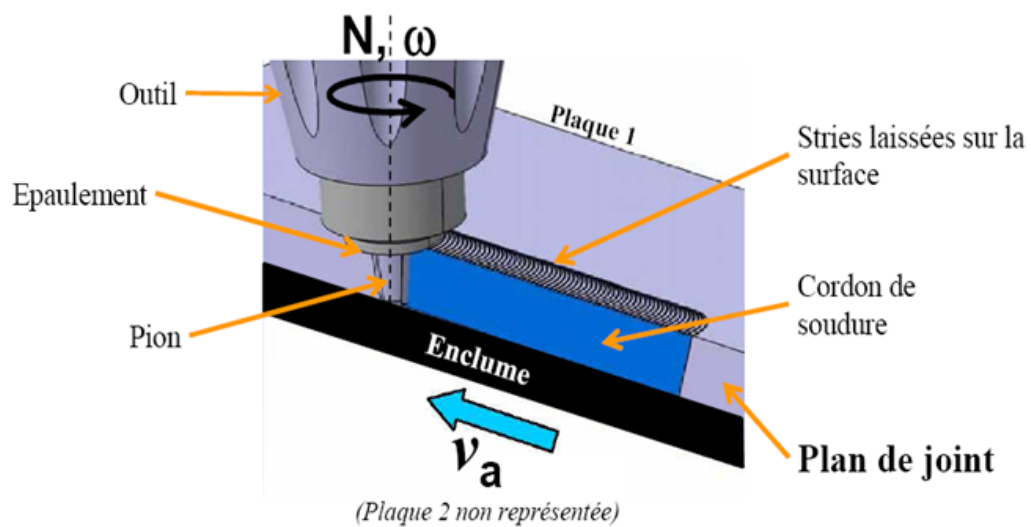
Le principe de ce procédé est de réaliser une soudure de proche en proche en malaxant localement la matière des deux pièces à assembler. La liaison métallurgique est obtenue à chaud, mais en dessous de la température de fusion des matériaux. Comme la plupart de ces procédés (soudage par friction, soudage par explosion...), le FSW a deux avantages essentiels :

- Ne génère pas de soufflure ni de fissure à chaud.
- Permet de réaliser des soudures hétérogènes.

Pour réaliser une opération de soudage par friction-malaxage, les pièces à assembler sont mises en position sans jeu, généralement sur une enclume, et bridées afin d'éviter tout mouvement relatif de celles-ci au cours du soudage. Pour illustrer l'opération de FSW, prenons la configuration la plus simple à savoir le soudage bout à bout de deux tôles présenté par la Figure 1.



(a) Photo de deux pièces soudées bout à bout par le procédé FSW



(b) Visualisation du plan de joint lors de la phase de soudure

Figure 1 : Présentation du soudage par friction malaxage.

Il existe deux types de soudage par friction malaxage : le soudage linéaire (FSW) et le soudage par point (FSSW).

I.2.1. Soudage linéaire (FSW)

Les figures 2.3.4 rappellent les différentes étapes du soudage linéaire par friction malaxage. Lorsque le pion en rotation a complètement pénétré la matière et que l'épaule est en contact avec la surface supérieure des pièces à assembler (étapes 1 et 2), l'outil de soudage est déplacé dans le plan de joint. La soudure est alors réalisée progressivement à mesure que l'outil avance (étape 3). A la fin du soudage, l'outil est retiré du cordon (étape 4), laissant apparaître un trou caractéristique laissé par le pion (étape 5).

I.2.1.A. Phase d'approche et de pénétration :

L'outil, de géométrie plus ou moins complexe, en rotation, pénètre progressivement dans l'interface des pièces à assembler avec une vitesse de descente. IL doit vaincre un couple résistif important. L'élévation progressive de la température, due au frottement du pion, entraîne un ramollissement de la matière qui facilite son insertion dans l'interface. La phase descente s'achève lorsque l'épaule rentre d'une distance définie par rapport à la surface supérieure des pièces.

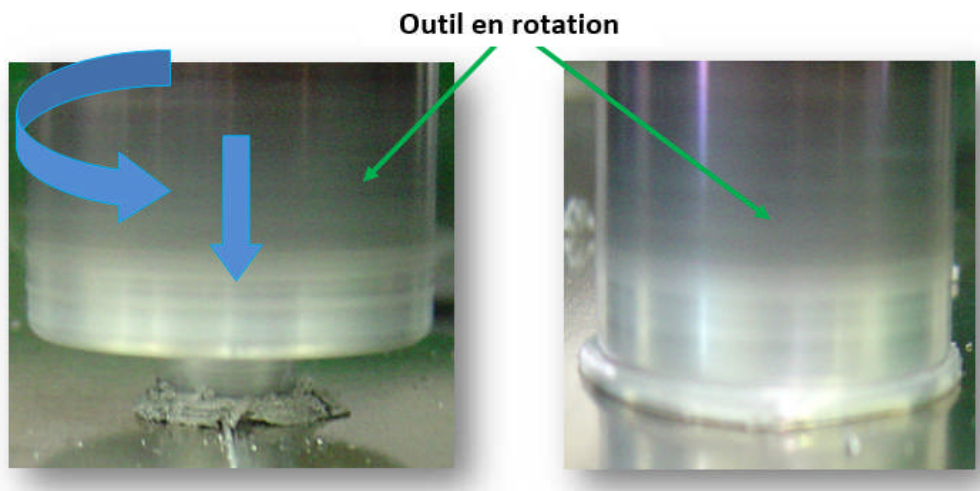


Figure 2: Présentation de la phase de pénétration.

I.2.1.B. Phase de soudage :

Après préchauffage, l'outil en rotation se déplace le long du joint par un mécanisme combiné d'extrusion par le pion et de forgeage par l'épaulement, le cordon est réalisé de proche en proche.

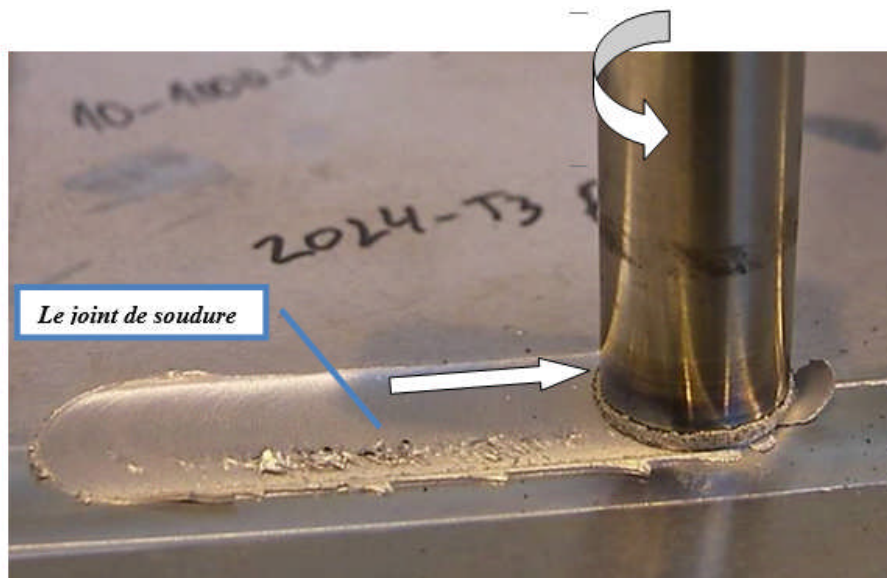


Figure 3 : Présentation de la phase de soudage.

I.2.1.C. Phase de retrait de l'outil :

Une fois le cordon réalisé, l'outil est alors sorti de la matière. Selon le type d'outil utilisé, l'empreinte du pion à l'intérieur de la matière peut être présente au niveau de l'extraction du pion.

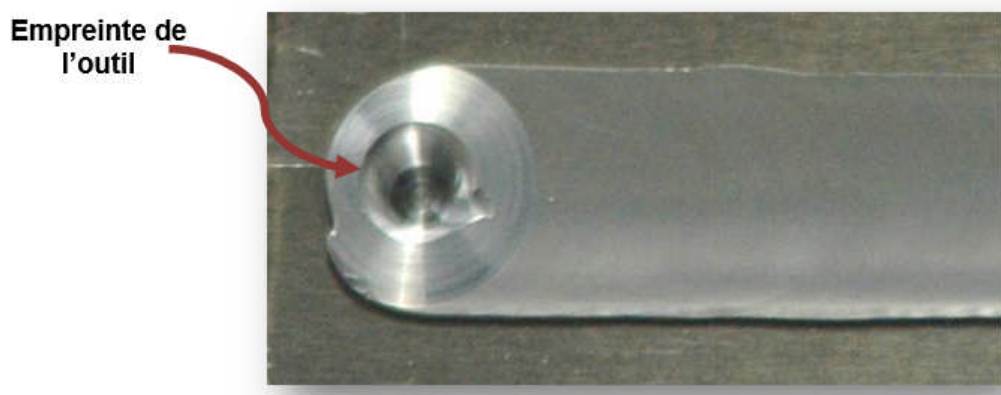


Figure 4 : Présentation de la phase de retrait de l'outil.

I.2.2. Soudage par point par friction malaxage (FSSW)

Le soudage par point par friction malaxage, ou FSSW (Friction Stir Spot Welding presque c'est le même principe que le soudage linéaire par friction malaxage sauf que les deux tôles sont superposées, l'outil de soudage ne se déplace pas longitudinalement, comme le montre le schéma de principe de la figure 5. L'outil en rotation pénètre complètement la tôle supérieure et partiellement la tôle inférieure le pion permet alors un malaxage à l'interface des tôles et assurant la liaison métallique et en phase finale l'outil est rétracté en laissant une empreinte [4].

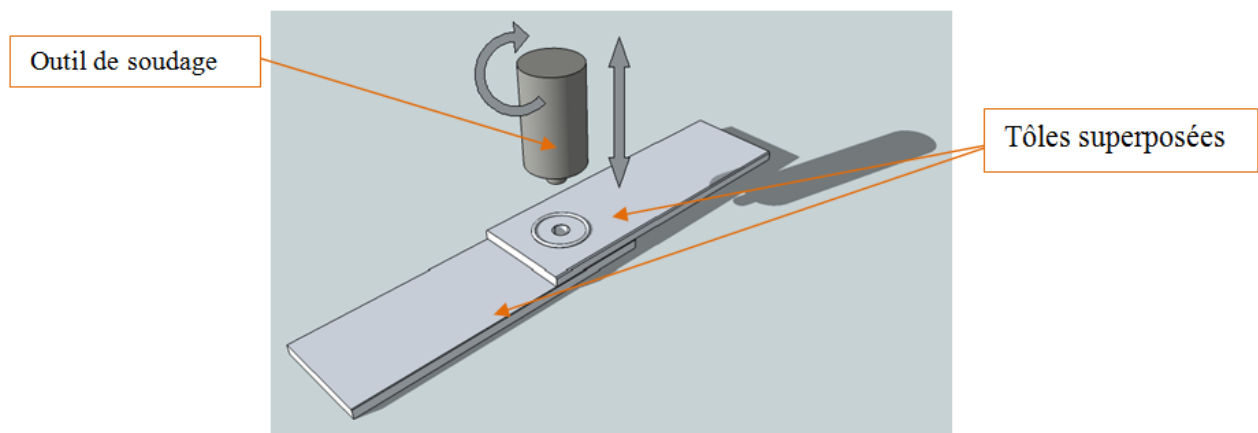
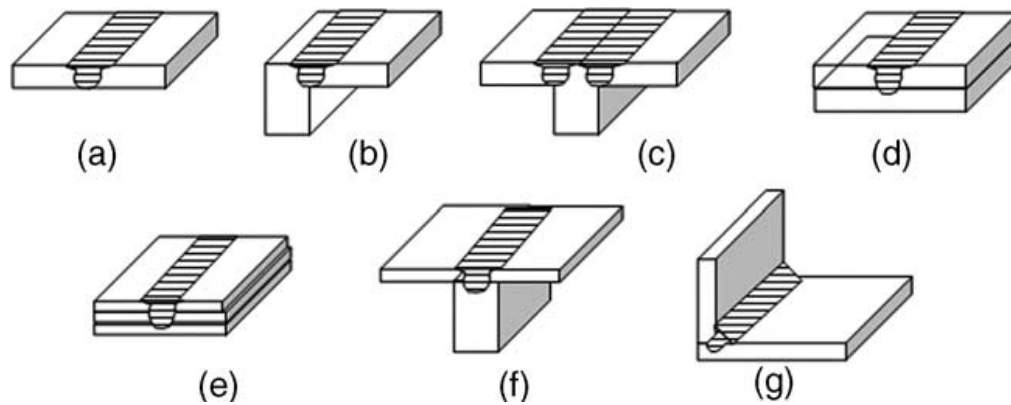


Figure 5: Illustration du procédé (FSSW).

I.3. DIFFÉRENTES POSITIONS DE SOUDAGE (FSW)

Les différentes configurations de soudage FSW nécessitent les points suivants :

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



a) Soudage bout à bout - **b)** et **g)** Soudure en angle - **c)** et **f)** Soudure en T
d) Soudage bout à bout (deux plaques superposées) **e)** Soudage par recouvrement

Figure 6: Configurations de joint de soudure FSW [5-6].

I.3.1.AVANTAGES DU PROCEDE DE SOUDAGE (FSW) :

Le procédé de soudage FSW présente les avantages suivants :

- pas de fusion de la matière (pas de fissuration),
- pas de métal d'apport,
- peu de déformations d'ordre thermique,
- pas de fumée, pas d'arc électrique, pas de gaz de protection, pas de projections,
- pas d'opération post-soudure,
- procédé automatisable,
- reproductibilité du procédé,
- possibilité de soudage hétérogène (matériaux différents)

I.3.2.LES INCONVENIENTS DE (FSW) :

Le procédé de soudage FSW présente les inconvénients suivants :

- installation de taille imposante,
- besoin d'un appui (forces transversales par l'arrière)
- bridage des pièces
- cratères en fin de soudure
- vitesses de soudage plutôt faibles

I.3.3.LES OUTILS DE SOUDAGE

I.3.3.A. Description de l'outil de soudage

L'outil utilisé pour le soudage FSW a une forme enveloppe relativement simple, schématisé sur la Figure 7 et rempli trois fonctions principales :

- chauffer les pièces par frottement et par déformation plastique [8-12].
- malaxer les matériaux pour former le joint.
- contenir le flux de matière sous l'épaulement et autour du pion [11].

L'outil est généralement constitué d'un acier très résistant de façon à supporter des efforts lors du soudage. Les dimensions de l'outil varient suivant son utilisation, mais d'après l'ensemble de la bibliographie, la hauteur du pion est comprise entre 5 et 8 mm ; le rayon de l'épaulement est compris entre 9 et 13 mm et celui du pion entre 3 et 6 mm (il existe un rapport entre ces deux rayons). La hauteur du pion est légèrement inférieure à l'épaisseur des plaques afin de permettre un brassage de la matière sur toute l'épaisseur du joint

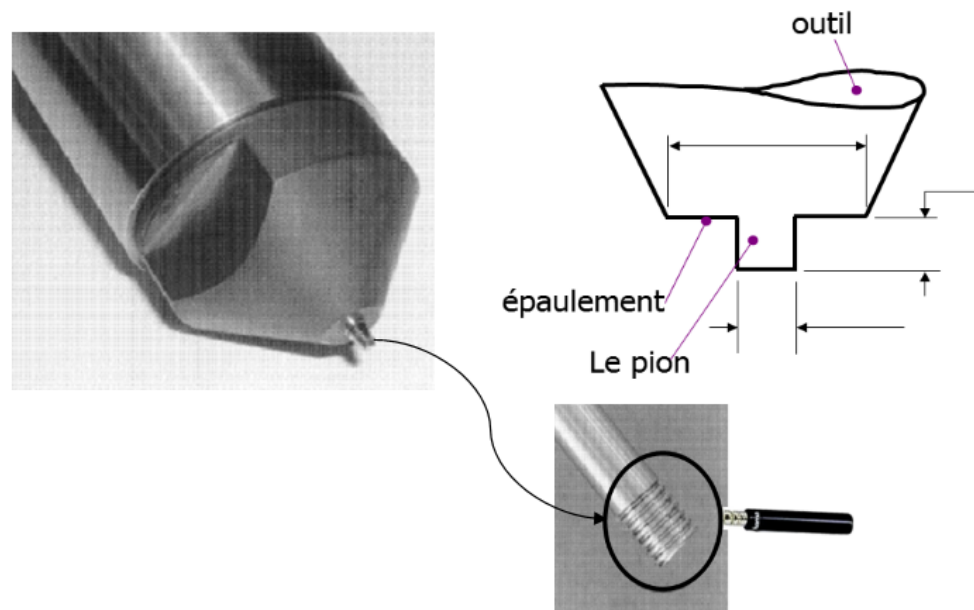


Figure 7:Représentation de la géométrie de l'outil.

Les formes du pion et de l'épaulement ainsi que la présence de filets, de gorges et de rainures conditionnent le flux de matière et la génération de température. [21-14]

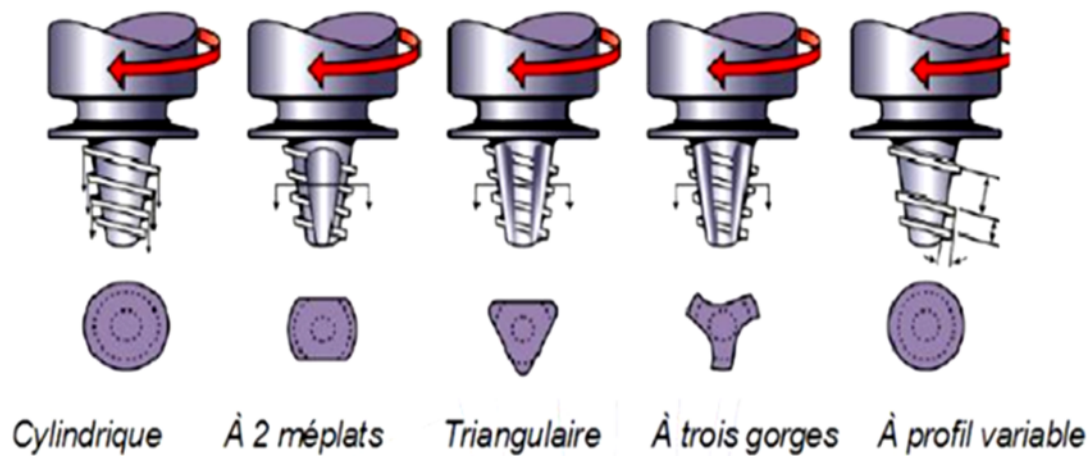


Figure 8: Quelques géométries de l'outil utilisé pour le FSW

I.3.3.B. Matériaux utilisés pour l'outil

Les matériaux utilisés pour les outils sont principalement des aciers résistant à haute température et ayant un bon comportement à l'usure. D'autres critères rentrent en jeu, tels que la résistance à l'usure, la non diffusivité vers le matériau soudé, les capacités à être usiné [15]. Ainsi, le matériau de l'outil sera choisi d'après la nature et l'épaisseur à souder (Tableau 2).

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

Tableau 2 : Synthèse des différents matériaux d'outil couramment utilisés [15].

I.4.PRINCIPAUX PARAMETRES RELATIFS AU PROCEDE FSW

Les principaux paramètres spécifiques au soudage par FSW sont les suivants (Figure 9)

- ✚ la vitesse d'avance de l'outil ou vitesse d'avance V_a ,
- ✚ l'effort axial F_z appliqué sur l'outil suivant son axe de rotation, afin de compenser la pression formée dans la zone de soudure [16],
- ✚ la vitesse de rotation ω ,
- ✚ l'angle d'inclinaison de l'outil dénommé angle de déplacement i .

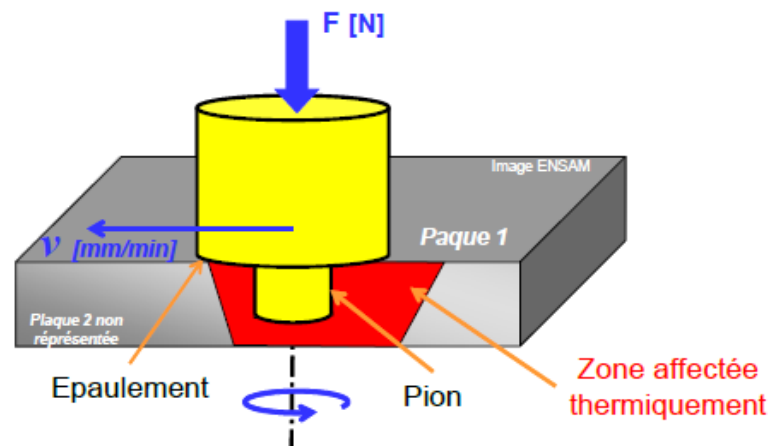


Figure 9: Visualisation des paramètres de soudage

Ces paramètres sont à régler selon les matériaux, l'épaisseur soudée et la géométrie de l'outil. L'ensemble conditionne l'apport d'énergie, le flux de matière, la formation du cordon, les propriétés mécaniques de l'assemblage et les efforts générés [14].

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

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

- ✚ de maintenir l'épaulement en contact avec la surface des pièces afin :
 - d'assurer un apport de chaleur par frottement,
 - de contenir le matériau malaxé sous l'outil et d'assurer ainsi la compacité du joint [17]
- ✚ d'assurer la profondeur de pénétration de l'outil.
- ✚ le contrôle de l'outil en position par rapport à la surface des pièces est défini par une valeur maintenue constante. Ainsi, l'outil suit simplement des coordonnées préprogrammées [18] (Figure 9).

I.4.1. PRESENTATION D'UN CORDON DE SOUDURE

I.4.1.A. Aspect d'un cordon de soudure réalisé par FSW

La figure 10 présente l'aspect extérieur et une coupe transversale d'une soudure réalisée par FSW. Le cordon de soudure se forme entre les deux plaques à assembler sans surépaisseur. Il n'est pas nécessaire d'araser les cordons. De plus, il n'y a pas de formation de couche d'oxyde au cours de l'opération de soudage.

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

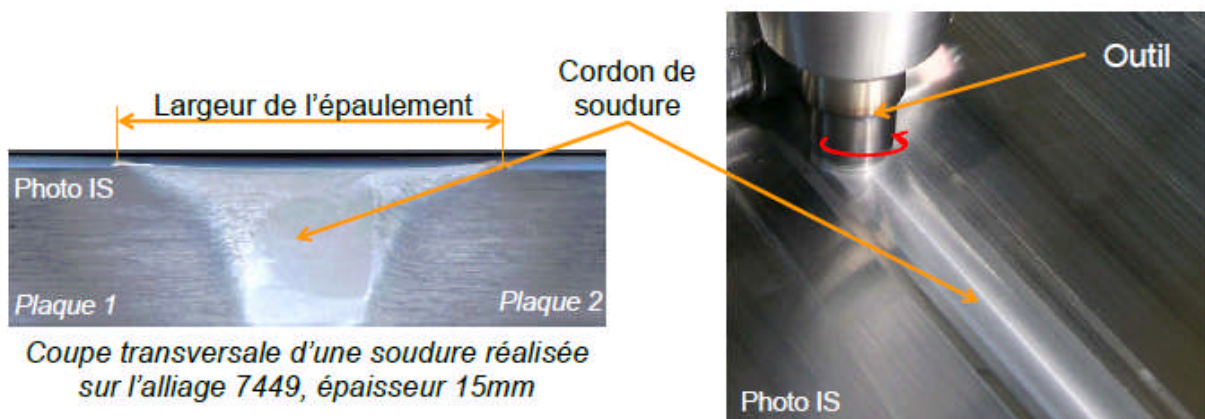


Figure 10: Aspect d'une soudure réalisée par FSW. Soudure bout à bout [4].

I.4.1.B. Côté avance et côté retrait

Le cordon de soudage réalisé est symétrique par rapport à la ligne de joint. Cette asymétrie est due aux différences de vitesse relative entre l'outil et la pièce à souder. Ainsi, selon la position de la pièce et la cinématique de l'outil, on distingue un côté avance et un côté recul. Ces deux paramètres sont définis par la norme ISO/DIS 25239-3:

- côté avance : côté de la soudure où le sens de rotation de l'outil coïncide avec le sens du soudage [19-20]
- côté recul : côté de la soudure où le sens de rotation de l'outil est opposé au sens du soudage

La figure 11 présente le côté avance et recul lors du soudage FSW.

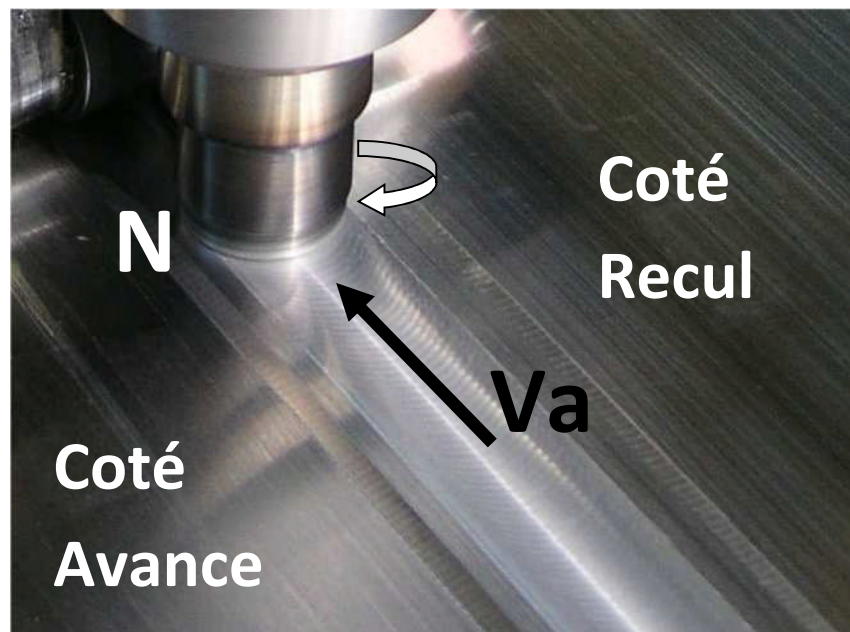


Figure 11: Présentation de la dénomination côté avance et côté recul.

Cette différence de vitesse relative entre l'outil et les pièces à souder engendre une différence dans le flux de matière autour de l'outil. Ceci se retrouve dans l'analyse macrographique des cordons. [6]

La notion de vitesse relative de l'outil par rapport aux pièces se retrouve également en fraisage. En effet, on parle d'une opération de fraisage en avalant ou en opposition correspondant au côté avance ou recul utilisée en FSW.

I.4.1.C. Coupe transversale d'une soudure

Lors des opérations de soudage traditionnel, les températures atteintes dépassent localement les températures de fusion des matériaux. Ce n'est pas le cas pour le FSW ou les températures atteintes sont plus faibles mais néanmoins suffisantes pour modifier la microstructure des matériaux de base au voisinage du cordon de soudure. Ces changements de microstructure, dus également aux déformations plastiques, modifient les propriétés mécaniques (dureté, charge à la rupture, limite d'élasticité, allongement à la rupture) dans les zones affectées par le soudage. La Figure 12 présente les quatre zones caractéristiques d'une soudure FSW observées sur une coupe transversale.

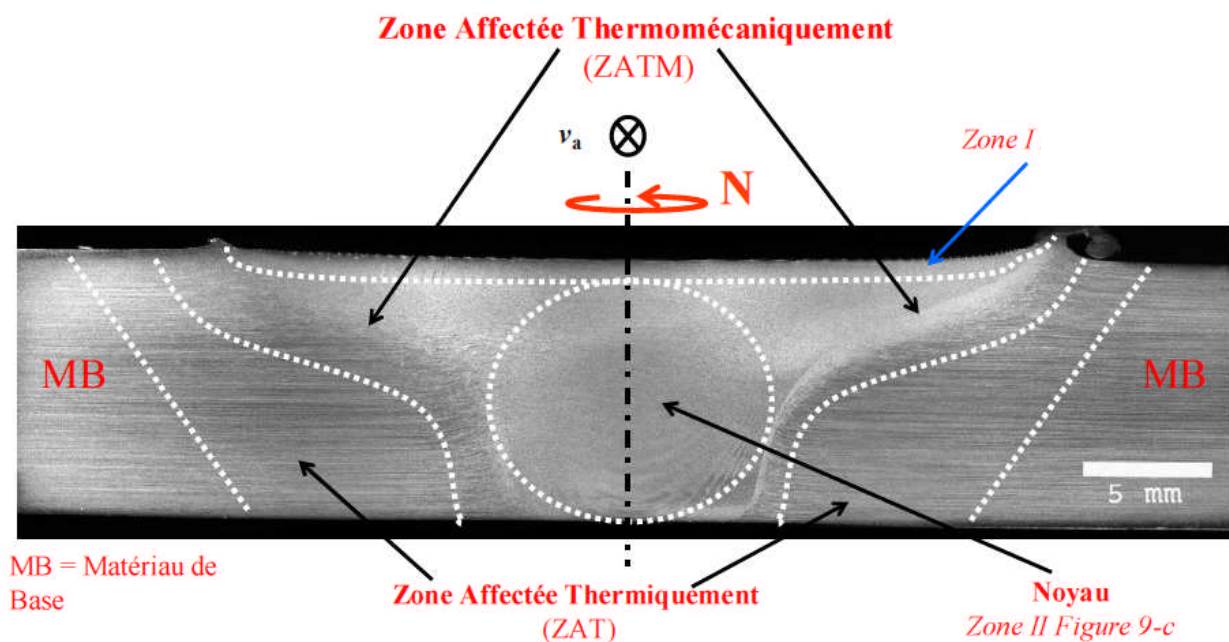


Figure 12: Microstructure de la zone soudée [31].

Le cordon de soudure est composé de 4 zones distinctes :

- Zone A, le noyau de soudure. La matière dans cette zone a subi une déformation plastique importante suite à l'opération de « malaxage ». Les températures les plus élevées sont atteintes dans cette zone.
- Zone B, qualifiée de zone affectée thermo-mécaniquement (ZATM) encadre le noyau de la soudure. Le matériau dans cette zone subit une déformation plastique liée aux mouvements de la matière combinés à l'élévation de température.

-Zone C, correspond à la zone affectée thermiquement (ZAT). La matière n'est plus sujette aux déformations plastiques. Elle est uniquement affectée thermiquement par la conduction de chaleur issue des deux autres zones.

-Zone D, le métal de base dont la microstructure et les propriétés sont inchangées.

I.4.1.D. les défauts générés par le malaxage

Etant donné la particularité de la formation du cordon de soudure par FSW, des défauts spécifiques au procédé vont être identifiés [23].

- ✓ Arbegast a étudié la formation des défauts à travers l'étude du flux de matière [24-26]. D'après lui, les défauts rencontrés en FSW peuvent être classés en deux catégories : les défauts dits « géométriques » et les défauts induits par le flux de matière. Nous allons utiliser cette classification.
- ✓ Les défauts liés au flux de matière sont apparentés à un mauvais malaxage ou à des conditions opératoires thermiquement inadaptées, c.à.d. « trop chaudes » ou « trop froides ».
- ✓ Bavures excessives (« Ribbon flash ») au niveau du bord de la soudure (figure 13). Ce défaut est un excès de métal le long du cordon de soudure [27]. Il provient d'un flux de matière trop important sous l'épaulement entraînant l'expulsion de la matière sur les bords du cordon. Kim et al [25] attribuent ce défaut à une température trop élevée du matériau. Ils précisent que dans ces conditions, l'outil peut entrer en contact avec l'enclume. La présence de ce défaut est généralement corrélée avec un outil qui s'enfonce au sein du cordon de soudure et donc à un amincissement des tôles.



Figure 13: Bavures excessives le long du joint (« Ribbon flash ») [25].

Défaut en surface tel que la formation d'éraillures ou écailles présentées à la Figure 14.

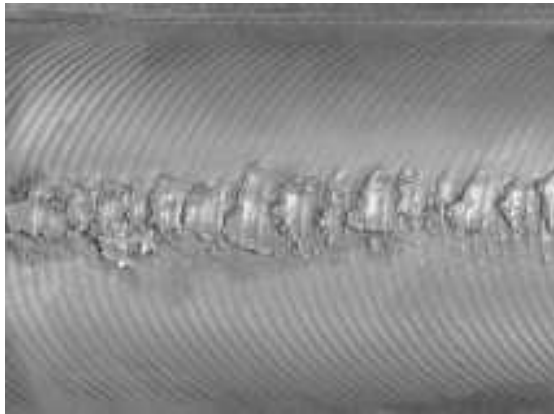


Figure 14: Présence de défauts de surface [29].

- ✓ Effondrement du noyau. Il est dû à un flux de matière excessif sous l'épaulement. Ainsi, un surplus de matière se retrouve au sein du noyau dont une macrographie est présentée à la Figure 15.

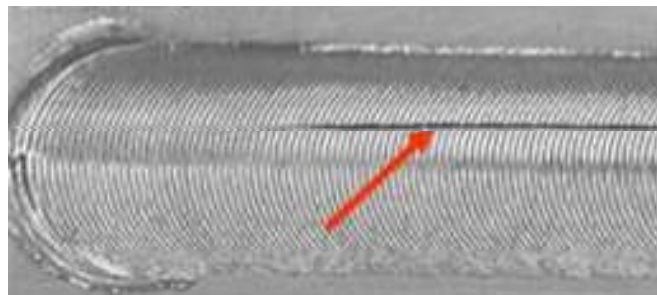


Figure 15: Soudure comportant un défaut de pénétration partielle [30].

I.4.2.PRINCIPAUX DOMAINES D'APPLICATION

Le procédé FSW est principalement utilisé dans l'industrie de la construction et du transport, telle que l'industrie spatiale, aéronautique, ferroviaire, automobile, maritime... Une liste non exhaustive d'applications du procédé dans différentes industries est présentée ci-dessous. De nouvelles applications voient constamment le jour. Le procédé de soudage par friction malaxage est appelé à connaître un développement important dans les prochaines années.

I.4.2.A. Dans le domaine spatial

Les soudures longitudinales et circulaires des réservoirs à oxygène liquide de la fusée Boeing Delta II et IV sont réalisées avec le procédé de soudage par FSW. En août 1999, la fusée

Delta II, possédant des réservoirs soudés par FSW, mettait en orbite 4 satellites de télécommunication.

I.4.2.B. Dans l'industrie aéronautique

Dans ce secteur industriel, le facteur poids est capital. Le procédé de soudage FSW a un avantage considérable en matière de diminution du poids des structures, facteur influençant directement la consommation en carburant des appareils. Le procédé de soudage FSW offre une alternative au rivetage systématique des différents ensembles. De plus, il permet une réduction du temps d'assemblage par rapport au rivetage automatique. Une application a déjà vu le jour en production de pièces de voilure et de fuselage. En effet, la société américaine Eclipse Aviation Corporation a intégré le procédé FSW dans la fabrication d'un jet, l'Eclipse 500, permettant ainsi la suppression de 60% des rivets.

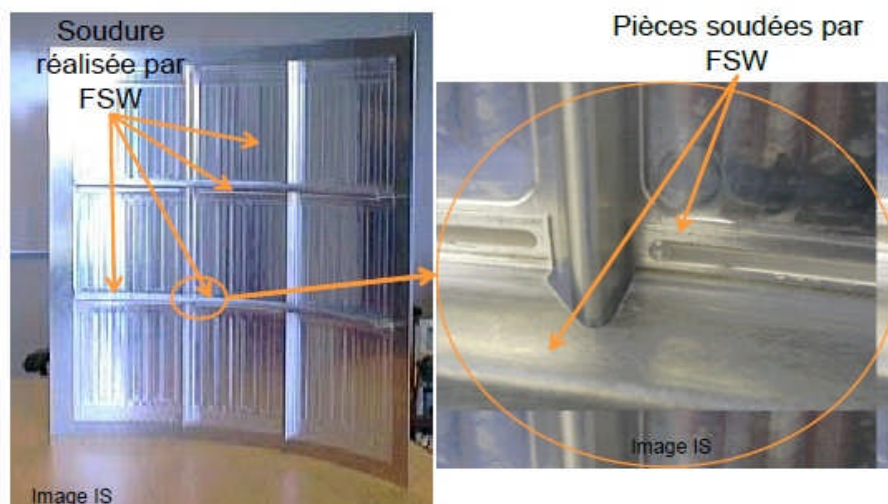


Figure 16: Voilure d'avion soudée par FSW [31].

I.4.2.C. Dans le domaine nucléaire

Des études ont été réalisées en Suède pour le soudage par FSW d'un couvercle de containers en cuivre, destinés à l'enfouissement des déchets hautement radioactifs.

I.4.2.D. Dans le domaine ferroviaire

Les fabricants européens (ALSTOM, SAPS, ...) et japonais (Hitachi) de tramways et de trams utilisent le FSW pour le soudage des profilés d'aluminium extrudés.

Il a été montré lors de crash tests que la tenue des rames soudées par FSW est améliorée.

Les fabricants ont trouvé avec le procédé FSW un moyen de souder des profilés en aluminium longs en limitant les déformations.

Le train, développé et fabriqué par Hitachi représenté sur la figure 17, est composé de profilés d'aluminiums soudés par FSW sur toute la longueur.



Hitachi train Series 20000

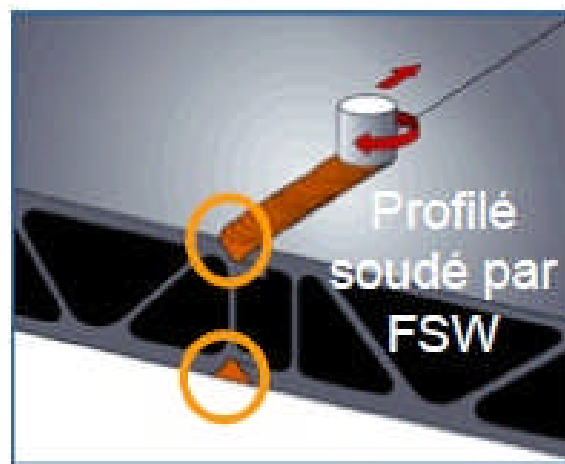


Figure 17: Soudage de profilé du train Hitachi [32].

I.4.2.E. Dans le domaine naval

Parmi d'autres applications, on notera qu'en 1995 Tend setters, une société scandinave d'aluminium extrudé a été la première à appliquer le soudage par malaxage commercialement pour la fabrication de panneaux creux d'aluminium trempé. Ces panneaux ont notamment été utilisés pour la structure de ponts de bateau [33].

De nos jours, les structures légères fabriquées par soudage par friction malaxage ont révolutionné la construction des ferries à grande vitesse, des bateaux de croisières et des hovercrafts (Figure 18et Figure 19).



Figure 18: Panneaux préfabriqués (Hydro Marine Aluminium) destinés au pont du bateau de croisière "The World". [33]



Figure 19: Bateau de croisière "The World" dont le pont est soudé par FSW. [33]

Partie 2

Etat de l'art sur le procédé de soudage FSSW

I.5.INTRODUCTION

Récemment, une nouvelle technique de jointure appelée le soudage par points par friction malaxage (FSSW) ou le soudage par frottement a été développé [34-35]. Le soudage par friction malaxage s'applique pour la jointure des matériaux légers avec une haute performance et facilite la jointure entre deux matériaux différents et qui sont difficiles à souder à cause de la différence de la température de fusion et même les propriétés mécaniques.

Quand FSSW est appliqué à la jointure des composants porteurs, la force des soudures devient critique. Cependant, puisque FSSW est une technologie plutôt développée récemment, l'état optimum de soudure n'a pas été encore établi. Il y a beaucoup de paramètres de traitement dedans le processus de FSSW, ainsi une étude systématique doit être faite afin de comprendre l'effet du paramètre individuel sur la microstructure et les propriétés mécaniques des soudures [35-37].

Dans un rapport précédent [38], certains auteurs ont indiqué les effets de la vitesse de rotation de l'outil et du temps porte-outil sur la force statique des soudages par points par friction malaxage, où la géométrie d'outil était fixe. La géométrie telle que la longueur de pion, la forme et la taille d'épaulement est également un paramètre principal, parce qu'elle affecterait la génération de chaleur et l'écoulement de matière plastique. Quelques études sur l'effet de la géométrie d'outil ont été faites par H Zaho et H Fuji [39-40], mais il y a eu des études très limitées sur FSSW [36].

I.5.1.Soudage par point par friction malaxage (Friction Stir Spot Welding)

- Le soudage par point par friction malaxage, ou FSSW, permet de réaliser des soudures par transparence (tôles superposées). Contrairement au soudage linéaire FSW, le pion ne se déplace pas longitudinalement, comme le montre le schéma de principe de la figure 20. L'outil en rotation pénètre complètement la tôle supérieure et partiellement la tôle inférieure (Phases 1 et 2). Le pion permet alors un malaxage à l'interface des tôles assurant la liaison métallique (Phase 2). En fin de cycle, l'outil est rétracté en laissant une couronne soudée autour de son empreinte (Phase 3).

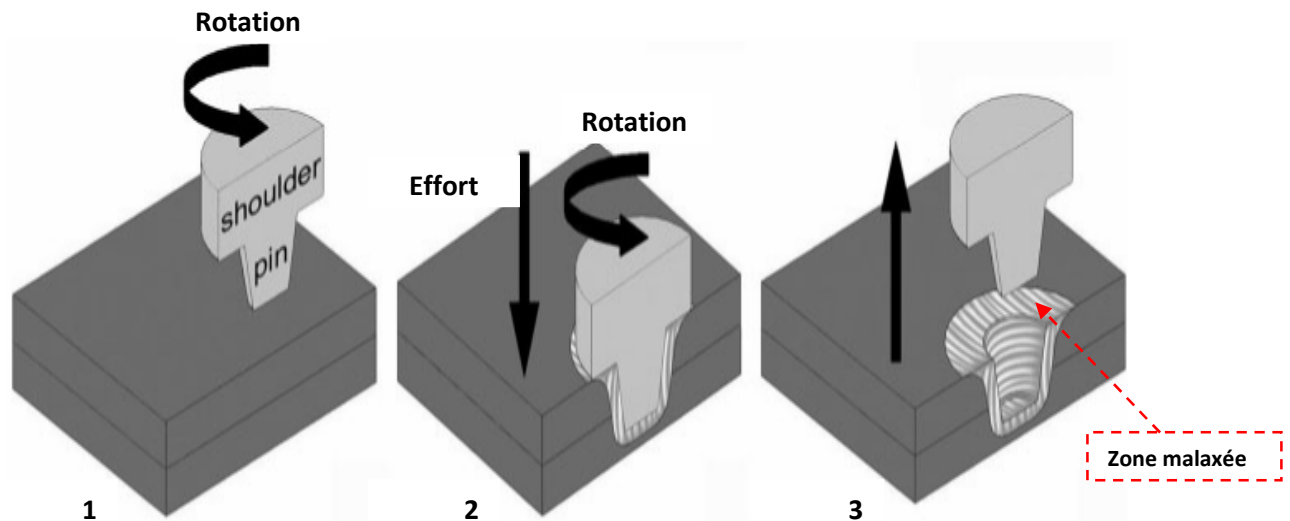


Figure20 : Principe du soudage par point par friction malaxage [42].

- Lors du soudage par point par friction malaxage, une liaison métallique se crée à l'interface des deux tôles. La liaison a une forme d'« oreilles », c'est la zone de malaxage. Cette zone améliore des propriétés mécaniques de 30% par rapport à l'assemblage par rivetage, mais la sortie de l'outil laisse un trou (figure 21).

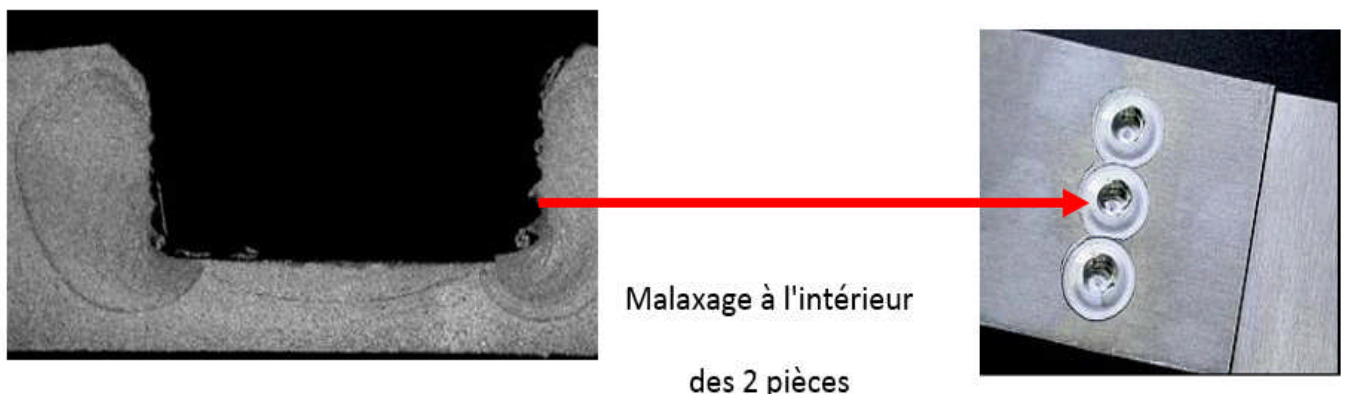


Figure. 21 : Liaison métallique entre 02 pièces (forme d'oreille) [43].

- 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...).

1.5.2. Soudages FSSW homogène et hétérogène

Il est important de différencier deux types de soudage par FSSW :

1.5.2. A. Le soudage homogène

Le soudage par point par friction malaxage (FSSW) semble avoir de l'avenir dans l'industrie automobile, en tant que solution pour le soudage de l'aluminium, et plus généralement en tant que concurrent face au rivet. En effet, il permettrait des temps de cycles de production équivalents à ceux du rivetage, et de surcroît, un gain de coût non négligeable. Ce n'est que depuis peu que le soudage FSSW connaît une application industrielle dans l'automobile : en 2003, Mazda Motors Corporation l'utilise pour la porte de la Mazda RX8 (Figure. 22), et en 2006 pour la MX5. Ils ont alors prouvé la faisabilité industrielle du soudage FSSW concernant le cas de l'aluminium et celui de l'acier. Ils ont également démontré sa rentabilité par rapport au rivet. [44]



Figure 22 : Exemple d'application industrielle sur la MAZDA.

- Mazda reste aujourd'hui la seule entreprise à industrialiser le procédé, mais il est certain que plusieurs constructeurs automobiles, notamment Renault, Nissan et Toyota, s'intéressent au FSSW, et ont d'ores et déjà lancé des recherches axées sur le sujet. Renault, pour sa part, prospecte sur ce sujet depuis 2006[41].

1.5.2. B. Le soudage hétérogène :

Le soudage hétérogène est incontournable dans l'assemblage de carrosseries de voitures, et particulièrement le soudage entre aluminium et acier. En effet, certaines parties, telles que les pièces de structure, nécessitent l'utilisation de l'acier pour sa résistance. D'autres parties comme les pièces de peau n'ont pas besoin de telles performances mécaniques. Il est alors intéressant d'utiliser pour ces pièces, des alliages d'aluminium plus légers. La technique utilisée jusqu'à présent pour assembler ces deux matériaux est le rivetage. Mais le soudage FSSW semble être adéquat pour réaliser l'assemblage hétérogène, grâce aux températures qui restent faibles.

- Les propriétés de l'aluminium et du fer sont différentes (Tableau. 1). Les grandes différences de coefficient de dilatation thermique et de module d'élasticité peuvent engendrer des tensions thermiques élevées, pouvant causer des contraintes internes importantes. Il peut aussi être remarqué qu'il existe un écart important entre leur potentiel standard électrochimique qui peut provoquer un problème de corrosion avec le milieu environnant au détriment de l'aluminium.
- L'assemblage entre l'aluminium et acier par FSSW est contraignant en ce qui concerne l'ordre de superposition des tôles. L'aluminium doit donc être obligatoirement positionné sur l'acier à cause des différences de températures de fusion de ces matériaux. La température est plus importante au niveau du pion qu'au niveau de l'épaule. De plus, l'acier possède une dureté plus importante que l'aluminium. Ainsi, en positionnant l'acier sur l'aluminium, une usure rapide de l'outil serait observée, car le pion pénétrerait entièrement dans la tôle d'acier.
- Enfin, lors de l'assemblage de l'aluminium et de l'acier, il est possible que des composés intermétalliques se forment. Les intermétalliques sont connus pour leur importante micro dureté, dépassant pour certains des valeurs de 1000 HV. Si elles se forment, ces zones intermétalliques dures et donc fragiles peuvent alors avoir un impact néfaste sur les propriétés mécaniques de l'assemblage, ces zones peuvent présenter de nombreuses fissures, ce qui peut devenir notamment problématique pour la tenue mécanique statique et dynamique. [45-46].

Elément	Densité	Potentiel standard (V)	Température de fusion (°C)	Coefficient de dilatation thermique (1/K)	Module d'élasticité (GPa)	Résistance à la traction (MPa)	Microdureté (HV)	Capacité thermique massique (J.kg ⁻¹ .K ⁻¹)
Fer	7,85	-0,447	1536	12,3.10 ⁻⁴	210	270-410	120	444
Aluminium	2,7	-1,662	660	23,8.10 ⁻⁴	71	80	70	897

Tableau 3 : Propriétés physiques du Fer et de l'Aluminium [43].

I.5.2. Le cycle de soudage FSSW :

I.5.2.A. Descriptions du cycle

La figure 4 illustre le déroulement d'un cycle FSSW. Pendant la totalité du cycle, la vitesse de rotation de l'outil reste constante, tandis que l'effort axial met un certain temps avant d'atteindre sa valeur seuil. En effet, après la mise en rotation de l'outil, le pion est contrôlé par une force croissante afin de pouvoir pénétrer les tôles. Jusqu'à ce que l'épaule soit parfaitement en contact avec la surface des pièces c'est la phase 1 (figure 23-a). Cet effort de soudage est ensuite maintenu constant à la valeur prédéterminée phase 2 (figure 23-b), jusqu'au retrait de l'outil phase 3 (figure 23-c). En réalité, il est difficile d'obtenir un effort constant.

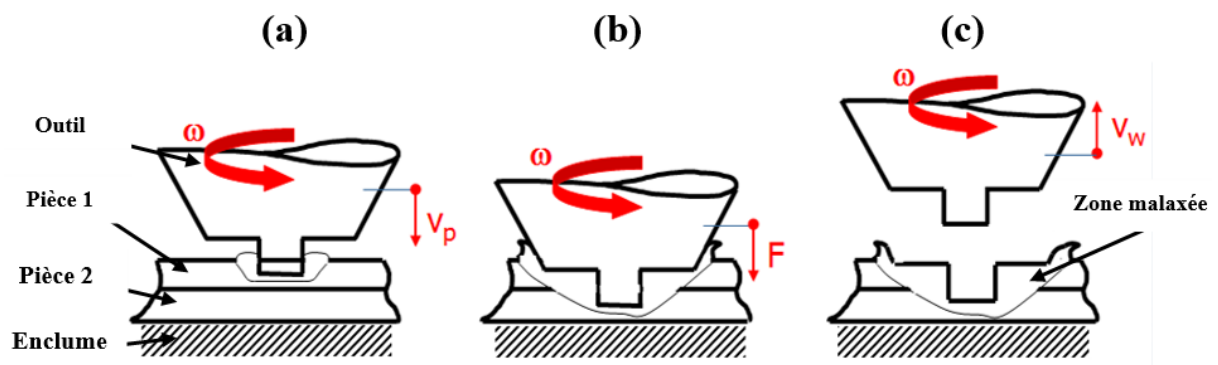


Figure 23 : Description du cycle de soudage par point par friction malaxage [47].

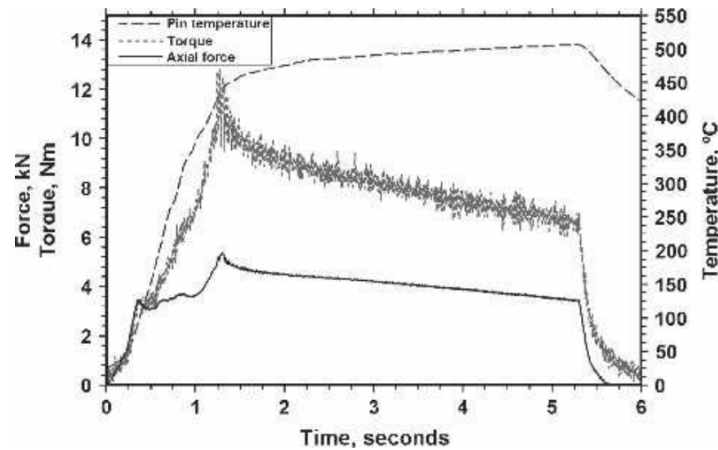


Figure 24 : Courbe de l'effort axial et du couple [56].

- En ce qui concerne le couple, pendant environ un cinquième du cycle de pénétration, il augmente progressivement pour atteindre un pic (Figure. 24). Puis, il diminue lentement pendant le reste du cycle. Il peut également être remarqué que la courbe du couple présente des oscillations continues pendant le soudage, qui peut être dues à une fusion locale qui sera expliquée par la suite.

I.5.2.B. Couple et énergie

La vitesse de rotation et la génération d'énergie jouent un rôle important dans la performance mécanique des points de soudure. En supposant que toute l'énergie mécanique induite pendant le soudage se transforme en une énergie thermique, elle peut suivre l'équation (1) suivante [48-49] :

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

- $Q_{\text{appliqué}}$: l'énergie thermique résultant du procédé FSSW (Joule),
- Force : la force maximale appliquée par l'outil durant sa descente verticale (N),
- x : la pénétration de l'outil (mm), Couple : le couple associé à la rotation de l'outil
- ω : la vitesse de rotation (Tr/s).

Le terme associé à la rotation de l'outil est environ 200 fois plus important que celui représentant la descente verticale de l'outil [53]. Ainsi, l'équation de l'énergie peut se résumer approximativement à l'énergie générée par la rotation de l'outil.

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

Le résultat indique alors que, l'énergie appliquée lors du soudage par point peut augmenter avec la vitesse de rotation. Toutefois, les travaux de Su. [53] ont montré que l'augmentation de la vitesse de rotation entraîne une réduction du couple. Ceci s'explique par une réduction de la viscosité de la matière.

De cette manière, il peut être supposé [50] que le terme « *Couple (n) ω (n)* » de l'équation (2) varie peu, et donc il peut être conclu que la principale variable qui affecte la génération d'énergie est le temps de soudage.

I.5.2.C. Les champs thermiques

Quelques études sur les températures atteintes durant le procédé FSSW ont été menées, notamment grâce à des mesures par thermocouple dans les tôles et dans l'outil [51-52-53]. Les mesures à la surface du pion (Figure 25) montrent que les températures augmentent jusqu'à une certaine valeur pour ensuite se stabiliser pour le reste du cycle de soudage. En ce qui concerne les températures dans les tôles (Figure 26), l'évolution est identique, seules les valeurs diffèrent. En comparant les températures à isoparamètres (2250 tr/min) (Figure 7a et 8), il peut être remarqué que dans les tôles, à 1,2 mm en s'éloignant latéralement du pion, les valeurs sont inférieures à celles mesurées à la surface du pion. Toutefois, à la fin du cycle, les températures deviennent pratiquement équivalentes. Ceci signifie qu'au début du cycle, les températures élevées sont localisées à la surface du pion. Puis, à la fin du cycle, la forte chaleur se généralise dans une zone en périphérie du pion.

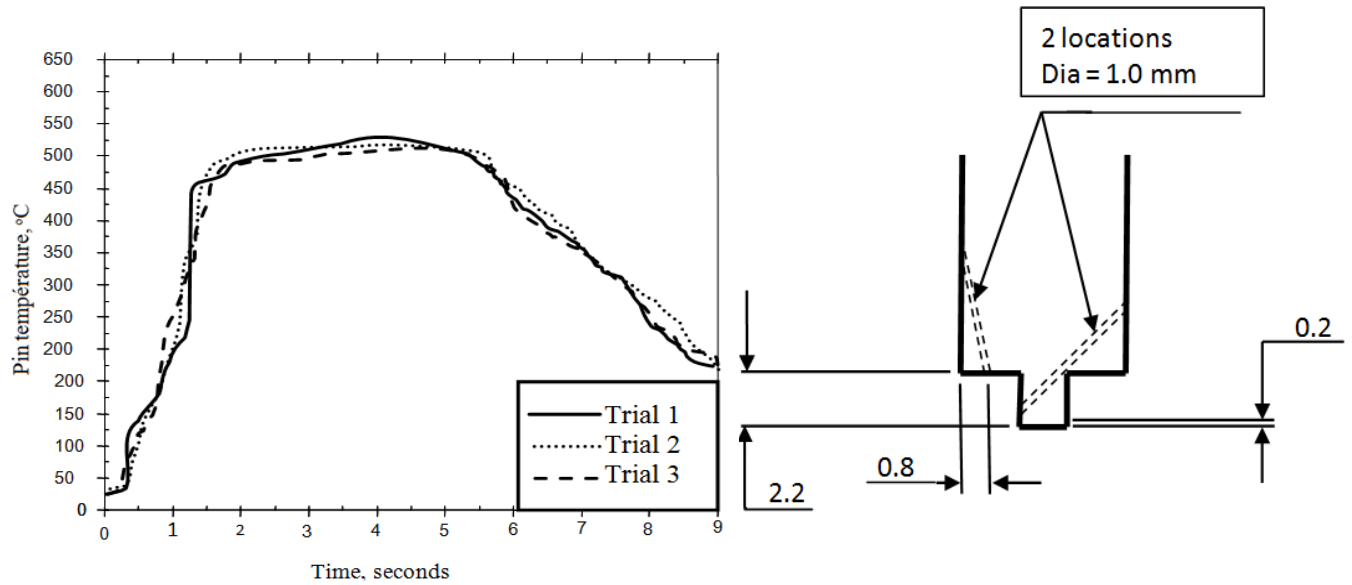


Figure. 25 : Mesures de températures à la surface du pion pour des essais FSSW de l'alliage d'aluminium 7075 (1,5 mm / 1,5 mm) à isoparamètres (2250 tr/min, 5,2 s) (a) Courbes en fonction du temps, (b) Emplacement des thermocouples dans l'outil [53].

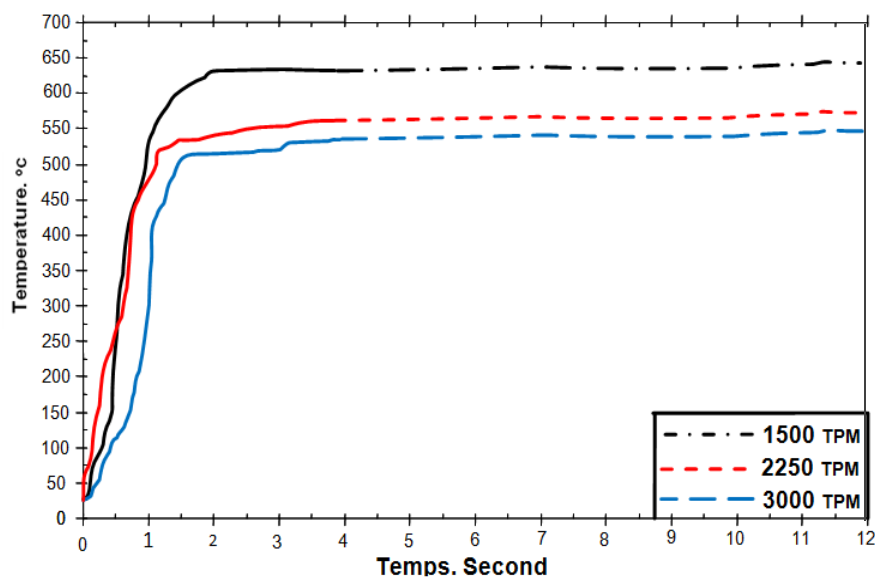


Figure 26 : Evolution de la température en fonction du temps de cycle dans la tôle supérieure à 1,2 mm du pion pour des essais FSSW [54].

Il est difficile d'obtenir des informations sur les températures atteintes dans les tôles au niveau de la matière malaxée, c'est-à-dire proche de l'outil. Les thermocouples sont alors déplacés à cause du flux de matière engendré par la descente et la rotation du pion. Le seul moyen d'estimer les champs thermiques obtenus pendant le procédé FSSW est d'utiliser la simulation numérique (Figure 27). Les températures les plus importantes sont concentrées

autour du pion et sous l'épaulement. Puis, en s'éloignant de l'outil, les températures diminuent progressivement, jusqu'à retomber à la température ambiante. La courbe de la température en fonction de la position (Figure 28) permet de détailler davantage les champs thermiques. Au temps de calcul donné ($t=1,235$ s), la température est maximale non pas au niveau du pion, mais à 3 mm de celui-ci.

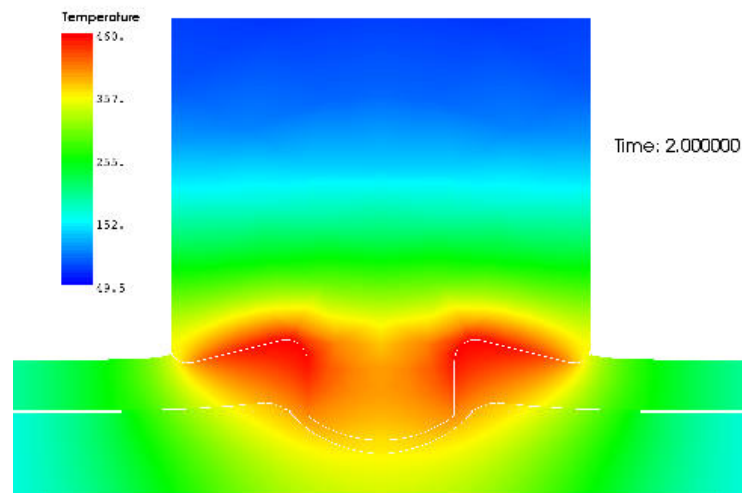


Figure 27 : Champs de températures à $t=1,235$ s lors de la simulation ABAQUS du FSSW de l'alliage d'aluminium 6061 [54].

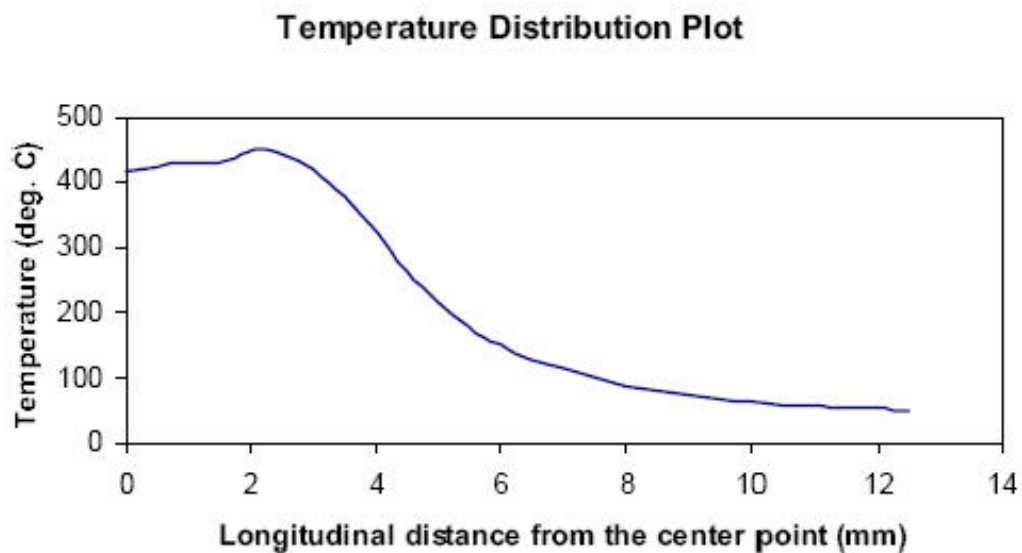


Figure 28 : Evolution de la température en fonction de la distance latérale à partir du bord du pion [54].

I.5.2.D. l'influence de la géométrie de l'outil sur le FSSW

La géométrie de l'outil par ses formes et les diamètres de l'épaulement et du pion ainsi que la présence de filets et de méplats influencent directement le flux de matière [57-58]. Par conséquent, ils impactent les actions mécaniques appliquées sur l'outil. L'auteur a étudié l'influence de la géométrie d'outil sur la microstructure et de la force statique dans des soudages par points par friction malaxage des tôles en alliage d'aluminium, 6061 T-4. La (figure 29) donne une illustration schématique de l'outil avec différentes longueurs de pion (3.7, 3.1 et 2.4mm) et un diamètre d'épaulement de 10 mm.

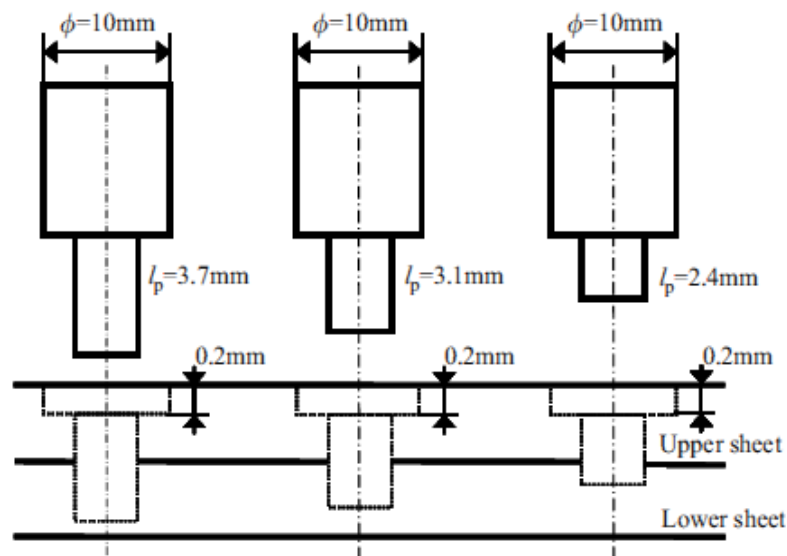


Figure 29 : La géométrie des outils utilisés [59].

L'auteur [59] a trouvé que La résistance à la traction a été augmentée avec l'augmentation de la longueur de pion, alors que la force de pénétration n'était pas affectée sensiblement par longueur de pion. Cette dépendance de force statique à l'égard de la longueur de pion a été bien réalisée en termes d'épaisseur de la feuille supérieure sous la pression de l'épaulement et la longueur de pion.

I.5.2.E. Forme d'épaulement de l'outil

Y. Tozaki et al [60] ont proposés un outil développé sans pion, mais avec un épaulement avec cannelure. Au moyen de cet outil, Le soudage par point par friction malaxage FSSW a été réalisé sur des feuilles d'alliage d'aluminium.

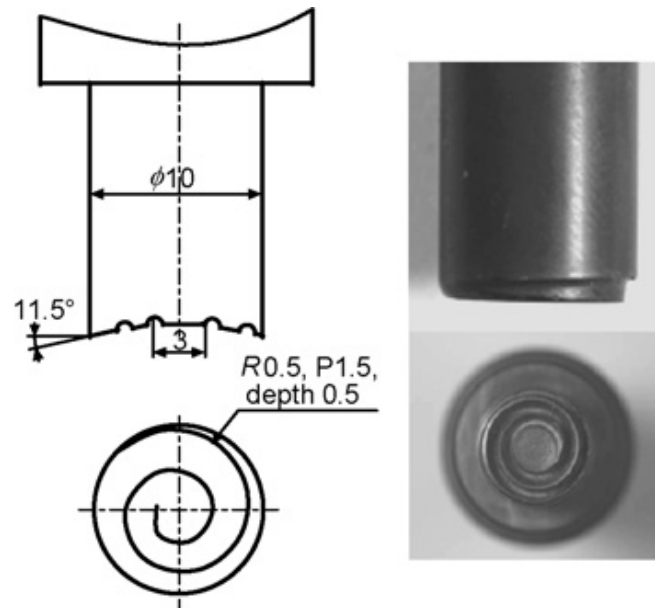


Figure 30 : Configuration et photographie d'outil développé récemment [60].

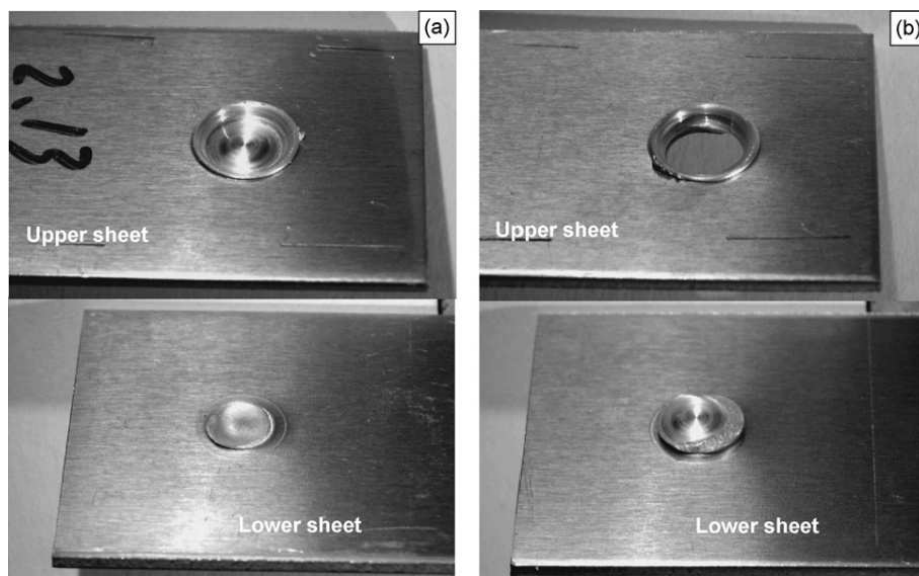


Figure 31 : Deux modes de rupture observés sous de traction-cisailent :(a) rupture (b) déboutonage [60].

Les observations expérimentales ont prouvé que l'outil sans pion a eu l'exécution comparable ou supérieure à un outil avec pion conventionnel. On l'a confirmé que la soudure pourrait être réalisée sans trou l'essai par le pion, en lequel la cannelure de l'épaulement a joué des rôles significatifs dans l'agitation du matériel et la profondeur d'épaulement était la variable de traitement importante.

- H. Badarinarayan et autres [61] ont réalisé des soudures pour comparer l'effet de trois profils d'épaulement : concave, convexe et plat (tous ayant des pions cylindrique filetées) sur la géométrie de crochet et la résistance a la traction-cisaillement pour déterminer la géométrie idéale du pion parmi ces trois profils considérés.



Figure 32 : outils avec pion cylindriques ayant (i) concave, (ii) plate et (iii) convexe [61].

Les épaulements concaves et convexes sont à angles à 10°. Le pion est fileté avec un diamètre de 5 millimètres (M5). La profondeur de plongeon d'épaulement était fixe à 0.2 millimètre.

La profondeur de plongeon d'épaulement est indirectement mesurée en soustrayant la longueur de pion de toute la profondeur de l'outil. Le profil concave produit la plus haute résistance a la traction par rapport au d'autres soudures.

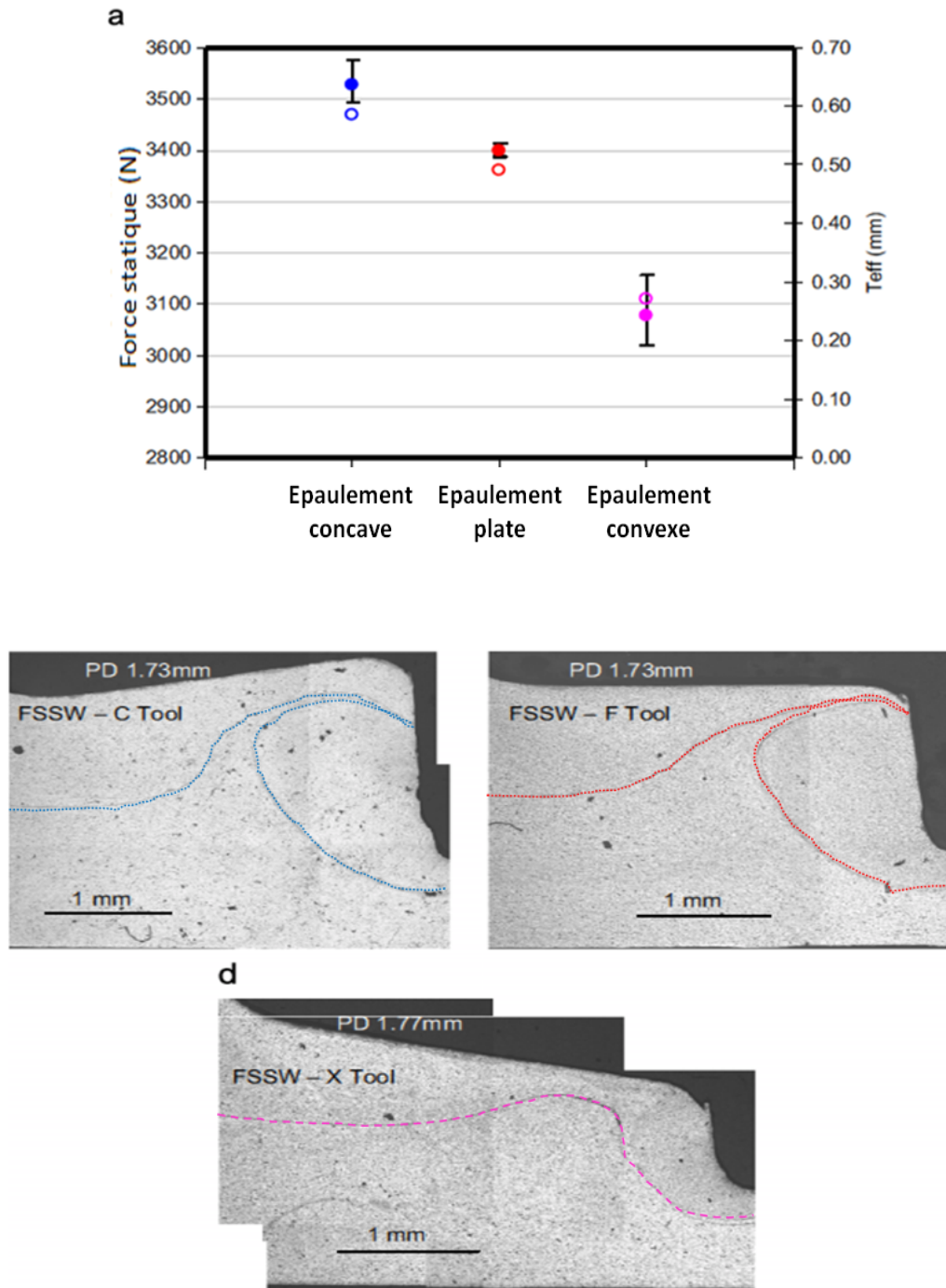


Figure 33 : compare la force statique et la macro section des soudures faites aux 3 profils différents d'épaulement : b) concave, c) convexe et d) plat souder sous les mêmes conditions de traitement [61].

Quand ils ont comparé les différents épaulements d'outil, les soudures faites avec l'outil d'épaulements **concave** ont rapporté une plus haute résistance statique que des outils d'épaulement **convexe** et **plate** à la profondeur semblable de plongeon. La différence dans la grandeur de la force est environ 15%.

I.5.2.F.L'influence de la Forme du pion

H. Badarinarayan avec d'autres chercheurs [61] ont réalisé des soudures avec deux profils différents de pion cylindrique et triangulaire et avec un épaulement concave.

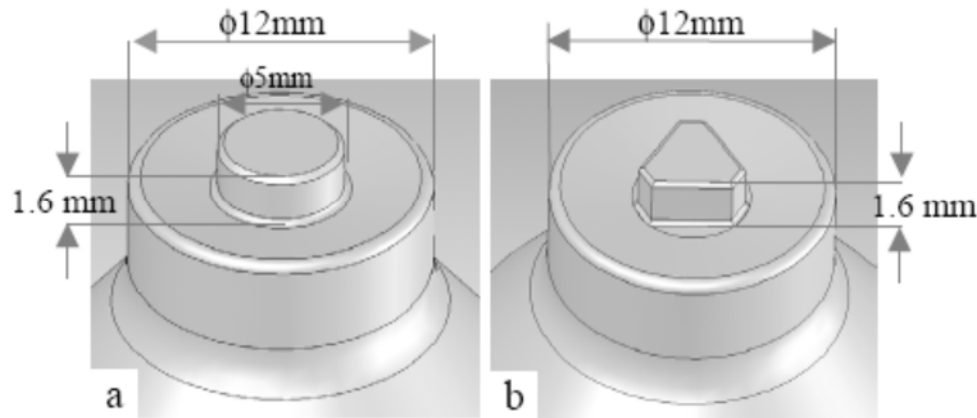


Figure 34 : la goupille cylindrique (longueur de goupille de 1.6 millimètre et fils M5) et (v) la goupille triangulaire (longueur de goupille de 1.6 millimètre, aucuns fils) [61].

Dans les mêmes conditions de traitement, les soudures faites avec le pion cylindrique ont une accroche continu qui dévie dans la zone de malaxage et se termine près de la zone de transission. En revanche, parce que des soudures faites avec la goupille triangulaire, le crochet est dirigé vers le haut et alors arrêté à la périphérie de la zone de malaxage. La différence dans la forme de crochet peut être attribuée à l'écoulement de la matière. L'étude antérieure montre que la charge statique de la force des soudures faites avec le pion triangulaire est deux fois celles des soudures faites avec le pion cylindrique.

I.5.2.G.L'influence des conditions de soudage dans le FSSW

Trois paramètres importants sont à contrôler, la vitesse de rotation, la force appliquée selon l'axe z sur l'outil et la vitesse de soudure. Leurs valeurs optimales varient selon l'alliage et les capacités de la machine.

- Plusieurs auteur [63] sont optimisé ces paramètres. Pour une étude faite lors du soudage par points par friction malaxage (FSSW) de l'alliage d'aluminium 6061-T6, pour des éprouvettes de longueur 101.6mm, de largeur 25.4 mm et d'épaisseur 1.27mm.

- La vitesse de rotation de l'outil s'est étendue de 2000 à 4000 tr/mn, La vitesse de soudure s'est étalée de 15 à 40 mm/min. Le tableau 4 énumère les paramètres de soudure utilisés.

Code de capteur de température	Vitesse de plongée de soudage (mm/min)	Vitesse de rotation de l'outil (Tr/min)
1	45	2000
2	56.4	2000
3	66.4	2000
4	67.4	2000
5	68.8	2000
6	45	3000
7	56.4	3000
8	66.4	3000
9	67.4	3000
10	68.8	3000
11	45	4000
12	56.4	4000
13	66.4	4000
14	67.4	4000
15	68.8	4000

Tableau 4: Paramètres de soudure de FSSW [62].

L'influence de la vitesse de rotation était également étudiée ; vitesses de 800, de 1200, de 1600 et 2000 t/mn [63]. Chaque vitesse a été examinée en combinaison avec de nombreuses profondeurs de pion.

- Pour une étude faite par M. Merzoug [43] lors du soudage par points par friction malaxage (FSSW) de l'alliage d'aluminium 6060-T5 avec un outil tournant à diverses vitesses de rotation et de plongée pour la détermination de certains paramètres optimaux .

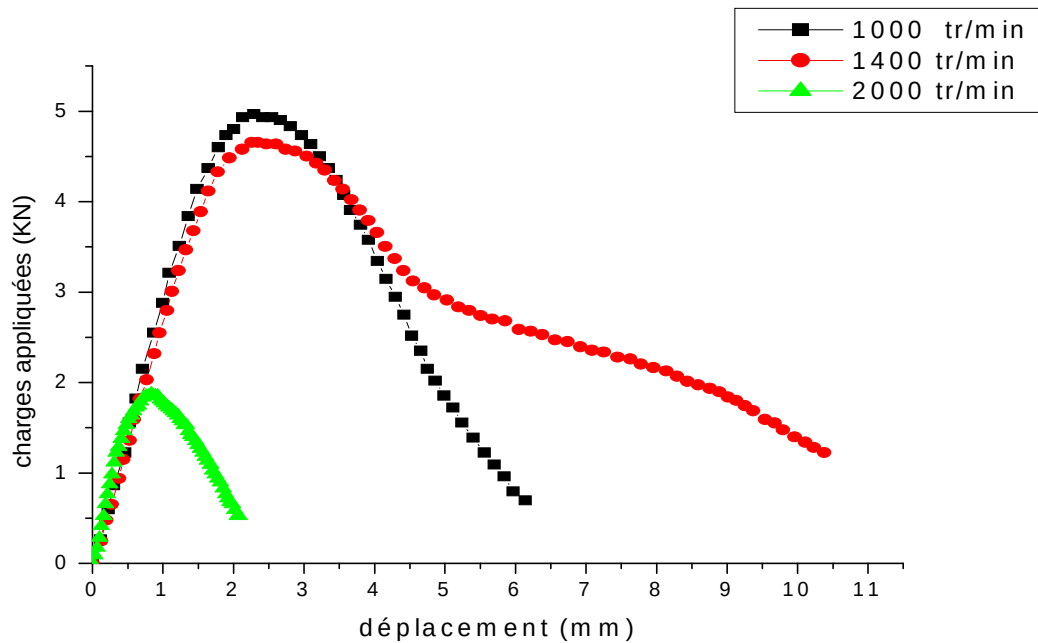
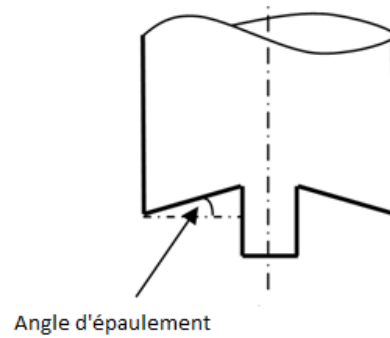


Figure35: Courbe typique charge – déplacement (assemblage avec 1 point)[43].

- La figure 35 montre une courbe typique charge-déplacement d'une soudure par point par friction malaxage. Les observations expérimentales ont prouvé que les paramètres $V_a = 16$ mm/mn et $N = 1000$ tr/mn donnent la meilleure résistance à la traction. La plus faible est obtenue pour $V_a = 25$ mm/min et $N = 2000$ t/mn.

I.5.2.G.1.Cas des alliages d'aluminium 6xxx

La série 6xxx présente une bonne soudabilité en FSSW, puisque les points de soudure obtenus offrent généralement des tenues mécaniques dépassant la tenue des rivets. La résistance mécanique semble reposer sur la géométrie de l'outil de soudage. Selon les études menées, la forme du pion change, avec ou sans filetage (Tableau5). Les diamètres d'épaulement et de pion varient également, et avec un angle d'inclinaison de l'épaulement plus ou moins important.



Référence	Forme de pion	Diamètre de pion mm	Longueur de pion mm	Filetage	Diamètre d'épaulement mm	Angle d'épaulement	Matière
Ford	cylindrique	4.0	1.6	?	10	0°	AcierH13
Ford	Cylindrique	2.5	1.3	oui	10	14°	?
Université Taiwan	Cylindrique	Base : 5.0	1.5	non	12	0°	granite
C siro	Cylindrique	4.0	2.6	non	10	18°	acierH13
Université Gifu	cylindrique	3.5	2.4 ;3.1Et 3.7	oui	10	14°	acier

Tableau 5 : Dimensionnement des différents outils utilisés pour la série 6xxx [68-69-71-72].

➤ Y. Tozaki et autres [59]a notamment consisté à étudier l'influence de la longueur de pion sur la tenue mécanique en traction-cisaillement, en gardant fixe la pénétration de l'épaulement dans la tôle supérieure . Les essais ont été réalisés à différents temps de maintien et à différentes vitesses de rotation sur des tôles épaisses de 2 mm d'alliage Al 6061 (Figure 36).

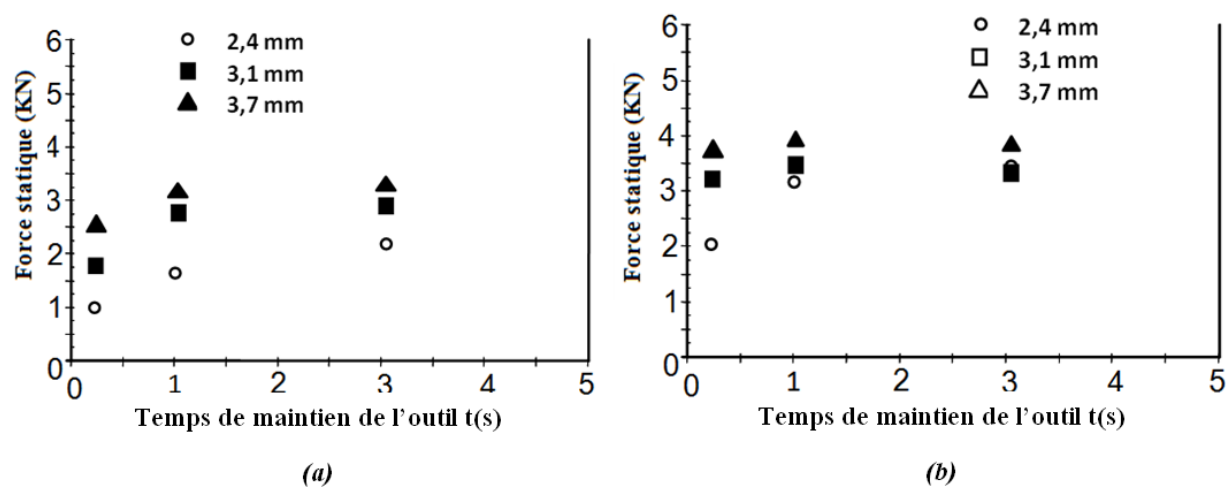


Figure36 : Courbes de tenue en traction – cisaillement en fonction du temps de maintien pour (a) 2000 tr/min et (b) 3000 tr/min [64].

- En plus de la géométrie d'outil, la résistance mécanique est directement liée aux paramètres de soudage appliqués, à savoir la vitesse de rotation, le temps et l'effort de soudage, ainsi que la vitesse de plongée. Par exemple, les essais indiqués sur la figure 18 montrent qu'une augmentation du temps de maintien ou de la vitesse de rotation entraîne une meilleure résistance mécanique en traction-cisaillement [59]. De même, pour des soudures de tôles d'alliage 6060-T5 de 1,7 mm d'épaisseur, la vitesse de rotation et le temps jouent un rôle primordial (Figure 37) [65]. En augmentant le temps de soudage, la tenue mécanique est améliorée, mais aux grandes vitesses de rotation, cet effet se ressent moins

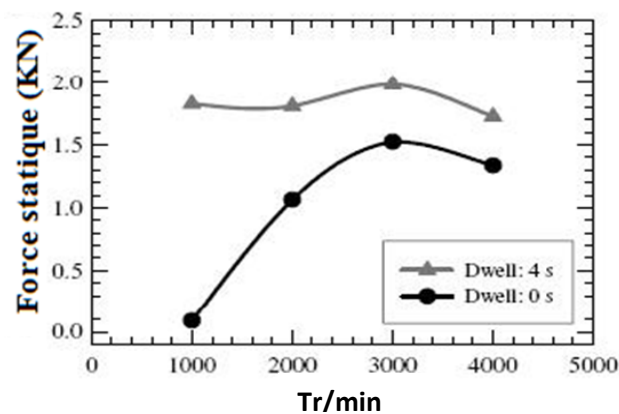


Figure 37: Effet de la vitesse de rotation sur la tenue mécanique en traction – cisaillement pour des temps de maintien de 0s et de 4s [65].

- La profondeur de pénétration du pion présente aussi une influence. En effet, l'évolution de la tenue mécanique de points de soudures entre tôles AA 6111-T4 de 1 mm d'épaisseur montre qu'il existe une profondeur de pénétration optimale (Figure 38)[66]. Cette figure montre également qu'il semble y avoir une influence de la profondeur de pénétration sur la tenue mécanique à la traction.

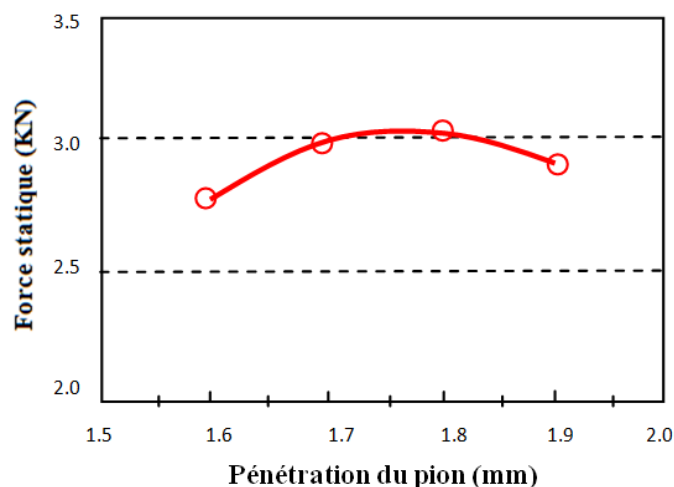


Figure 38 : Effet de la profondeur de pénétration (mm) sur la tenue mécanique en traction [66].

I.5.2.G.2.Cas des alliages d'aluminium 5xxx

La soudabilité de la série 5xxx par FSSW semble beaucoup moins évidente que celle de la série 6xxx. La tenue mécanique en traction-cisaillement des points obtenus est inférieure à celle de la série 6xxx, et les paramètres de soudage à appliquer sont complètement différents pour optimiser le procédé. Le seul outil dont les caractéristiques ont été publiées est conique, mais il n'est pas certain qu'il s'agisse de la géométrie la mieux adaptée (Tableau 6).

référence	Forme de pion	Diamètre de pion	Longueur de pion	filetage	Diamètre d'épaulement	Angle d'épaulement
Université Missouri	conique	Base : 4,5 mm	1,8 mm	non	12 mm	7°

Tableau 6 : Dimensionnement d'un outil utilisé pour le FSSW de la série 5xxx [66].

En ce qui concerne les paramètres de soudage, la vitesse de rotation semble être encore une fois très influente sur la tenue mécanique. Par exemple, pour des soudures de tôles d'AA 5052 de 1 mm d'épaisseur chacune, le chargement à rupture passe de 2,5 kN à 4,2 kN, lorsque la vitesse de rotation passe respectivement de 2500 tr/min à 1250 tr/min (Figure 39)[35]. Il est important de remarquer que la plage d'étude se situe uniquement entre 1250 et 3000 tr/min. Ainsi, les allures de courbes peuvent être difficilement comparées entre les deux séries 6xxx et 5xxx. En revanche, une différence importante apparaît entre les deux alliages : pour la série 5xxx, il est préférable d'utiliser des faibles vitesses de rotation, tandis que pour la série 6xxx, il vaut mieux appliquer des vitesses de rotation élevées. Ceci s'explique par le fait que ces deux alliages ont un comportement à chaud différent et que justement la vitesse de rotation est un paramètre directement lié à la température.

En conclusion, pour optimiser des soudures par FSSW de la série 5xxx, il faut se placer à des vitesses de rotation relativement faibles. La profondeur de pénétration semble quant à elle exercer moins d'influence (Figure 39).

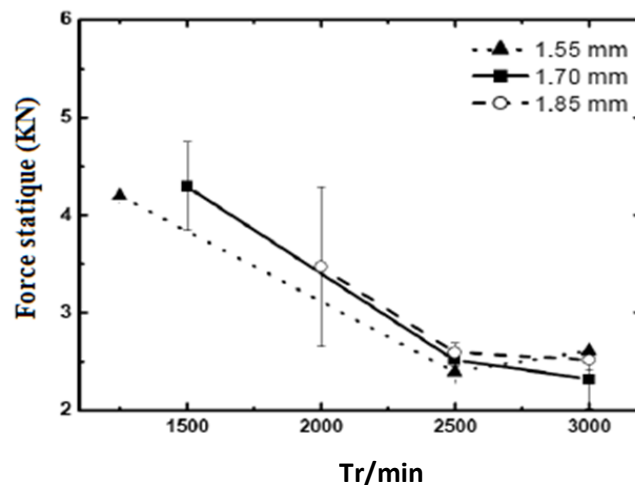


Figure39 : Evolution de la tenue mécanique en traction-cisaillement en fonction de la vitesse de rotation pour différentes pénétrations (5052 1 mm / 1 mm) [73].

On peut dire que pour la série 5xxx ou la série 6xxx, les évolutions existant entre la tenue mécanique et les paramètres de soudage semblent s'expliquer par l'évolution de la taille de la zone soudée. En effet, plusieurs études [73-74-75-76] ont montré que plus la zone soudée est large, plus la tenue en traction-cisaillement augmente.

I.5.2.H. Microstructure dans la zone de soudure

La microstructure subit des changements dus aux champs thermiques et aux déformations générées par le malaxage. Nous allons maintenant décrire les différentes zones qui se distinguent par leur microstructure.

I.5.2.H.1. Les différentes zones affectées

La figure 40 illustre la géométrie idéalisée d'un point de soudure par point par friction malaxage homogène FSSW et les différentes zones résultantes. Le pion rotatif qui plonge dans les tôles génère à la fois une élévation de la température et une déformation plastique. Ainsi, pendant le soudage, une Zone Affectée Thermo Mécaniquement (ZATM) et une Zone Affectée Thermiquement (ZAT) sont créées autour du pion [78]. Dans la ZATM, une autre zone peut se distinguer très proche du pion, il s'agit de la Zone de Malaxage (ZM).

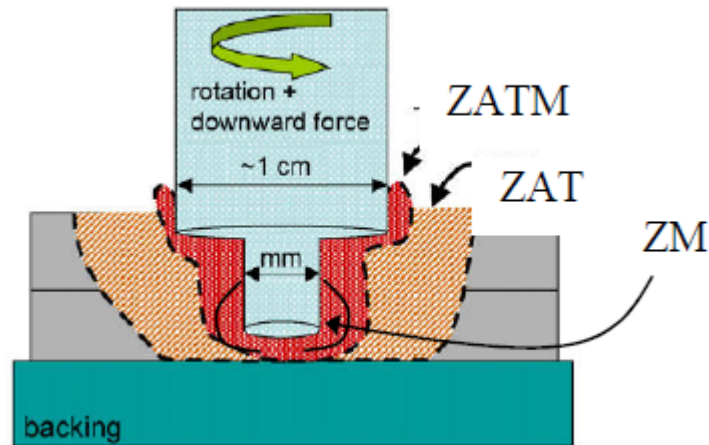


Figure 40 : Description schématique d'un point de soudure FSSW [77].

Le soudage par point par friction malaxage (FSSW) présente une forte zone affectée thermiquement dû à un grain plus fin. L'élimination de l'équipement de refroidissement rend plus ductile les propriétés de soudure par rapport au soudage par point classique.

I.5.2.H.2. Cas homogène

Une coupe transversale représentative d'un joint de soudage par point (FSSW) est présentée dans la figure 41, montrant une soudure faite à 800 t/mn avec une profondeur de pion de 2.7 mm. La figure 41- A montre la microstructure du joint autour duquel la région s'est transformée en zone affectée thermiquement. Les résultats de micro- dureté sont présentés dans la figure 41-B illustrent une distribution uniforme de dureté dans le joint de soudure et indiquent également un ramollissement dans la région de la ZAT, cela caractérise les propriétés du métal de base.

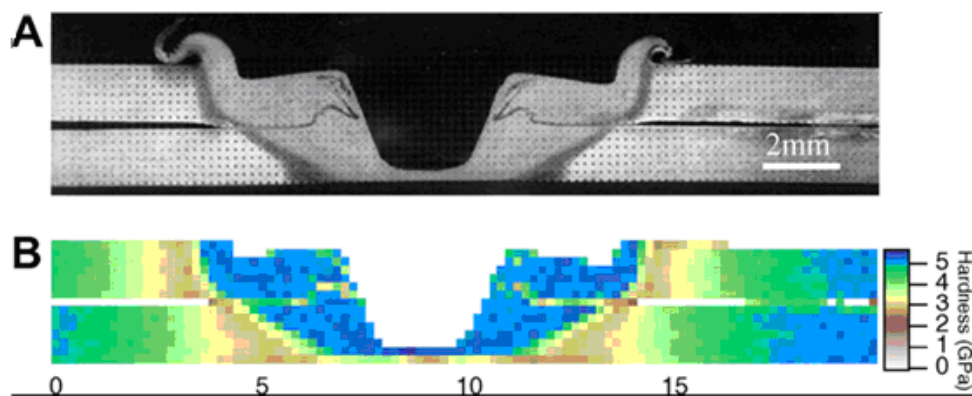


Figure 41: Micrographie transversale. (A) d'un soudage par points par friction malaxage dans l'acier HSBS ; la soudure a été produite à 800 t/mn avec une première profondeur de 7 mm en 3.9 s. (B) une carte de micro dureté du même joint de soudage [80].

Pour des soudures faites sur l'alliage 6061 T-4, les microstructures de soudure ont varié de manière significative selon la longueur de pion, la vitesse de rotation d'outil et le temps de maintien de l'outil. Pour des différentes vitesses de rotation (2000, 2500 et 3000 tr/min) à une vitesse de plongée (20 mm/min) et en tenant compte du temps de maintien. L'auteur [80] a observé que l'écoulement de la matière ascendant de la tôle inférieure est plus remarquable avec l'augmentation de la vitesse de rotation de l'outil (2000 tr/min). A cet effet, l'épaisseur de la tôle supérieure sous la pression de l'épaulement diminue avec l'augmentation de la longueur du pion comme indique la figure 42.

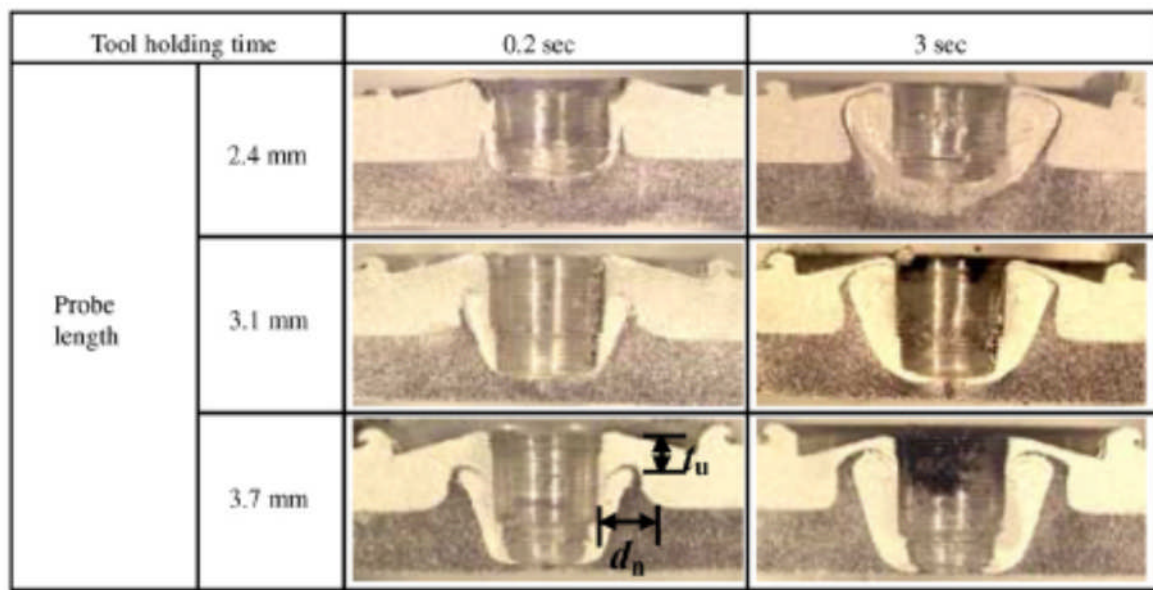


Figure 42: Microstructures de la section transversale des soudures [80].

Y. Tozaki [80] a également noté que la distance, vers le bas, dans les microstructures (Figure 43), correspondant à la taille réelle du noyau, est sensiblement affectée par la longueur du pion, la vitesse de rotation de l'outil et le temps. Vers le bas, il a observé que la taille a augmenté avec l'augmentation de la vitesse de rotation (3000 tr/min) et de la longueur du pion de l'outil.

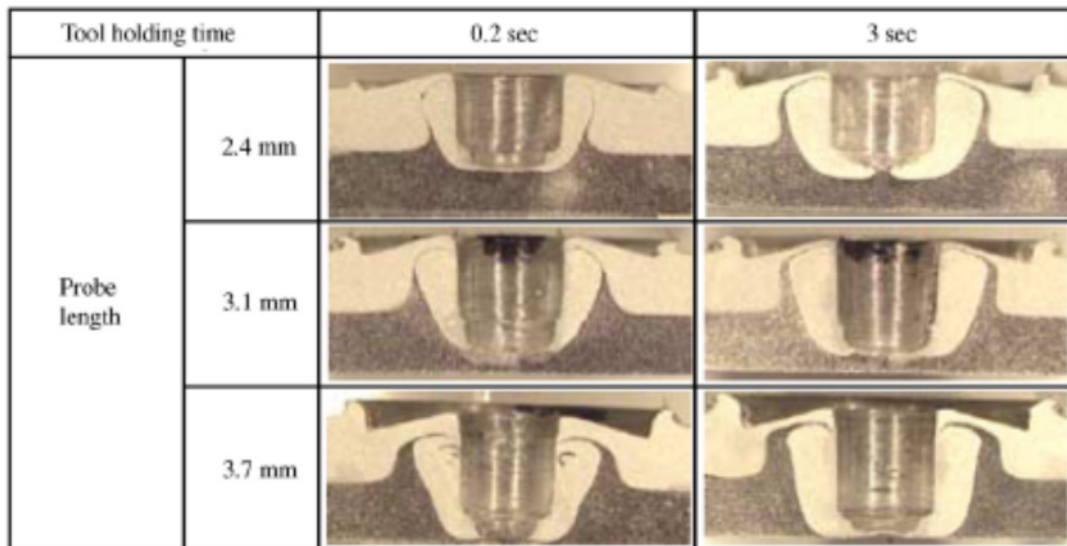


Figure 43: Microstructures de la section transversale de soudure (FSSW) pour différentes longueurs de pion de l'outil en tenant compte du temps de maintien et la vitesse de rotation d'outil [80].

En effet, concernant le soudage de tôles AA 5052, une augmentation progressive de la microdureté a lieu lors du passage du matériau de base jusqu'à la ZM. Ceci provient de la diminution de la taille de grains, et la zone la plus dure correspond à la zone à plus petits grains, à savoir la ZM [81]. (Figure 44).

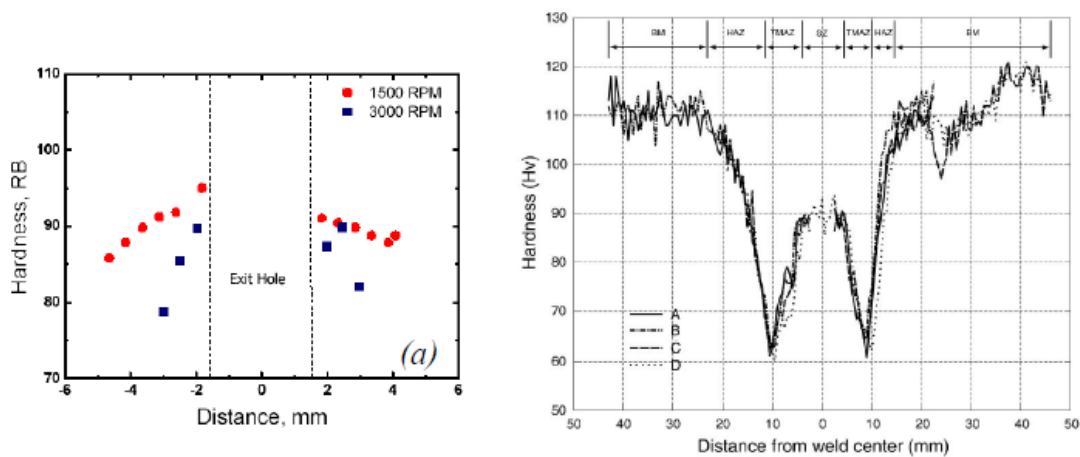


Figure 44 : Profils de micro dureté relevés sur la coupe transversale de points FSSW (a) de tôles 5052 (1 mm / 1 mm) [82] et (b) de tôles 6061(1 mm / 1 mm) [71].

I.5.2.H.2.Cas hétérogène

En ce qui concerne l'assemblage hétérogène, la rhéologie des deux matériaux est différente. Par conséquent, le flux de matière va différer de celui de l'assemblage homogène. Pendant la rotation de l'outil dans les tôles, il n'y a pas de malaxage entre les deux matériaux, mais une remontée de l'acier dans l'aluminium. Ce phénomène entraîne la formation d'une accroche d'acier dans l'aluminium, qui permet notamment la liaison mécanique entre les deux tôles (Figure45). Il peut donc être supposé que les dimensions de ces accroches vont être étroitement liées à la tenue mécanique des points de soudure.

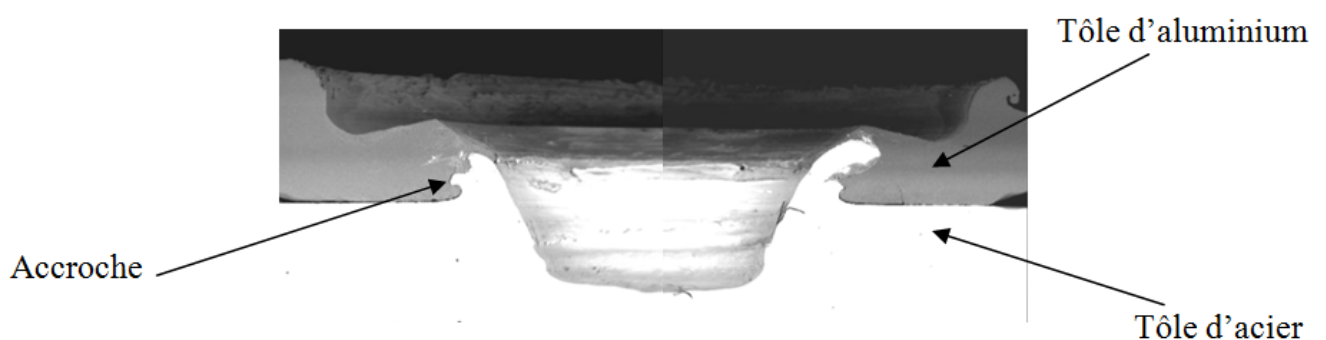


Figure 45 : Coupe transversale d'un point de soudure Al/Acier [83-84].

Un zoom de l'accroche permet de mieux observer les mouvements de matière obtenus pendant le FSSW. L'étude bibliographique réalisée sur les assemblages entre aluminium et acier [83-84] ainsi que le contraste de niveaux de gris observé permettent de supposer que les zones grises apparaissant à la périphérie de l'accroche corresponde à des zones de composés intermétalliques. On peut aussi remarquer qu'il y a eu migration de blocs d'acier dans la tôle d'aluminium.

- M. da Silva [94] a notamment consisté à étudier l'influence des paramètres (vitesse de rotation et distance de pénétration) sur le soudage hétérogène par point par friction malaxage (FSSW) entre un alliage d'aluminium 1050 avec un épaisseur de 2,5 mm et l'acier 22MnB5 embouti à chaud avec un épaisseur de 1,8 mm sur la formation des intermétalliques et les propriétés mécaniques du joint de soudure. Des observations ont été réalisées sur quatre joints de soudure soudés avec différents paramètres de soudage A(1000tr/min,2.9 mm) ;B(2000 tr/min,2.9 mm) ;C(1000 tr/min,3.5 mm) ;D(2000 tr/min,3.5mm) (figure 46),

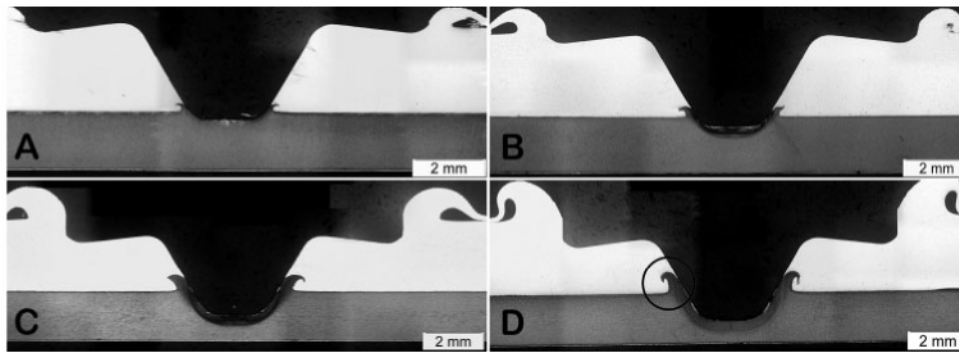


Figure 46: comparaison entre les quarts échantillons soudés par FSSW avec différents paramètres [94].

Les observations ont prouvé que la taille de ces accroches est en fonction des paramètres de FSSW (une plus grande taille d'accroches est associée à une plus haute vitesse de rotation (ω) et distance de pénétration (D_p)). Il est également possible d'observer que (ω) et (D_p) ont influencé sur la taille (surface totale) de la zone malaxée. En plus de ces observation, des essais de micro duretés ont été réalisé sur les même échantillons avec une charge de 96 mN avec $HV_{0.2}$ sur les deux tôles (figure 29).

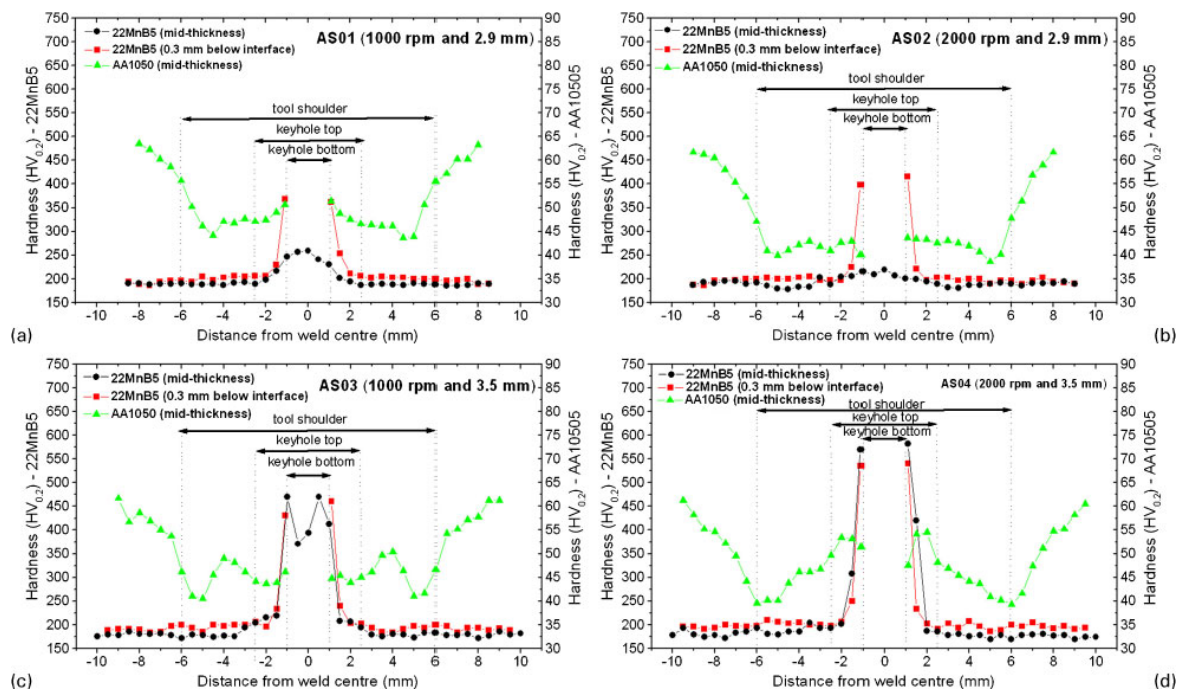


Figure 47: Variation de la micro - dureté en fonction de la distance sur les quatre échantillons [94].

- La variation de la micro dureté sur les différents échantillons montre que des valeurs minimum de dureté dans les tôles de l'acier ont été trouvées aux régions de ZAT / ZATM avec des valeurs changeant de 150 $HV_{0.2}$ à 220 $HV_{0.2}$ et des valeurs maximal sous forme de

pic ont été trouvées aux régions de ZM au niveau des accroches avec des valeurs changeant de 250 HV0.2 à 600 HV0.2 selon les paramètres de FSSW utilisés. Et les valeurs minimum dans la tôle de l'aluminium ont été trouvées aux régions de ZAT / ZATM sur les lignes 5 et 6 avec des valeurs changeant de 35 HV0.2 à 45 HV0.2 et des valeurs maximales sous forme de pic ont été trouvées aux régions de MB avec des valeurs changeant de 55 HV0.2 à 65 HV0.2 selon les paramètres de FSSW utilisés. Ce qui signifie que les paramètres de soudage ont une grande influence sur les propriétés mécaniques des joints de soudure soudés par FSSW.

- D'autres chercheurs [96] ont réalisé des points FSSW entre aluminium et acier, mais sans pénétrer la tôle d'acier (Figure 48). L'épaisseur d'intermétalliques est très limitée, mais la tenue mécanique des points reste relativement faible. Il peut donc en être conclu qu'une soudure avec peu d'intermétalliques n'est pas non plus souhaitable.

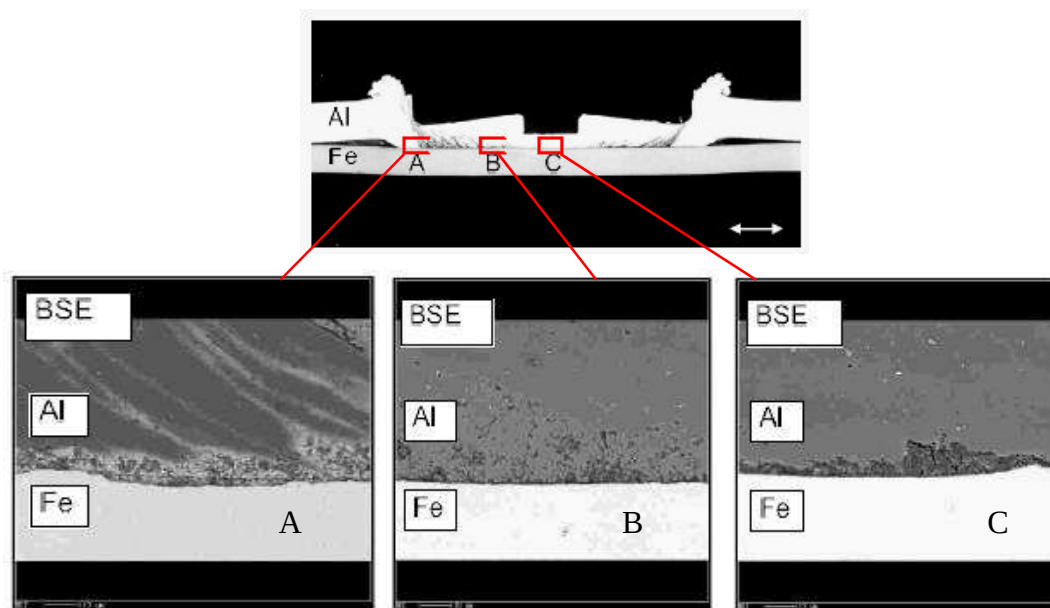


Figure 48 : (a) Macrographie d'un point FSSW entre une tôle d'alliage d'aluminium 6xxx de 1,4 mm d'épaisseur et une tôle d'acier de 1 mm d'épaisseur et (b) images MEB en électrons rétrodiffusés [96].

- Ainsi, les études montrent que, quelque soit la méthode utilisée pour assembler l'aluminium avec l'acier, la quantité d'intermétalliques semble jouer un rôle important dans le comportement mécanique des soudures obtenues. Il sera donc primordial d'étudier la formation des intermétalliques ainsi que leurs caractéristiques.

- W. h. Zhang et autres [97] ont réalisé des points de soudures par résistance entre un alliage d'aluminium 6008 avec un acier galvanisé a haute résistance H220YD pour étudier les effets du courants et le temps de soudage sur la microstructure et le comportement mécanique du joint de soudure. Une couche mince de composé intermétallique composée de phase Fe_2Al_5 c'est formé à l'interface en acier/en aluminium (figure 49).

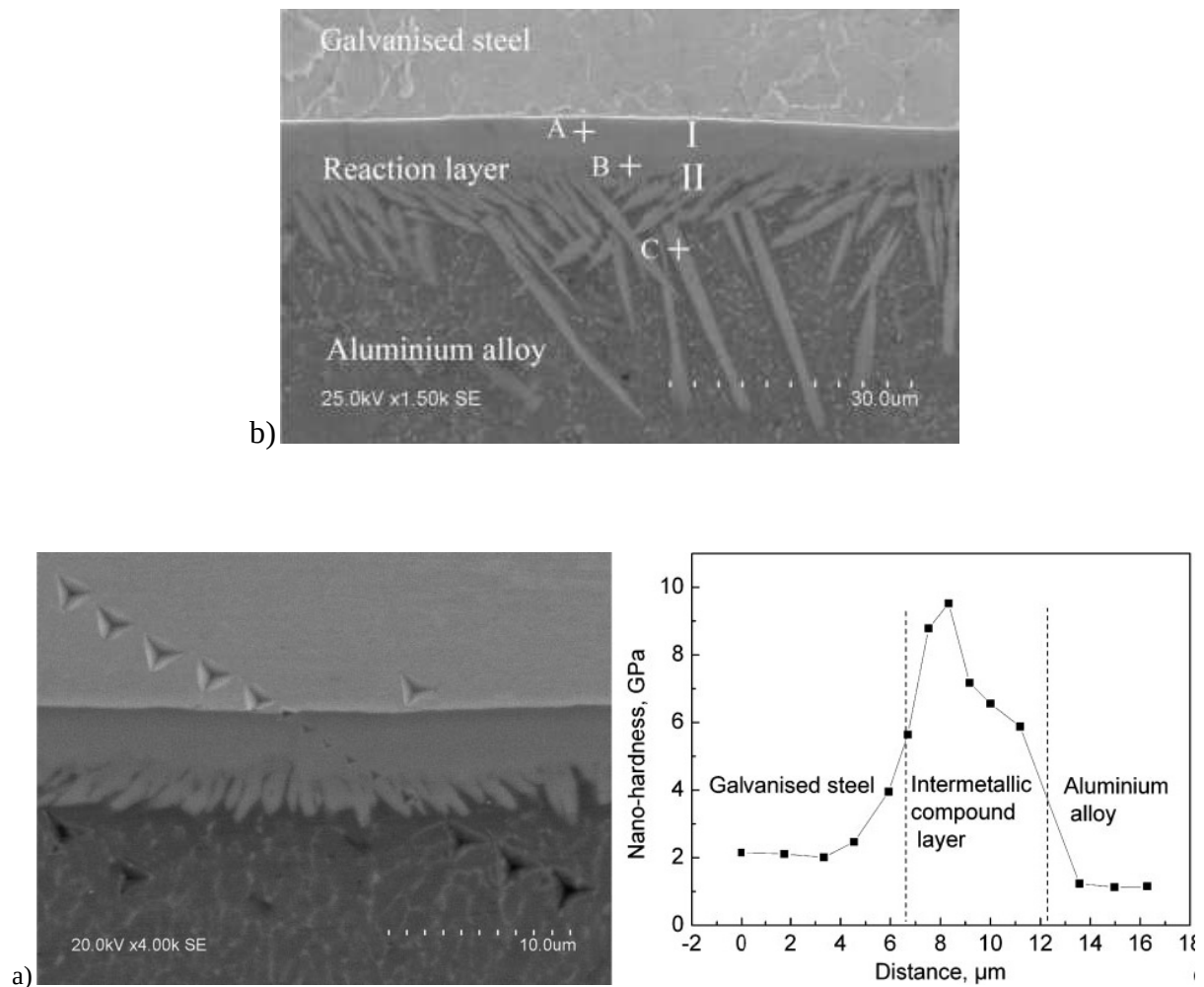


Figure 49 :(a) teste de nano duresité sur un joint de soudure acier/Alu (b) Microstructure d'un joint de soudure par résistance hétérogène Acier/Alu [97].

- La couche de composé intermétallique à un plus haut nano duresité par rapport à la zone d'alliage d'aluminium et à l'acier galvanisé. Avec l'augmentation du courant de soudure et du temps de soudure.

I.5.2.I. Flux de matière

Plusieurs chercheurs ont étudié le flux de matière obtenu pendant le soudage FSSW. Tout d'abord, Su et al.[85-86] ont réalisé des études de soudage FSSW entre tôles d'alliage d'aluminium de natures différentes afin de pouvoir visualiser les mouvements de matière. Aucun malaxage entre les deux alliages n'a été remarqué dans les cas suivants :

- lorsque le pion de l'outil est non fileté avec ou sans temps de maintien (Figure 50),
- lorsqu'il n'y a pas de temps de maintien, bien que le pion soit fileté.



Figure 50 : Macrographie d'un point de soudure obtenu avec un outil à pion non fileté (2500 tr/min, temps de maintien de 2 s) (5754 1,5 mm / 6111 1,3 mm) [86].

La figure 51 illustre le transport de la matière plastifiée dans le plan horizontal et vertical au cours de l'opération de FSSW. [87-85]

Le processus de transport de la matière, est répété à des distances croissantes autour du pion suivant les directions 1, 2, et 3 afin de développer la zone de malaxage.

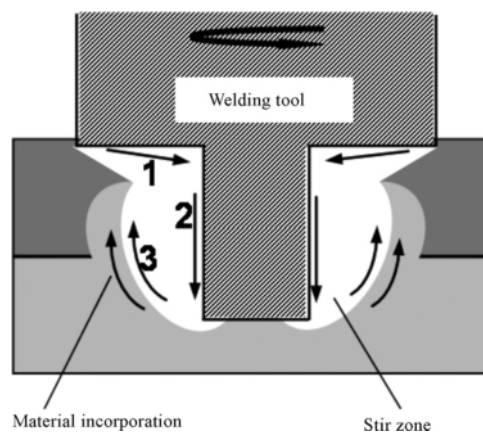


Figure 51: Représentation schématisée d'un modèle de flux de matières au cours de soudage FSSW.

- Dans le cas d'un pion fileté ou il y a une période de maintien, un inter malaxage des deux tôles se provoque (Figure 52). Ces essais ont permis de comprendre que la zone de malaxage correspond à une interpénétration de matière de la tôle supérieure et de la tôle inférieure au niveau du filetage du pion. Ceci se traduit par une répétition de stries à l'intérieur de la zone de malaxage [85].

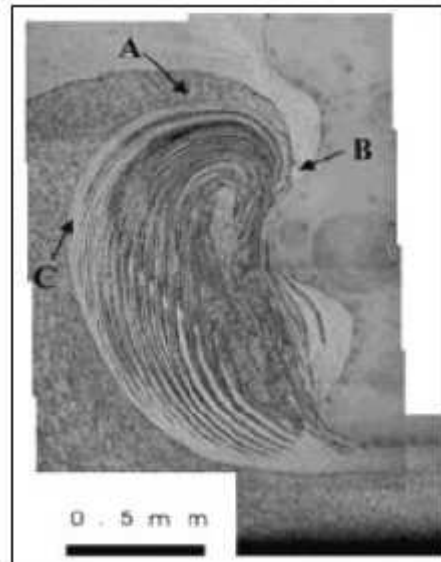


Figure 52 : Image en Microscope Optique (MO) de la zone de malaxage pour un essai FSSW entre les alliages 5754 et 6111 avec un pion fileté [85].

I.5.2.J. Résistance mécanique

Beaucoup d'études prouvent que la résistance des points soudés par friction malaxage dépend principalement de la taille de la zone malaxée.

Une très grande résistance de soudure est attribuée à une plus grande taille de la zone de malaxage atteinte en abaissant la vitesse de rotation [89-90]. La profondeur croissante de plongeon d'outil peut augmenter la force de soudure. Cependant, une profondeur de plongeon faible peut mener à une soudure qui a une faible résistance à la traction [91].

- La contrainte de traction des points soudés par FSSW d'alliage d'Al 6061-T6 avec différents outils a été examinée à diverses vitesses. La machine d'essai utilisée était de marque Instron Servo hydraulique model 8501, avec une charge maximale de 10 tonnes et une vitesse maximale de croisillon de 10000 mm/min (Figure53).

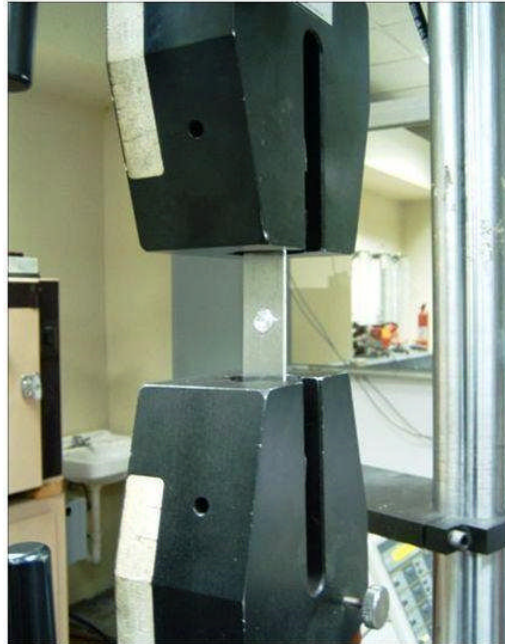


Figure 53: Installation d'essai de traction de FSSW.

La figure 54 montre la vue en coupe de l'arrangement de l'essai de traction de soudage FSSW. Des petites plaques de soutien sont exigées pour des éprouvettes afin d'éviter la force asymétrique de cisaillement de la zone de soudure pendant l'essai de traction.

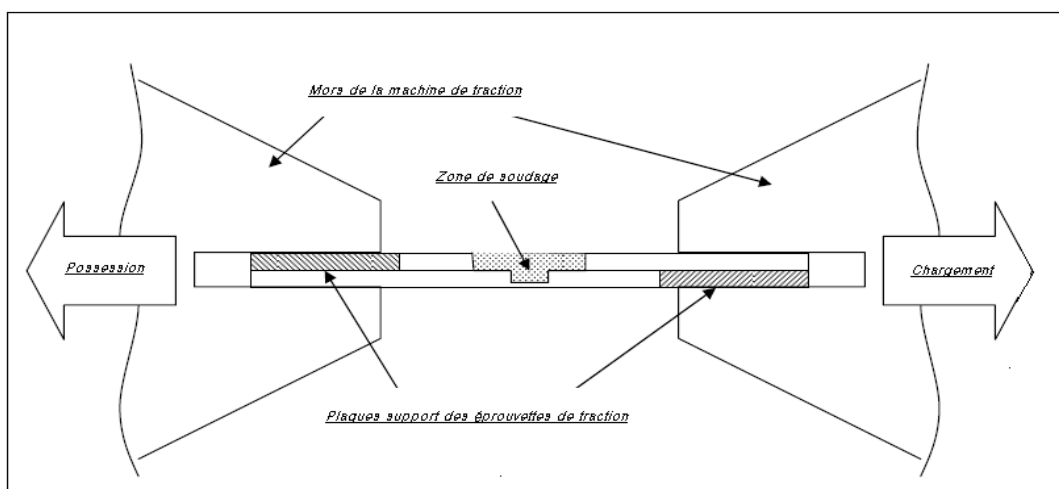


Figure 54: Section transversale de l'arrangement de l'essai de traction de FSSW.

I.5.2.K. Modes de rupture

Dans le cas des essais de traction-cisaillement ou de traction- croix, il existe deux principaux modes de rupture [70]: une fracture par propagation de l'interface entre les deux tôles (Figure 55a), ou un déboutonnage du point de soudure (Figure 55b), c'est-à-dire qu'il y a eu une déchirure de la tôle supérieure en périphérie de la zone soudée. Si la rupture se fait par déboutonnage, la tenue mécanique est généralement meilleure.

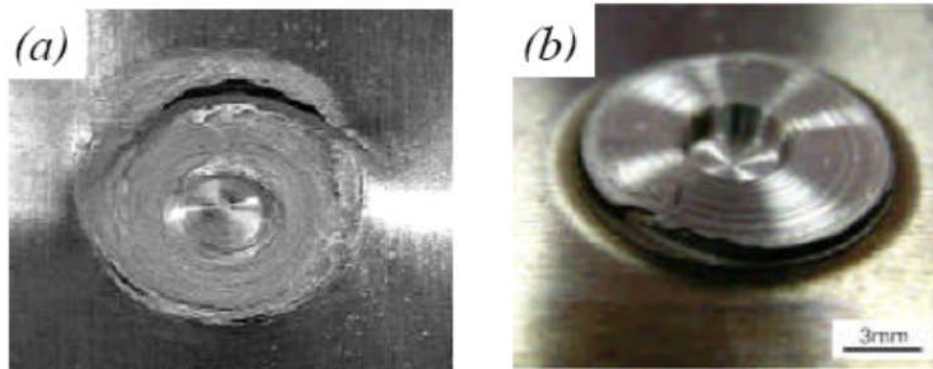


Figure 55 : Photographie des deux différents modes de rupture : (a) suivant l'interface et (b) par déboutonnage [93]

Plus précisément, lorsque la rupture se fait par propagation de l'interface, différents cas peuvent se distinguer selon le mode de sollicitation mécanique. Tout d'abord, sous une traction-cisaillement, soit la propagation de l'interface se fait horizontalement, il s'agit donc d'une fracture par cisaillement uniquement (Figure 56a). Soit la propagation se fait en deux étapes : la propagation se fait horizontalement suivant l'interface puis elle suit une trajectoire verticale, comme si elle contournait le noyau soudé, on parle alors de fracture mixte (Figure 56b). En traction pure, il existe deux cas également : soit la fracture est en pure traction (Figure 57a), soit il y a un contournement du noyau soudé (Figure 57b)

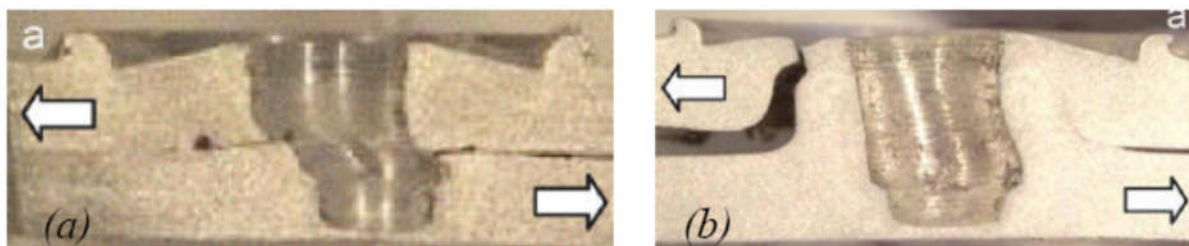


Figure 56: Les modes de rupture en traction-cisaillement : (a) fracture par cisaillement et (b) fracture mixte par traction et cisaillement (6061 2 mm / 2 mm)[88].

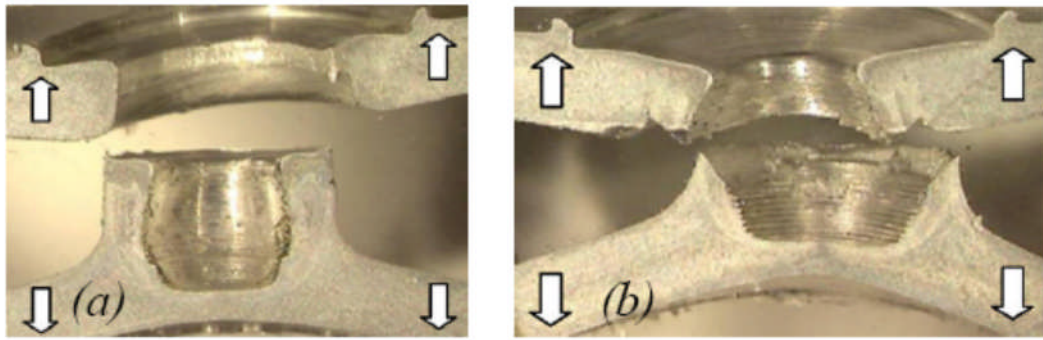


Figure 57 : Les différents modes de rupture en traction pure (a) déchirure de la tôle supérieure et (b) décohésion du noyau soudé [88].

Le cas d'une faible profondeur de pénétration ou d'un temps court conduit généralement à un mode de rupture suivant l'interface, à cause d'une faible largeur de zone soudée. A l'inverse, le cas d'une importante profondeur de pénétration ou d'un temps élevé conduit à un déboutonnage par une importante largeur de zone soudée et une faible épaisseur sous l'épaulement. [92]

- V.X. Tran et autres [94] ont notamment consisté à étudier les modes de ruptures pour des éprouvettes en croix et des éprouvettes pour traction- cisaillement soudée par point par friction malaxage FSSW entre deux alliages d'aluminium différents 5754-O et 7075-T6 avec une épaisseur de 2 et 1,6 mm respectivement. Les éprouvettes soudées par FSSW utilisées et les résultats obtenus durant les essais sont représentés dans les figures 58 et 59.

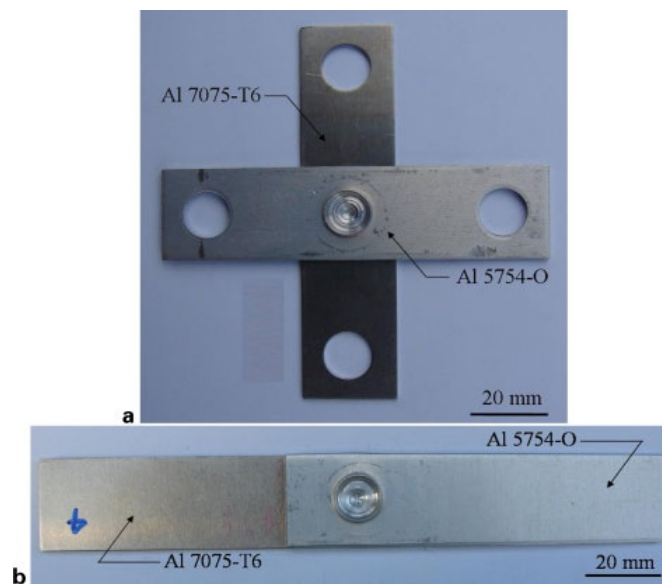


Figure 58: les éprouvettes soudées par FSSW.

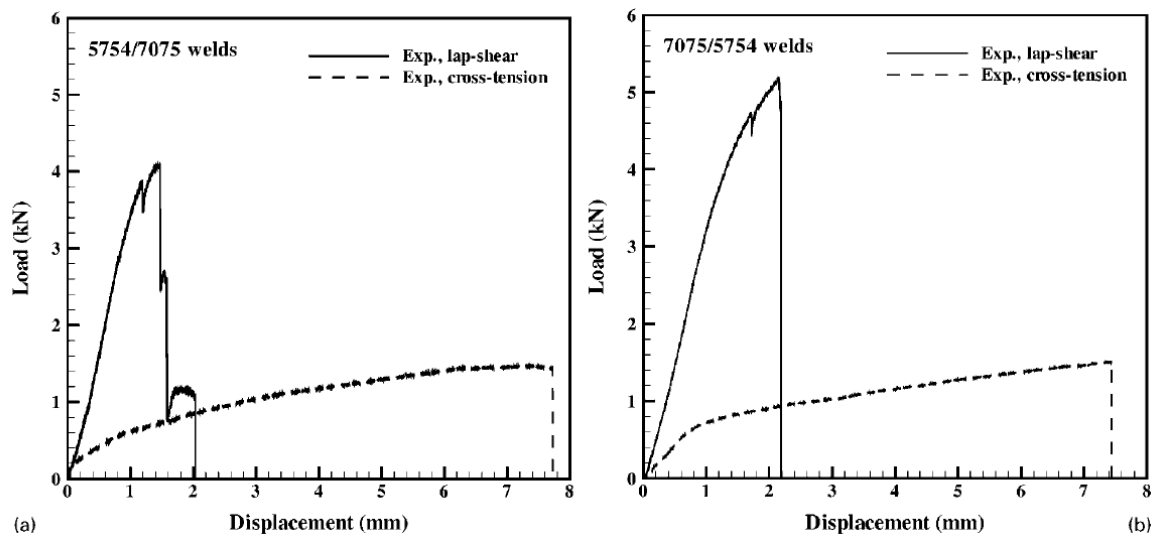


Figure 59: les résultats obtenus des deux combinaisons 5754/7075 et 7075/5754[94].

- Les résultats expérimentaux prouvent que les charges appliquées sur les soudures soudées par points par friction malaxage FSSW pour des éprouvettes en croix sont beaucoup inférieures à celle dans des éprouvettes de traction - cisaillement. V.X. Tran et al [94] ont étudié les modes de rupture obtenue par les éprouvettes en croix et en traction-cisaillement avec un microscope optique (figure 60). Les micrographes prouvent que la rupture des soudures dans les éprouvettes en croix échouent principalement sur le long de la surface de la zone de transition et puis de la rupture à travers le matériau de la tôle supérieur. Les modes de rupture des soudures dans des éprouvettes croix sont très différentes de ceux dans des éprouvettes de traction -cisaillement.

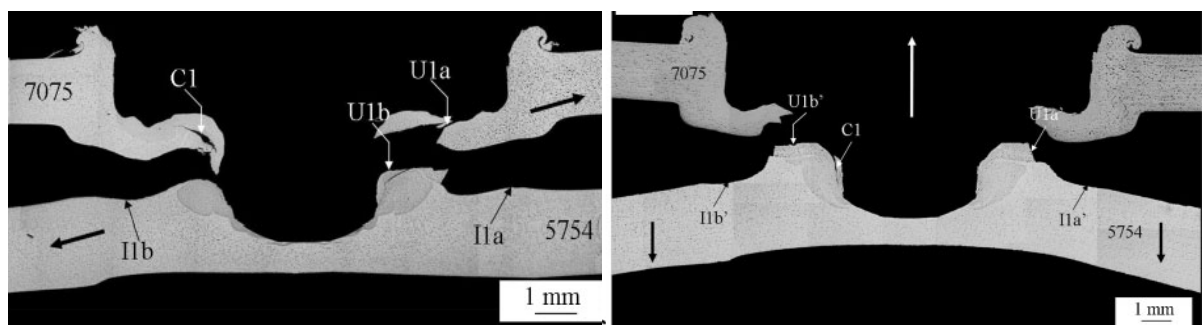


Figure 60: les modes de ruptures pour b- traction –cisaillement c-éprouvettes en croix [94].

CHAPITRE II

**TECHNIQUES
EXPÉRIMENTALES**

III. ETUDE EXPERIMENTALE

La demande croissante de l'économie d'énergie dans différents secteurs industriels a mené à la nécessité d'employer les alliages légers et les aciers de haute résistance. Un tel intérêt a créé la nécessité de développer les technologies de soudage fiables qui peuvent permettre des processus multi matériel de fabrication de conception et de coût bas. Ce procédé de soudage permet un assemblage par voie solide, ce qui supprime les défauts liés à la solidification et conduit à des contraintes internes plus faibles que les procédés de soudage classiques. L'application de ce nouveau procédé (FSW) réside dans la capacité à assembler des alliages d'aluminium et plus visiblement des alliages difficilement soudables par les procédés traditionnels. Notre objectif dans ce travail est d'étudier l'effet des paramètres de soudage sur la tenue mécanique et sur les caractéristiques mécaniques des joints de soudure hétérogène soudés par points par friction malaxage (FSSW) (Friction Stir Spot Welding) entre un alliage d'Aluminium et un acier galvanisé. Cette étude consiste à déterminer les propriétés mécaniques des joints de soudure à partir des essais de traction uni axiale, essais de dureté et une étude sur la microstructure des joints soudés.

III.1. Matériaux utilisés

L'assemblage entre deux matériaux différents (Aluminium et Acier galvanisé) par FSSW est plutôt compliqué et peut être difficile à cause de leurs différentes propriétés physiques et chimiques, en particulier à la différence dans les températures de fusion.

Matériau 1 :

Aluminium du type 6061-T5, dont la composition chimique et les propriétés mécaniques sont présentées dans les tableaux 7 et 8. Cet alliage correspond aux alliages à durcissement structural dont les principaux éléments d'addition sont le magnésium et le silicium. Le durcissement provient de la formation des précipités Mg_2Si . Les additions de manganèse et de chrome ont pour effet d'augmenter leur résistance mécanique et leur ténacité. L'addition de cuivre, quant à lui, améliore également les propriétés mécaniques de ces alliages.

%	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti
Alu	0.60	0.30	0.10	0.10	0.60	0.05	0.15	0.10

Tableau 7 : Composition chimique (poids %) de l'alliage d'aluminium 6061-T5.

Module de Young (MPa)	Rp (MPa)	Rm (MPa)	Allongement (%)	Coefficient de Poisson
69500	110	150	14	0.33
Densité (g/cm ³)	Fusion (°C)	Conductivité thermique (0 à 100°C) (W/m°C)	Capacité thermique massique (J/Kg°C)	Dureté (HV)
2.70	655	200	945	90

Tableau 8 : Propriétés mécaniques et physiques de l'alliage d'aluminium 6061-T5.

Matériau 2 :

Acier galvanisé de nuance H300LAD+Z, dont la composition chimique et les propriétés mécaniques sont présentées, respectivement dans les tableaux 9 et 10.

%	C	Si	P	Mn	S	ALT	Fe
Acier	0,1	0,5	0,03	1	0,025	0,025	Reste

Tableau 9 : Compos-chimiques de l'acier.

Module de Young (MPa)	Rp (MPa)	Rm (MPa)	Coefficient de Poisson	Allongement (%)	Dureté (HV)
210000	340	430	0,27	23	170

Tableau 10 : Propriétés mécaniques et physique de l'acier.

Matériau 3 :

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

III.2. Conditions de soudage FSSW et instrumentations

III.2.1. Machine de soudage

Le principe de base du procédé FSSW est effectué sur une fraiseuse conventionnelle modifiée (figure 61). Cette machine est largement utilisée pour les opérations d'usinage dans l'industrie. C'est l'une des premières machines utilisées pour réaliser du FSW.

Cette machine permet de souder des plaques de certains alliages d'aluminium jusqu'à 15mm d'épaisseur.

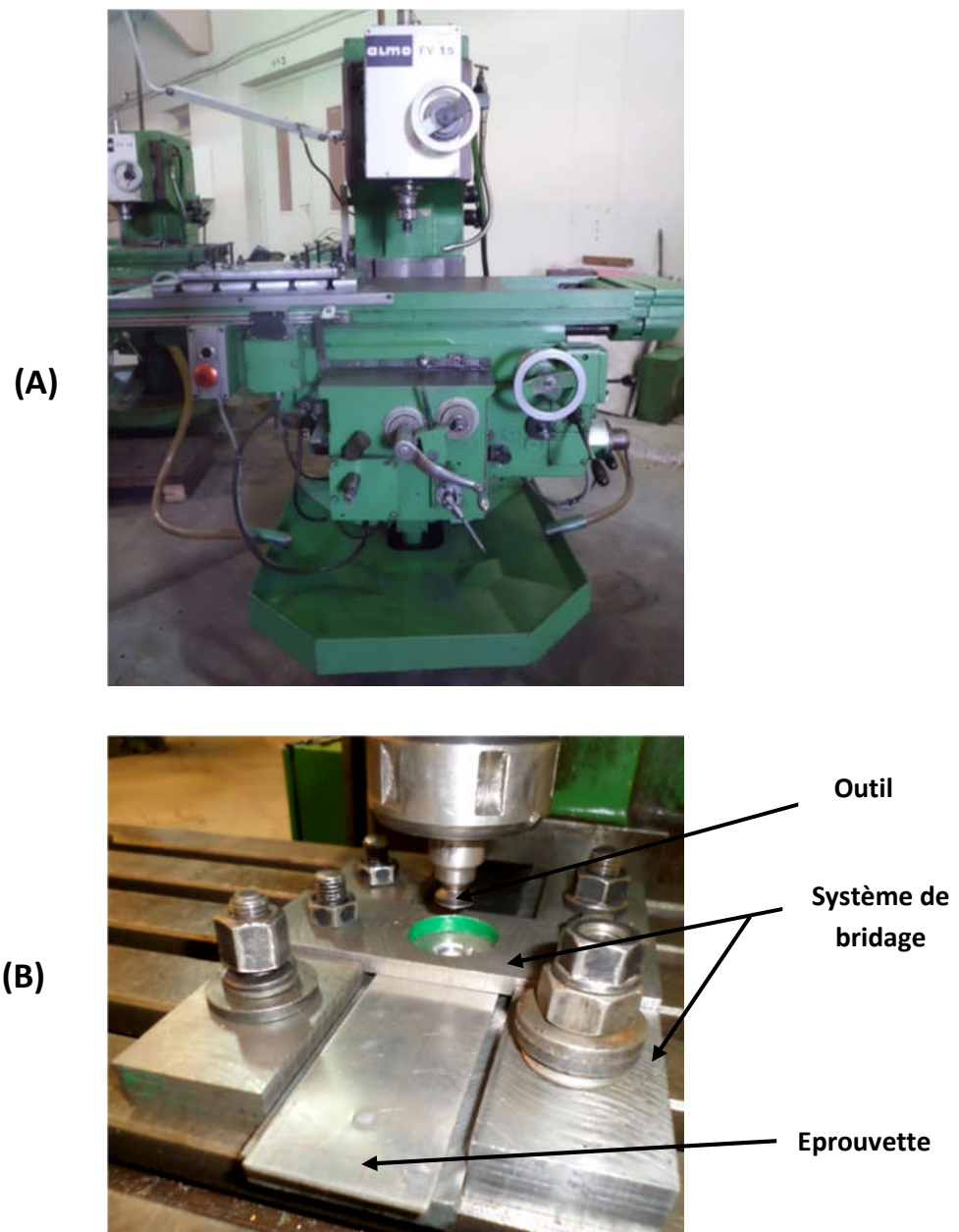


Figure 61: (A) Machine utilisée pour le soudage par FSSW, (B) le système de bridage.

➤ Le principal avantage de cette machine est d'être standard. Toutefois, elle n'est pas conçue le soudage FSW. Seul le soudage avec un outil conventionnel est possible. De plus cette machine ne peut contrôler l'opération en effort. Avec un contrôle en position, l'outil reste alors fixe par rapport à la surface des pièces tout au long du soudage, ne permettant pas de pallier à d'éventuels défauts de mise en position des pièces. La fraiseuse que nous avons utilisée est caractérisée par :

- une puissance 5KW,
- une gamme de vitesses de rotation entre 45 et 2000 tr/min
- une gamme de vitesses d'avance entre 16 et 800 mm/min.

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

III.2.2. Outil de soudage

Les soudures ont été réalisées à l'aide d'un outil (figure 62) de soudage par point par friction malaxage FSSW sa géométrie est composée d'un pion conique ($d=5\text{mm}$ et $D=5,2\text{ mm}$) et de longueur 2,3 mm avec un épaulement plat de diamètre 10 mm

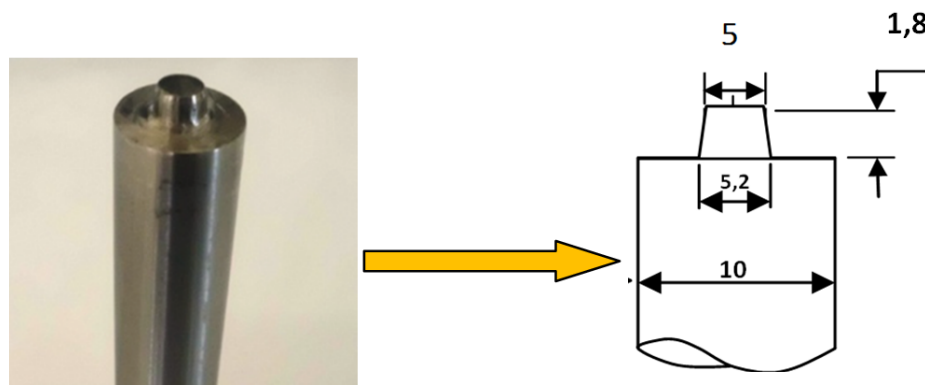


Figure 62 : Outil de soudage par point par friction malaxage.

La géométrie de l'outil est notée dans la figure 6. Différents outils ont été testé dans cette thèse pour choisi cet outil.

III.2.3. Cycle des temps de soudage

La figure 63 illustre schématiquement le déroulement d'un cycle des temps de soudage FSSW. Pendant la totalité du cycle, la vitesse de rotation de l'outil reste constante, tandis que le temps varie en fonction de la vitesse de plongée choisie du pion.

Le cycle des temps de soudage comprend :

- 1) Un temps de plongée qui est fonction de la vitesse de soudage choisie et de l'épaisseur des tôles à assembler.
- 2) Un temps de maintien afin de favoriser le malaxage de la matière par le pion.
- 3) Un temps de retrait à la fin de l'opération de soudage.

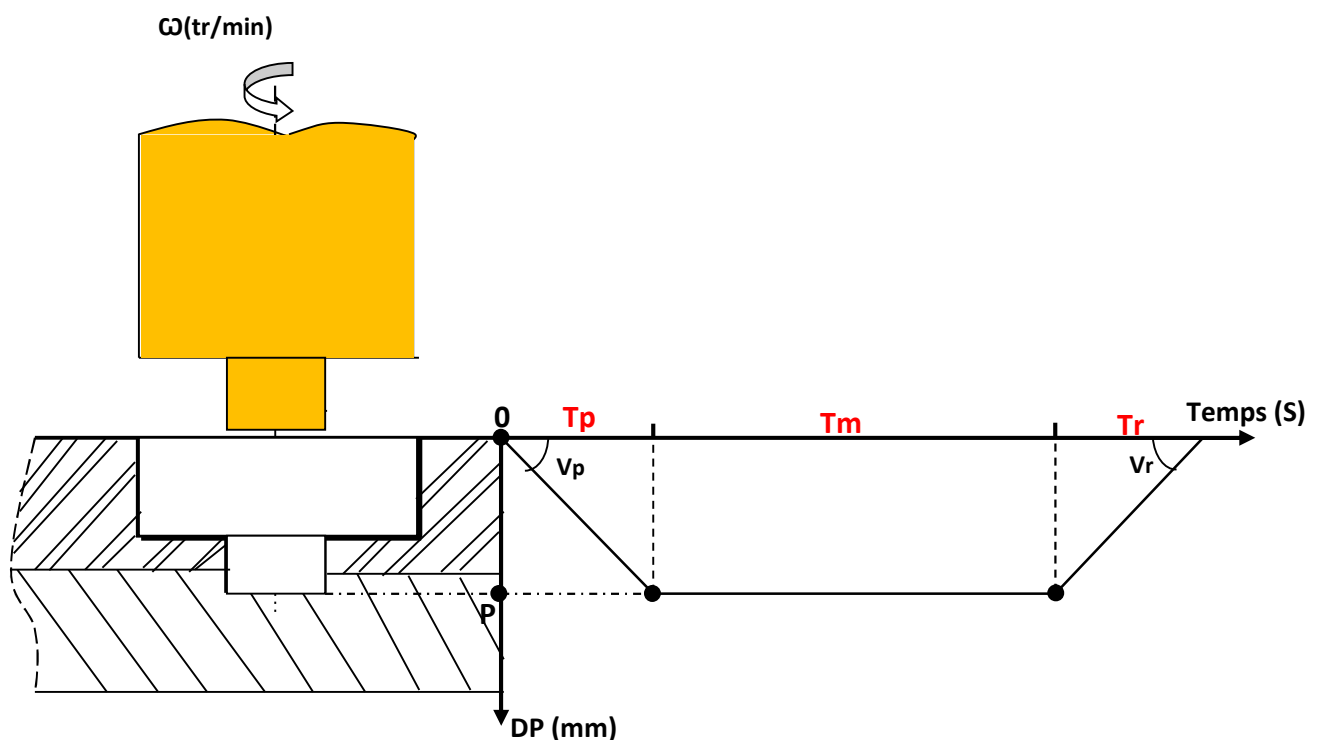


Figure 63: Description schématique d'un cycle des temps de soudage FSSW

Tp: temps de plongée de l'outil ; **Tm:** temps de maintien " dwell time" ; **Tr:** temps de retrait de l'outil ; **Vp:** vitesse de pénétration ; **Vr:** vitesse de retrait ; **Dp:** Distance de pénétration .

III.2.4. Paramètres de soudage

Les paramètres utilisés sont la vitesse de rotation, la vitesse de plongée, le temps de maintien soudage (dwell time) et la distance de pénétration. Le tableau 11 regroupe les paramètres utilisés durant le soudage. Nous avons fait varier la vitesse de pénétration de l'outil dans la matière à souder de 16 à 25 mm/mn et la vitesse de rotation de l'outil de 1000 à 2000 t/mn et la profondeur de pénétration.

A	Vitesse de rotation (Tr/min)	Vitesse de pénétration V_p (mm/min)	Temps de maintien (s)
	1000	16	5
	1400	16	5
	2000	16	5
	1000	20	5
	1400	20	5
	2000	20	5
	1000	25	5
	1400	25	5
	2000	25	5
	1000	16	2
	1400	16	2
	2000	16	2
	1000	20	2
	1400	20	2
	2000	20	2
	1000	25	2
	1400	25	2
	2000	25	2
B	Vitesse de rotation (tr/min)	Profondeur de pénétration (mm)	Temps de maintien (s)
	1000	1,9	2
	2000	1,9	2
	1000	2,3	2
	2000	2,3	2
	1000	2,7	2
	2000	2,7	2

Tableau 11 : Les paramètres utilisés pendant le soudage par FSSW pour 1 point.

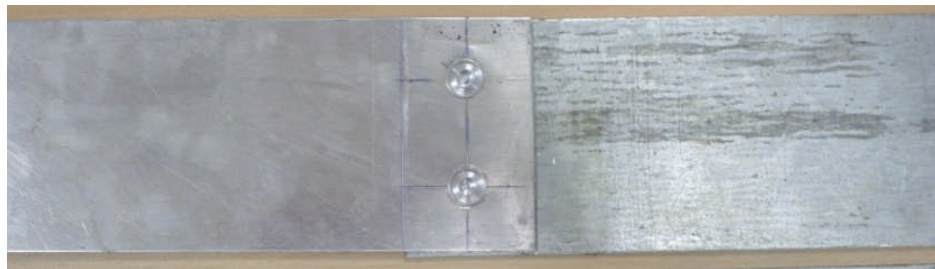
A Vitesse de rotation : ω (Tr/min), vitesse de pénétration : V_p (mm/min) ; Temps de maintien : T_m (S).

B Vitesse de rotation : ω (Tr/min), Distance de pénétration : D_p (mm) ; Temps de maintien : T_m (S).

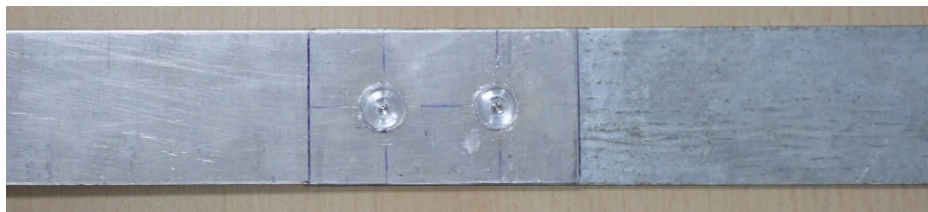
La figure 4 présente les différents types d'assemblage utilisés.



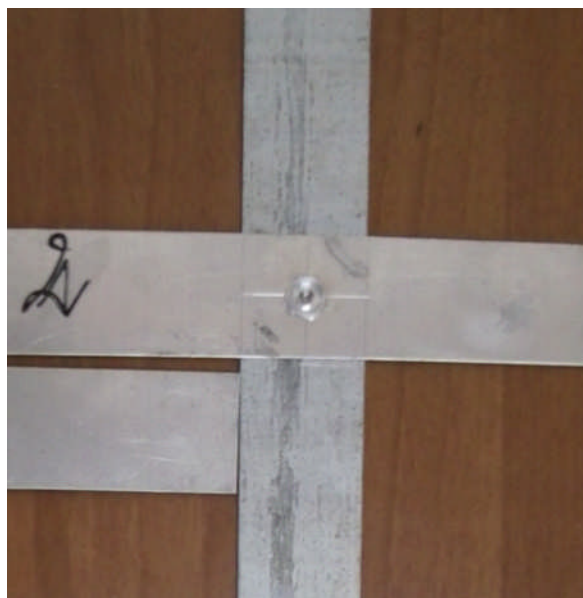
1 point



**2 points
horizontaux**



**2 points
verticaux**



**Eprouvette
en croix**

Figure 64 : Différents types d'éprouvettes soudées par FSW (Alu/Acier).

III.3. Analyse des résultats et discussion

III.3.1. Essais de traction sur les matériaux de base (Eprouvettes alter)

- Pour déterminer les caractéristiques mécaniques globales de ces deux matériaux, nous avons effectué des essais de traction sur des éprouvettes haltères usinées dans des tôles d'aluminium série 6061-T5 et de l'acier galvanisé. La géométrie des éprouvettes est décrite dans la figure 65.b. La machine d'essais a été pilotée en déplacement imposé avec une vitesse de déformation de la traverse fixée à 2 mm/min. Les essais de traction ont été réalisés sur une machine de traction de marque INSTRON, pilotée par le logiciel MTS. 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.

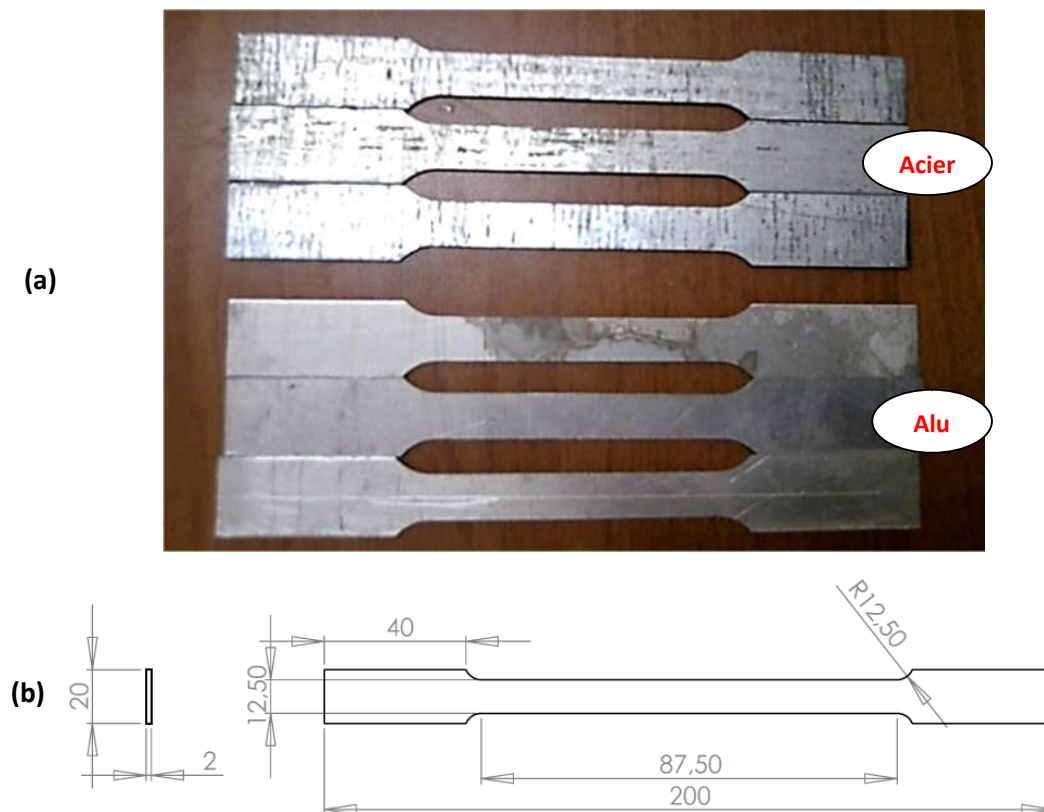


Figure 65: Géométrie et dimensions de l'éprouvette Alter utilisée.

Pour le dispositif d'extensomètre, le capteur à lames est positionné au niveau de la longueur utile ($L_u = 50$ mm) de l'éprouvette haltère, comme indiqué dans la figure 66.a.

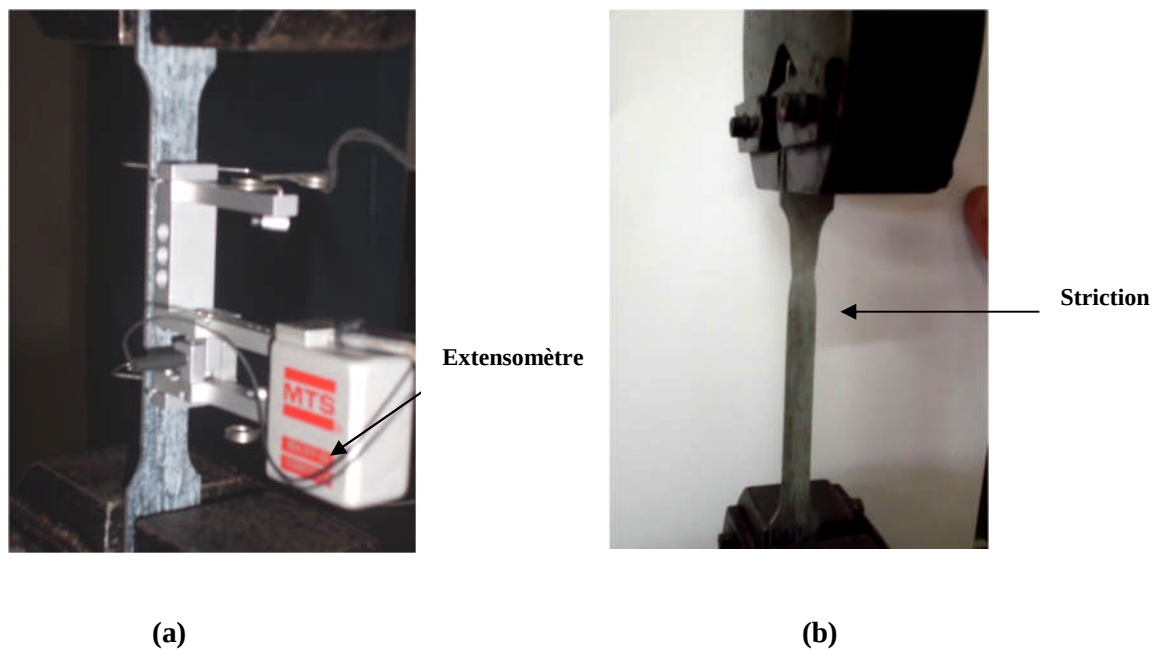


Figure 66 : Essai de traction d'éprouvette haltère mesuré par l'extensomètre.

III.3.1.A. Analyse de l'aluminium 6061-T5

La figure 67 donne la courbe contrainte vraie – déformation vraie qui présente un comportement élasto-plastique de l'aluminium.

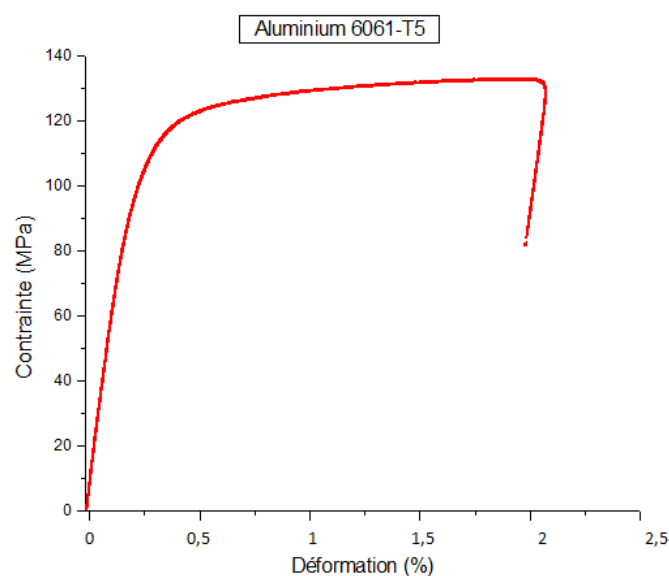


Figure 67 : Courbe typique contrainte-déplacement d'une éprouvette –ALT- Aluminium 6061-T5.

Les caractéristiques mécaniques (Tableau 12) du métal de base tel que, la limite élastique R_e , la résistance à la traction R_m , la déformation ε et le module de Young E ont été obtenus à partir de la courbe de la figure 67.

Re [MPa]	Rm [MPa]	E [MPa]	ϵ [%]
110.13	137.57	61870.78	0.178

Tableau 12 : Propriétés mécaniques du métal de base.

III.3.1.B. Analyse de l'acier

La figure 68 donne la courbe contrainte vraie – déformation vraie qui présente un comportement élasto-plastique de l'acier.

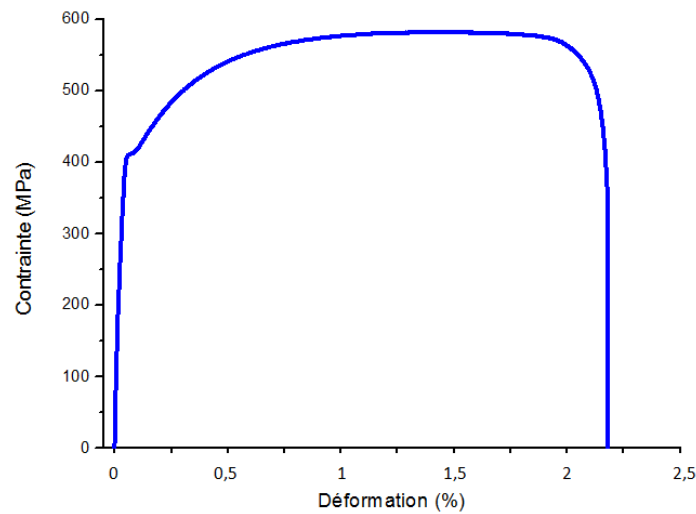


Figure 68 : Courbe typique charge – déplacement d'une éprouvette –ALT- ACIER.

Les caractéristiques mécaniques (Tableau 13) du métal de base tel que, la limite élastique R_e , la résistance à la traction R_m , la déformation ϵ et le module de Young E ont été obtenus à partir de la courbe de la figure 68.

Re [MPa]	Rm [MPa]	E [MPa]	ϵ [%]
410.12	580.22	21031.79	0.195

Tableau 13 : Propriétés mécaniques du métal de base.

III.3.2. Essais de traction-cisaillement sur les éprouvettes soudées

Les éprouvettes utilisées ont été préparées suivant les indications de la figure 69. La charge et le déplacement ont été simultanément enregistrés pendant l'essai de traction (figure 70).

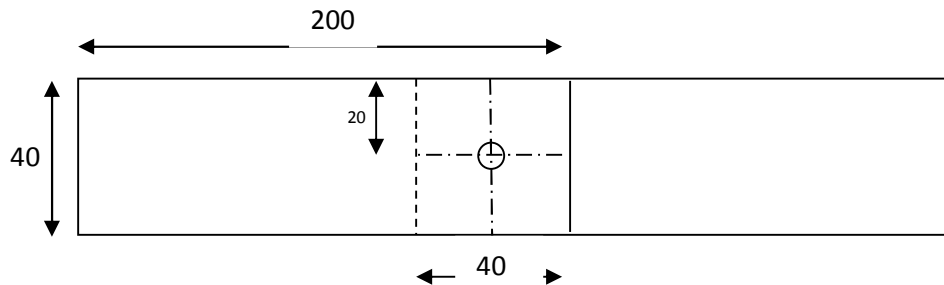


Figure 69 : géométrie des éprouvettes utilisées pour les essais de traction-cisaillement.

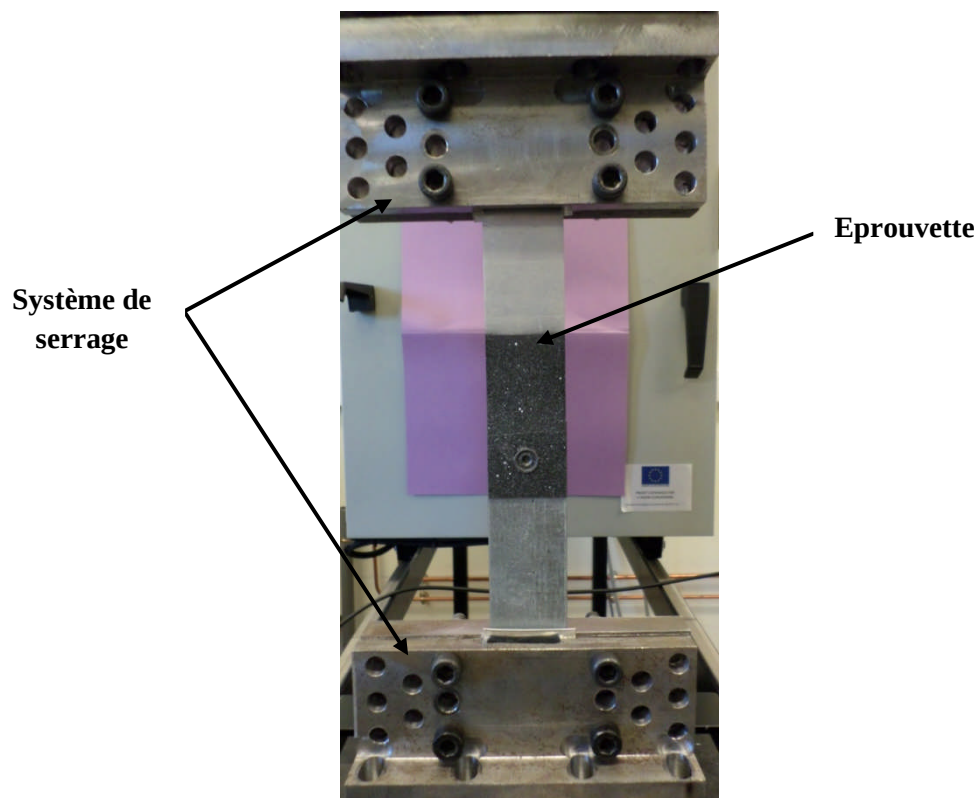


Figure 70 : Essai de traction d'une éprouvette soudée par FSSW (université de lille1-France).

III.3.2.A. Assemblage avec un point

La figure 71 montre une courbe typique charge-déplacement d'une soudure par point par friction malaxage soudé avec une vitesse de pénétration constante (16 mm/min) ainsi que la distance de pénétration de 2,55 mm. On constate, sur cette courbe, que le joint soudé avec $\omega = 1400$ tr/mn donnent la meilleure résistance à la traction avec une charge 1810 N. La plus faible est obtenue pour $\omega = 1000$ t/mn.

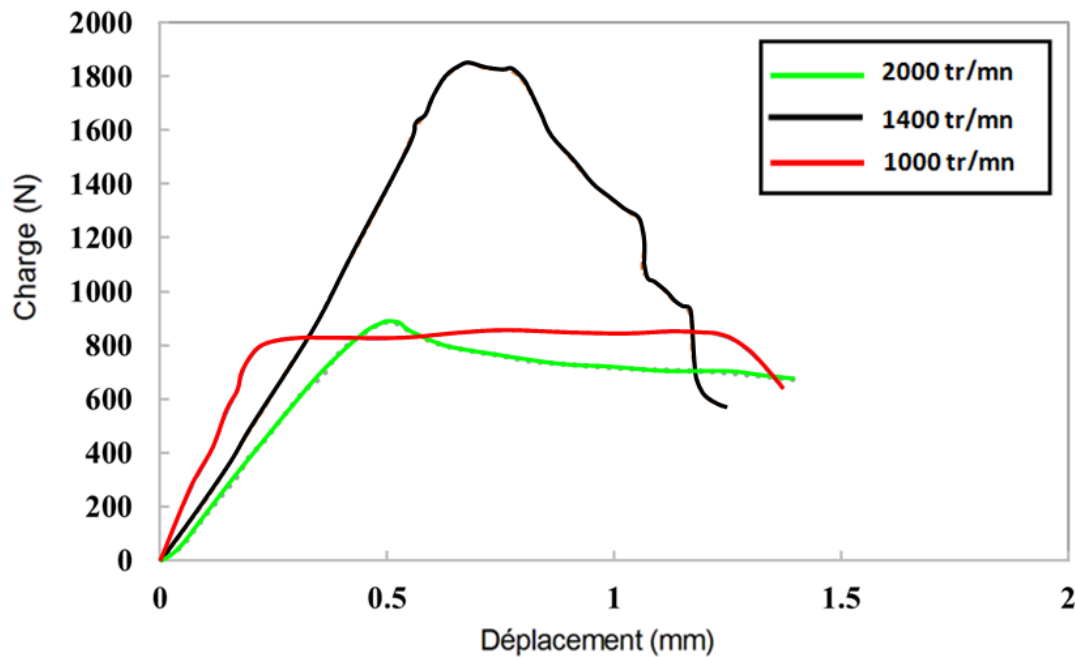


Figure 71 : Courbe typique charge – déplacement (assemblage avec 1 point).

La figure 71 présente les courbes de cisaillement en traction (charge-déplacement) de la structure soudée par assemblage par soudage par points par friction-malaxage (FSSW) utilisée pour optimiser les paramètres de processus tels que D_p et ω . La figure 71 présente la résistance au cisaillement en traction (charge-déplacement) de la structure soudée selon une profondeur de pénétration fixée à 2,55 mm et à trois vitesses de rotation différentes ($\omega = 1000, 1400$ et 2000 tr / min). Il est évident d'après la figure que les propriétés mécaniques sont meilleures pour la vitesse de rotation de $\omega = 1400$ tr / min. Les échantillons de $\omega = 1400$ tr / min présentaient une capacité portante beaucoup plus élevée à 1850 N pour un déplacement de 0,7 mm et la fracture finale s'est produite à un déplacement de 1,45 mm. La courbe pour les échantillons de $\omega = 2000$ tr / min présentait des propriétés médiocres, avec un point limite d'élasticité à une portance maximale de 825 N pour un déplacement de 0,49 mm et une rupture au déplacement maximal de 1,41 mm. Les

échantillons de $\omega = 1000$ tr / min ont montré une charge maximale de 835 N, ce qui n'était pas très éloigné des échantillons de 2000 tr / min.

➤ **L'influence de la profondeur de pénétration sur la tenue mécanique des joints de soudure**

La figure 72 montre une courbe typique charge-déplacement pour des soudures par point par friction malaxage réalisé avec une vitesse de 1400 tr/min avec différents profondeurs de pénétration. On constate que les paramètres $\omega = 1400$ tr/mn et $D_p = 2.61$ mm donne la meilleure résistance à la traction et la plus faible est obtenue pour $D_p = 2.37$ mm .On a observé dans la courbe en rouge du point de soudure réalisé avec une distance de pénétration $D_p=2,71$ mm que malgré cette pénétration importante le point de soudure n'a pas donné une bonne résistance à la traction-cisaillement.

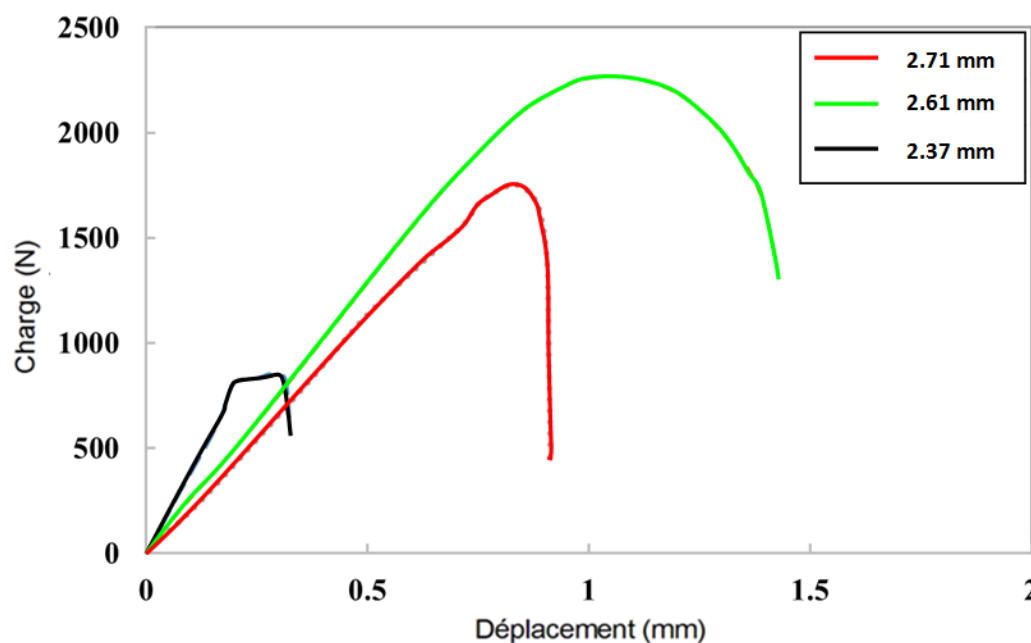


Figure 72 : courbe typique charge - déplacement (assemblage avec 1 point)
Soudée avec une vitesse de 1400 Tr/min avec différents distance de pénétration.

Clairement, le $\omega = 1400$ tours par minute donne les meilleures propriétés mécaniques. En maintenant $\omega = 1400$ tr / min constante, la D_p a été optimisée comme indiqué à la figure 72. Avec un point de départ de 2,55 mm de profondeur de pénétration, nous avons appliqué la profondeur de pénétration entre $D_p = 2,37$ à 2,71 mm. Comme le montre la figure, la profondeur optimale avoisinant 2,61 mm présentait l'allongement maximal de 0,4 mm à la charge de traction maximale de 2030 N. Les profondeurs de pénétration de 2,31 et 2,71 se sont révélées inadéquates avec de très mauvaises propriétés mécaniques.

III.3.2.B. Assemblage avec 2 points de soudure horizontaux (2pH) et 2 point verticaux (2pV)

Les courbes de traction dans la figure 74 montre que la charge appliquée sur l'éprouvette (Ep1) et assez importante et donne une bonne résistance du point de soudure par rapport à celle de (Ep2).

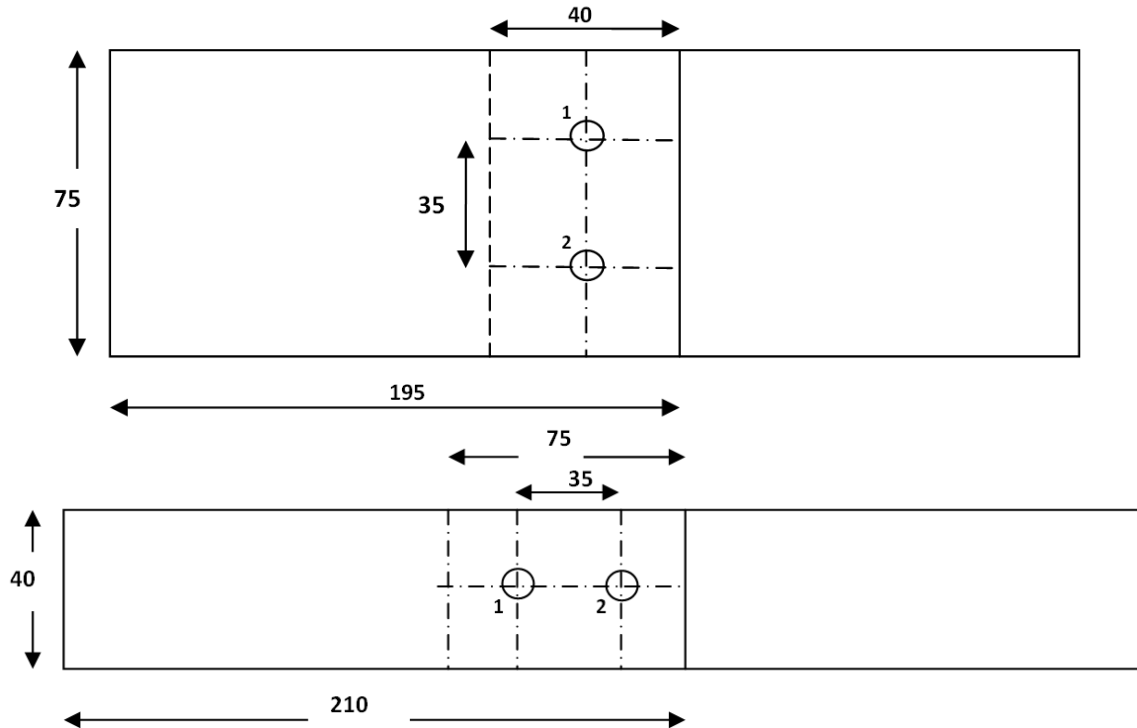
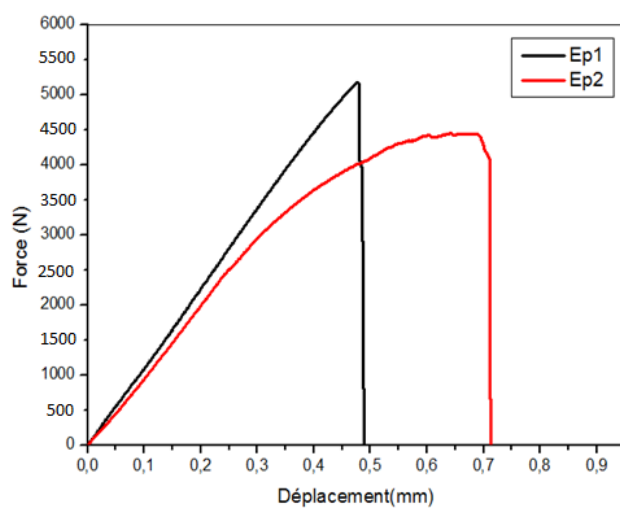
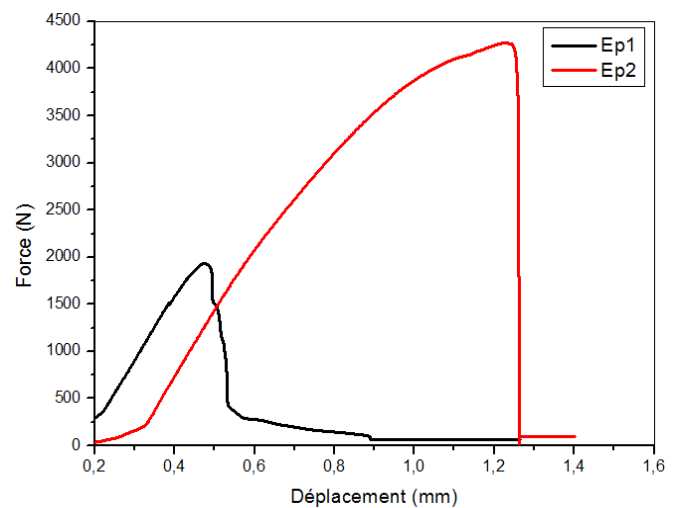


Figure 73 : dimensions des éprouvettes soudées par FSSW avec (2 pH) et (2 pV).



(A) 2PH



(B) 2PV

Figure 74 : (A) courbe typique charge - déplacement (assemblage avec 2 point horizontaux) (Ep1= 2.4 mm ; Ep2 = 1.9 mm) (B) (Ep1= 1.9 mm ; Ep2 = 2.4 mm).

III.3.2.C. Influence des paramètres de soudage

➤ Evolution de la tenue mécanique en fonction de la vitesse de rotation et la distance de pénétration

La résistance mécanique des points soudés par FSSW est en fonction des paramètres choisis, à savoir la vitesse de rotation, ainsi que la distance de pénétration. Pour l'ensemble des essais effectués et avec des plaques soudées à différents paramètres, Les courbes de la figure 75 montrent que la charge est maximale pour une vitesse de rotation de 2000 tr/min, elle commence à diminuer jusqu'à atteindre une valeur minimale a la vitesse de rotation 1000 tr/min. Et les courbes de la figure 76 montrent que plus la pénétration augmente, plus la charge maximale augmente.

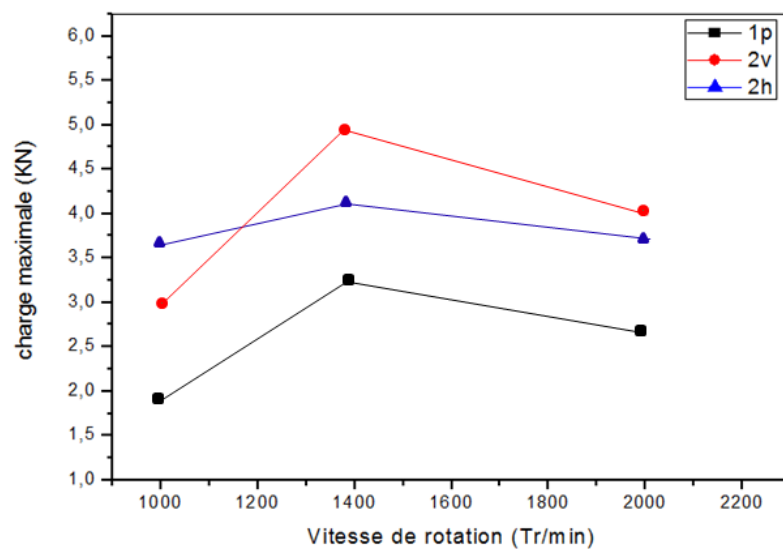


Figure 75 : Effet de la vitesse de rotation sur la tenue mécanique en traction-cisaillement.

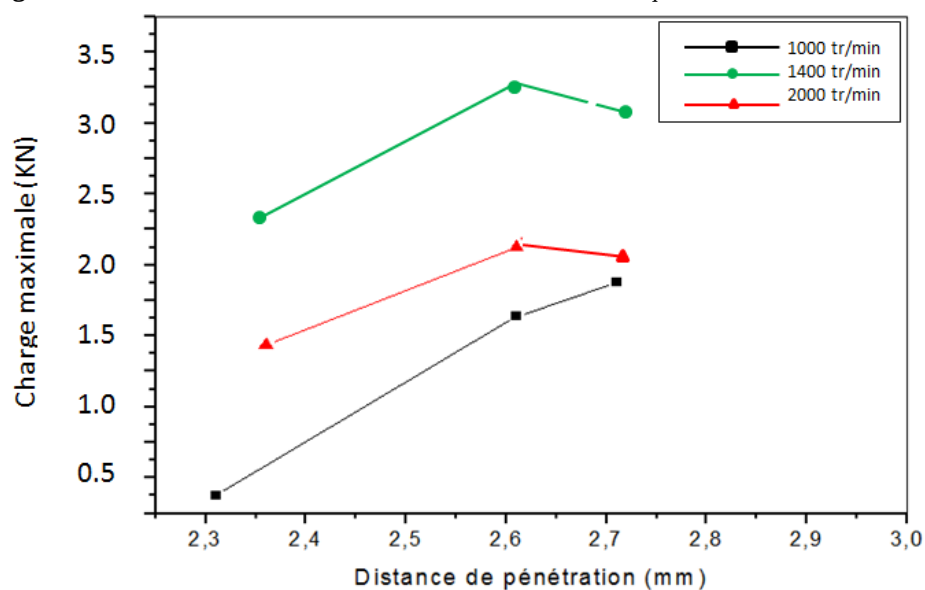


Figure 76 : Effet de la Distance de pénétration sur la tenue mécanique en traction-cisaillement.

III.3.2.D. Mesure de température

Nous avons réalisé des mesures de température en fonction des paramètres de soudage par thermocouple qui est placée approximativement sous le centre de la zone de malaxage comme le montre le schéma suivantes (figure 77).

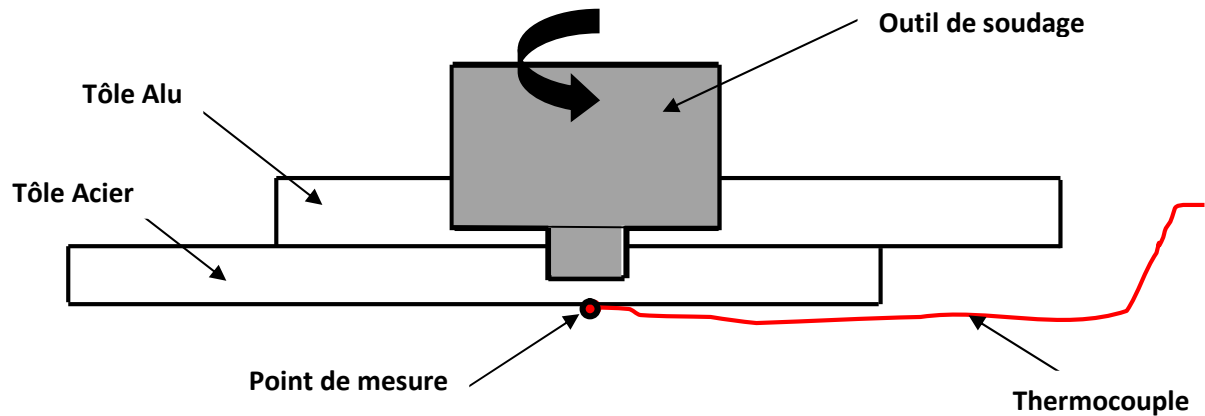


Figure 77 : Positionnement de thermocouple sous le centre du point de soudure

- Le tableau 14 représente les paramètres utilisés pendant les mesures de l'évolution de la température en fonction de différents vitesses de rotation suivantes ($\omega = 1000$; 1400 et 2000 tr/mn) et les distances de pénétration ($D_p = 1,9$; 2,2 et 2,6mm) avec une Vitesse de pénétration V_p dans la matière constante et égale à 16 mm/min.

Distance de pénétration (mm)	Vitesse de rotation (tr/min)	Température (C°)
1,9	1000	110
	1400	213
	2000	260
2,2	1000	175
	1400	281
	2000	322
2,6	1000	287
	1400	360
	2000	455

Tableau 14 : Les paramètres utilisés pendant les mesures de température.

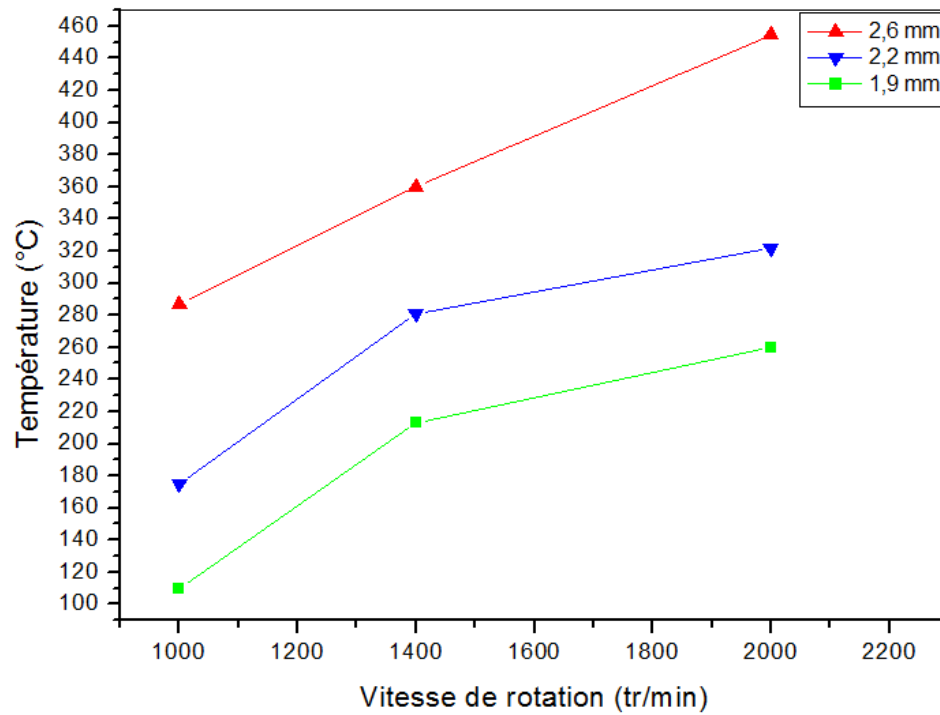


Figure 78 : l'évolution de la température en fonction de la vitesse de rotation.

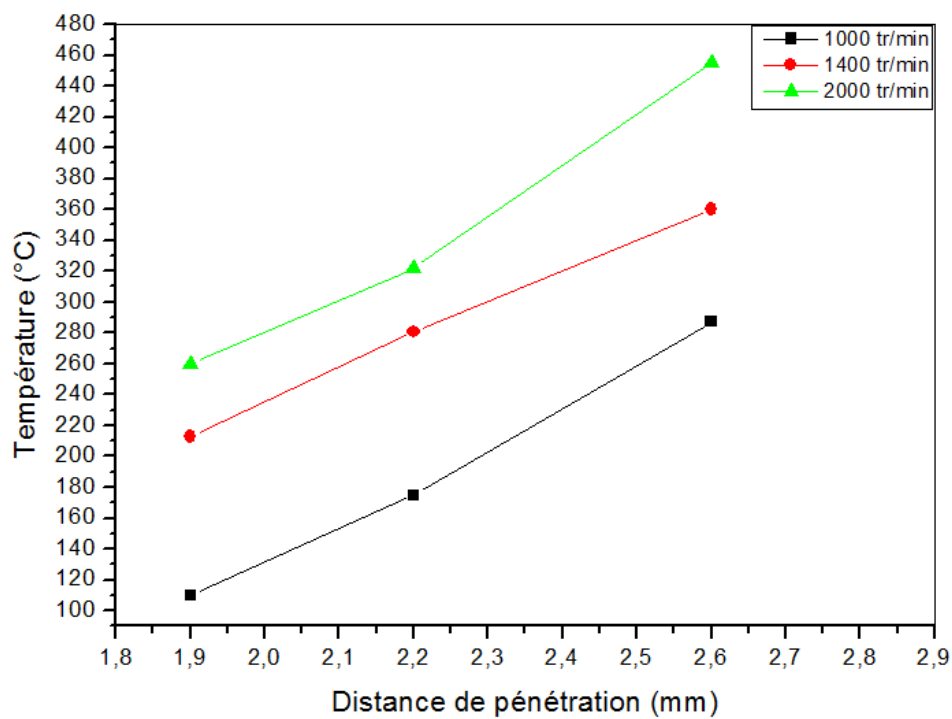


Figure 79 : l'évolution de la température en fonction de la distance de pénétration.

➤ Les courbes précédentes représentent l'évolution de la température pendant le soudage par point par friction malaxage (FSSW) entre Aluminium/acier en fonction de la vitesse de rotation (figure 78) et la distance de pénétration (figure 79), les mesures prises sous le centre de malaxage avec une distance de 1,5 mm et une pénétration de 1,9 mm montrent que la valeur de la température est maximale (260 °C) pour le couple (16 mm/min, 2000 tr/min) et la plus faible (110 °C) est estimée pour le couple (16 mm/min, 1000 tr/min). Pour des mesures prises sous le centre de malaxage avec une distance de 1,2 mm avec une pénétration de 2,2 mm, la température est maximale (322 °C) pour le couple (16 mm/min, 2000 tr/min) la plus faible (175 °C) est estimée pour le couple (16 mm/min, 1000 tr/min) et Pour des mesures prises sous le centre de malaxage avec une distance de 0,8 mm avec une pénétration de 2,6 mm, la température est maximale (455 °C) pour le couple (16 mm/min, 2000 tr/min) la plus faible (287 °C) est estimée pour le couple (16 mm/min, 1000 tr/min).

III.3.2.E. Les essais de traction : avec (EA) et (DIC) :

III.3.2.E.1. Technique de corrélation d'images digitales (DIC)

Il s'agit de calculer le champ de déformations par inter corrélation directe d'images numérisées de mouchetis. Un mouchetis est l'ensemble de petites tâches disposées de façon aléatoire sur la surface à étudier. On filme un essai avec une caméra, puis on traite les données à l'aide du logiciel Davis version 8.0, ce dernier nous fournira après traitement une cartographie planaire des points. On compare chaque image, successivement enregistrée, par la première image (référence) et on mesure pour chaque point la distance qu'il a parcourue entre t_0 et t_1 . « La Vision » possède des caractéristiques identiques que les caméras haute résolution tout en étant plus compacte.

- Haute résolution de 5 millions de pixels
- Enregistrement rapide jusqu'à 30 photos/s
- Obturateur électronique jusqu'à 100 ns
- Sensibilité UV jusqu'à 300 nm.

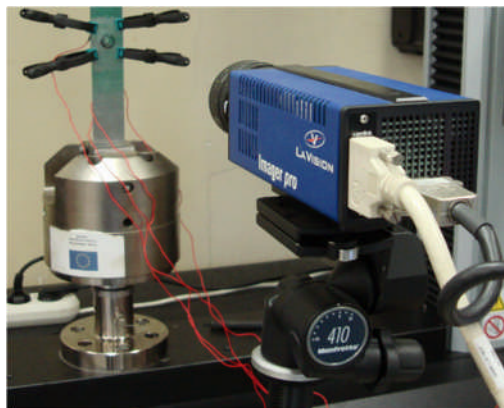


Figure 80 : Matériel utilisé pour la corrélation d'images digitales.

Dans cette partie, nous présentons une analyse basée sur le suivi des champs de déplacement et le champ de déformation par la technique CID (Corrélation d'Images Digitales en français ou DIC technique en Anglais : Digital Image corrélation) et sur l'évolution des activités acoustiques, afin de mieux cerner les différentes phases d'endommagement d'un assemblage soudé par FSSW. On repèrera, dans un premier temps, des points caractéristiques qui permettent de faire la distinction entre des zones d'activités et l'on essaiera, dans un deuxième temps, de donner une signification physique à ces différentes phases.

Dans le cadre de cette étude, un mouchetis a été projeté sur la zone d'étude de l'éprouvette permettant d'obtenir des gains noirs et blancs d'un diamètre moyen de 30 μm . La surface de l'échantillon est éclairée en lumière blanche synchronisée et les images sont numérisées et stockées tout au long de l'essai grâce à une caméra rapide et un disque dur raid et bus spécifique. La caméra utilisée est du type Imager Compact fournie avec le logiciel DaVis®. Elle est la plus petite des caméras de la famille Imager Compact de « LaVision » qui possède des caractéristique identiques de dynamique et de résolution que les caméras de grandes tailles classiques de chez « LaVision » tout en étant plus compacte. Ces caractéristiques sont les suivantes :

- haute résolution avec 5 millions de Pixels
- afficheur rapide jusqu'à 30 photos /s,
- obturateur électronique jusqu'à 100 ns pour le déclenchement rapide,
- double mode d'armature disponible pour acquérir deux images,
- sensibilité UV jusqu'à 300 nm.



Figure 81 : Caméra « LaVision » de type « Imager Lite ».

- trois objectifs standards délivrés par « LaVision » qui permettent d'obtenir une image globale ou plus fine de l'éprouvette,- un objectif « Nikon » monté avec un soufflet qui permet de faire des zooms importants sur l'éprouvette (pour une étude locale).

Nous avons utilisé l'objectif standard (focale de 35 mm).

Comme la plupart des systèmes de mesure, une première étape essentielle consiste à calibrer le dispositif. Lors des essais, la caméra doit être correctement placée pour permettre une bonne mise au point (netteté) et une prise d'image perpendiculaire à la zone à étudier d'une numérisation (après traitement) réussie.

Une zone d'étude ou masque (partie qui sera traitée) et doit être renseignée pour le traitement des images. Ce masque peut avoir différentes formes permet de s'intéresser à une zone locale bien déterminée. L'avantage d'une telle opération est d'une part l'amélioration des résultats de calcul découpage plus fin est plus précis de l'image), d'autre part, un gain de temps très important (une partie de l'éprouvette est étudiée). Dans notre cas, on s'intéresse au point de soudure et au matériau de base. La Figure 82 illustre le détail de cette zone étudiée.

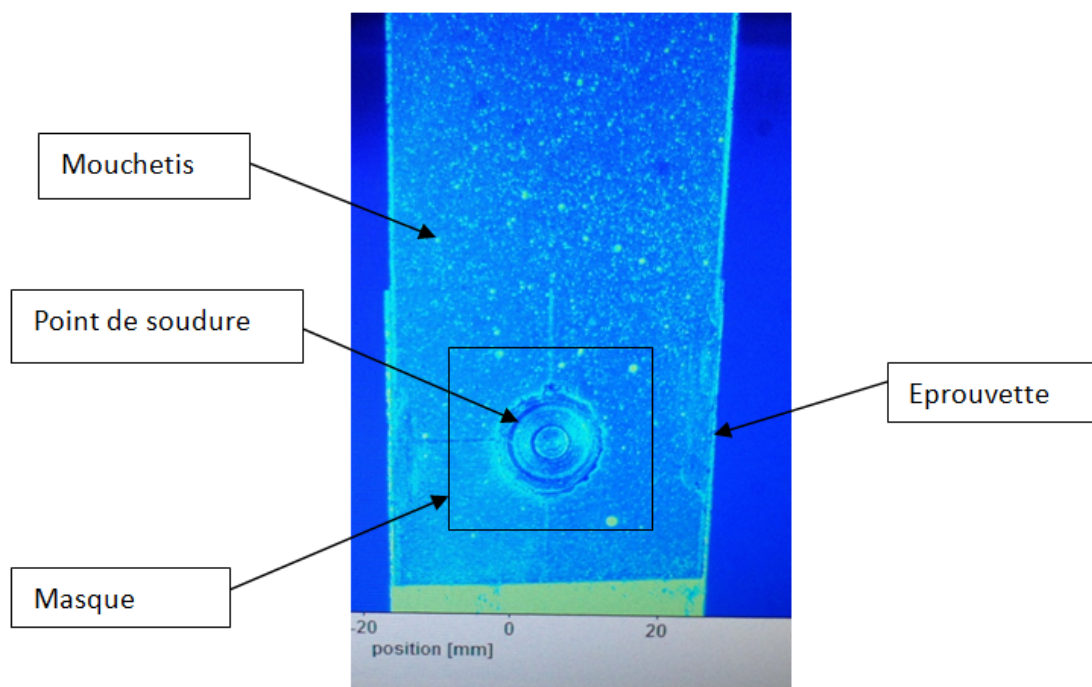


Figure 82 : Définition du masque sur une éprouvette soudée par fssw.

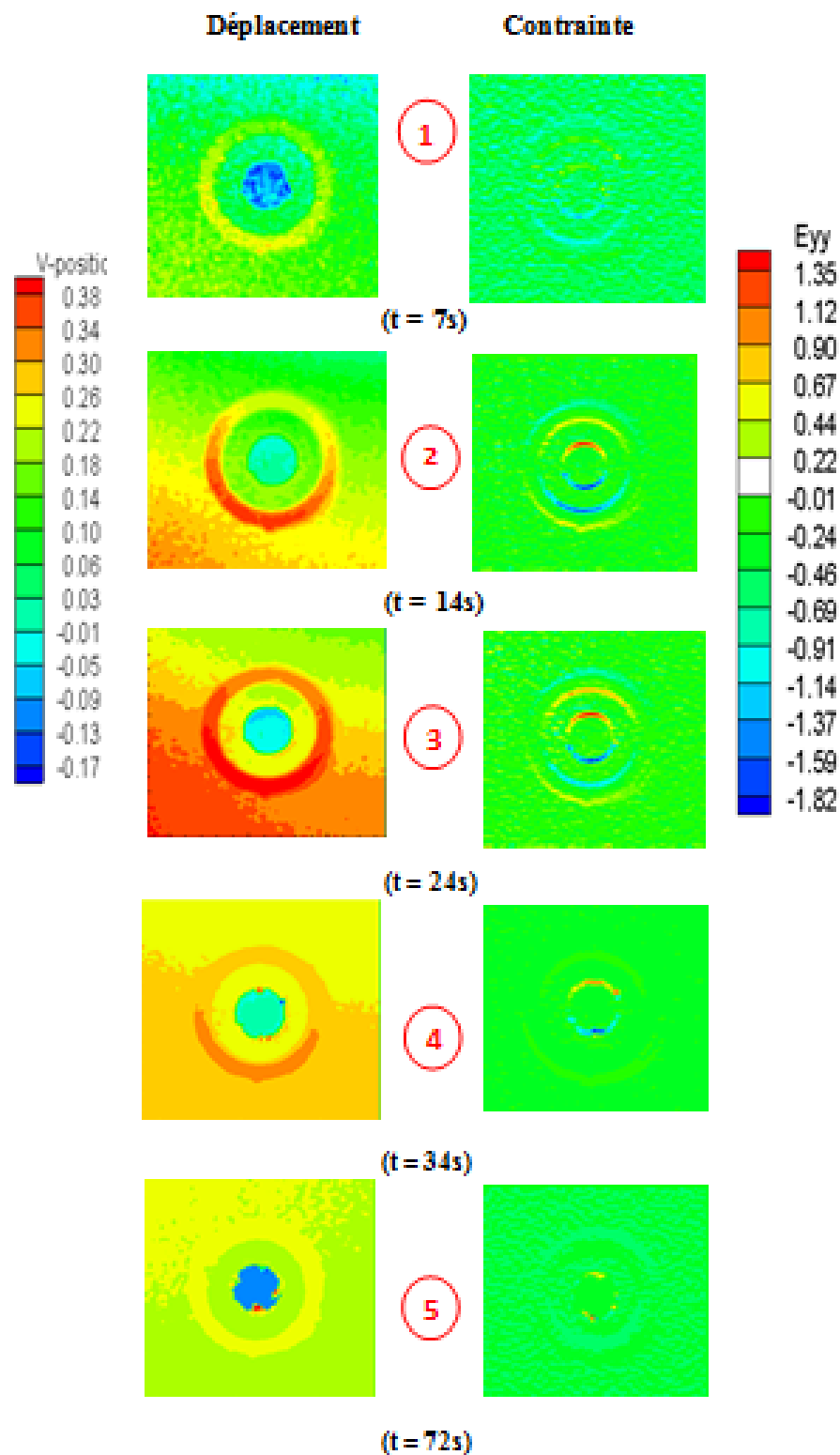


Figure 83 : Illustration de champs de déplacement et les champs de déformation d'une éprouvette soudée par fssw durant un essai de traction-cisaillement avec CID.

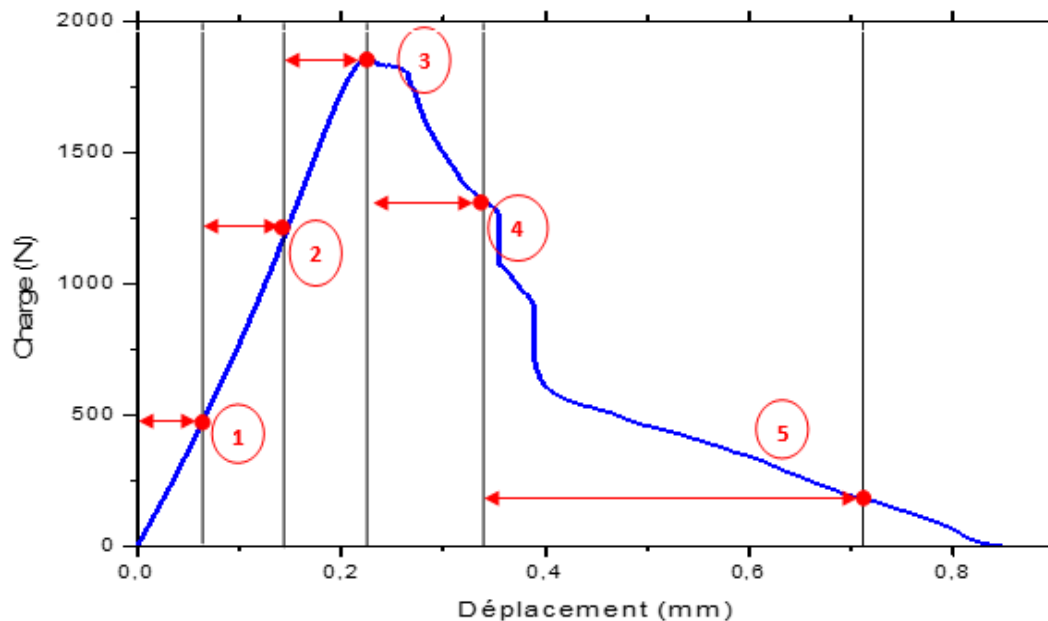


Figure 84 : courbe de traction-cisaillement sur une éprouvette soudée par fssw.

La figure 83 illustre les champs de déplacement et les champs de déformation différents instants. Ces instants sont désignés dans la courbe de traction – cisaillement dans la figure 84. Ces images nous illustrent la chronologie de notre essai de traction, le sens de traction est vers le haut. Le point de soudure soudée par point par friction malaxage (FSSW) est au milieu de l'éprouvette. C'est dans cette zone que les déplacements et les champs déformation sont les plus importants. D'autres résultats de CID sont présentés dans l'annexe.

III.3.2.E.2. Essais de traction avec la Technique d'Emission Acoustique (EA)

Il s'agit d'une technique permettant d'étudier les phénomènes de libération d'énergie sous forme d'ondes élastiques (figure 85) transitoires résultant des micro déplacements locaux internes au sein d'un matériau soumis à des sollicitations. Dans cette partie de recherche, nous l'avons adopté pour :

- Identifier les différentes phases de comportement de l'assemblage soudé (élasticité, plasticité, endommagement,...), pour tenter d'établir le processus chronologique de ces phases de comportement. Il existe plusieurs paramètres à traiter mais on a jugé nécessaire d'étudier que les suivants : l'amplitude, l'énergie, la vitesse, le nombre de coups, le nombre des salves et la durée. Leurs exploitations nous permettent d'établir des signatures acoustiques déterminant la chronologie du processus d'endommagement ainsi que les frontières entre toutes les phases existantes.

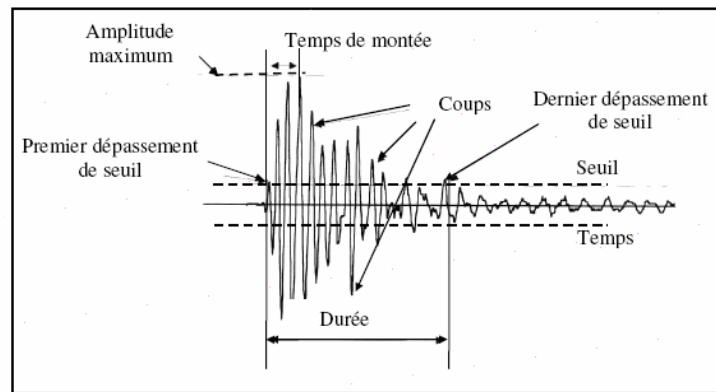


Figure 85 : Les paramètres d'onde acoustique sur une salve

- En localisant l'origine des événements, le logiciel d'émission acoustique VALLEN permet la détection du point d'amorçage. Il faut signaler que l'utilisation des capteurs est primordiale ainsi que leurs position exacte sur l'éprouvette afin que le logiciel puisse se référer pour suivre la vitesse de propagation d'ondes afin d'en déduire la distance entre l'événement et le capteur.

- Elaboration des événements

Un événement (figure 86) est un groupe de salves qui naît d'une même source. La construction de cet élément est bâtie sur trois critères temporels qui sont renseignés par l'utilisateur. Après ce filtrage un événement sera caractérisé par une famille de salves avec indication des capteurs qui ont eux-mêmes identifiés les salves.

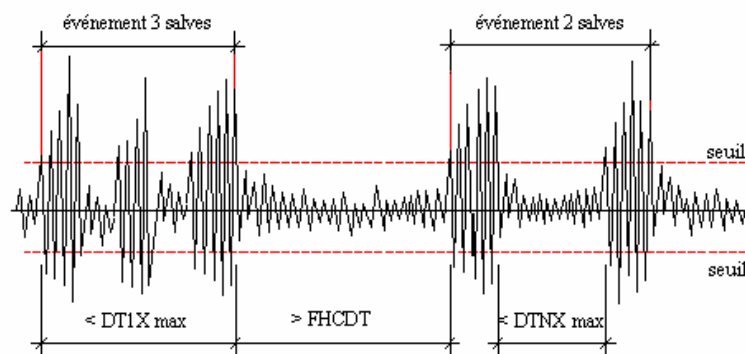


Figure86 : Détermination d'un événement.

Grâce à cela, nous pouvons déterminer à quel moment et où se passe l'amorçage et suivre les localisations au fil du temps.

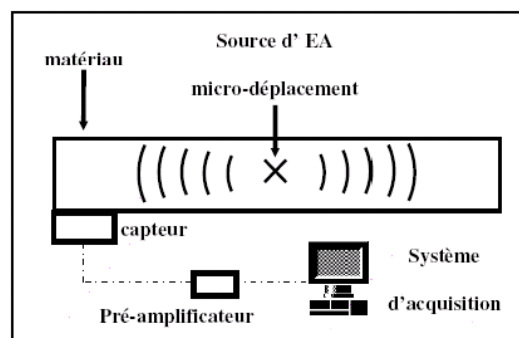


Figure 86 : Principe d'acquisition d'émission acoustique et capteurs.

Lorsqu'un matériau, qui présente un défaut, est soumis à une variation de contrainte et si ce défaut évolue sous l'effet de cette sollicitation, ce défaut devient source d'EA en donnant naissance à des ondes élastiques transitoires, qui se propagent au sein du matériau. Cette énergie libérée par vibration se nomme onde élastique transitoire ultrasonore (de l'ordre du nanomètre et d'une gamme de vitesse de l'ordre de 150 kHz).

La détection des signaux d'EA appelés salves, permet de déceler en temps réel l'existence d'un défaut évolutif. Cependant, l'EA ainsi générée est irréversible. Si la structure est de nouveau sollicitée, aucune activité ne sera détectée jusqu'à ce que le niveau de contrainte dépasse celui atteint précédemment : c'est l'effet Kaiser. Par ailleurs, lorsqu'une structure est sollicitée à intervalles réguliers au même niveau de contrainte, l'EA détectée caractérise la propagation des défauts dans les conditions de service entre les deux cycles de sollicitation. L'exploitation de l'effet Kaiser constitue la base d'un contrôle non destructif périodique. Pour un événement (évolution unitaire d'une source d'EA donnant lieu à plusieurs salves), la mesure des différents temps d'arrivée des salves détectées par plusieurs capteurs, permet de calculer la localisation de la source d'EA selon des algorithmes bien connus de triangulation en deux dimensions ou trois dimensions.



Figure 87 : Essai de traction-cisaillement avec le dispositif de l'émission acoustique.

D'après les essais de traction – cisaillement effectué sur une éprouvette soudée par fssw avec la technique de l'émission acoustique EA pour détecter et caractériser la propagation des défauts dans les conditions de sollicitation. L'exploitation des résultats est présentée dans les figures suivantes :

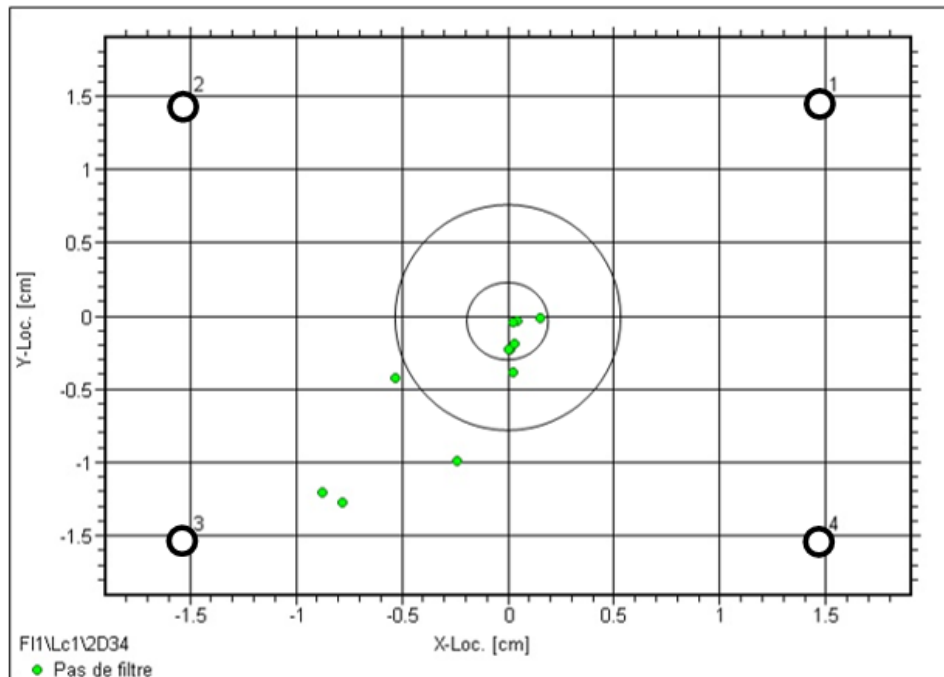


Figure 88 : Localisation des signaux détectés par les Capteurs 1,2 ,3 et 4.

La figure 88 montre l'origine des événements détectés par le logiciel d'émission acoustique VALLEN durant les essais de traction-cisaillement sur une éprouvette soudée par fssw qui permet la détection des points d'amorçage. D'après cette figure on observe que les points d'amorçage sont détectés par les capteurs 1, 2, 3 et 4 au niveau du joint de soudure ce qui signifie que le matériau au niveau du joint présente un défaut qui est soumis à une variation de contrainte et si ce défaut évolue sous l'effet de cette sollicitation en donnant naissance à des ondes élastiques transitoires, qui se propagent au sein du matériau.

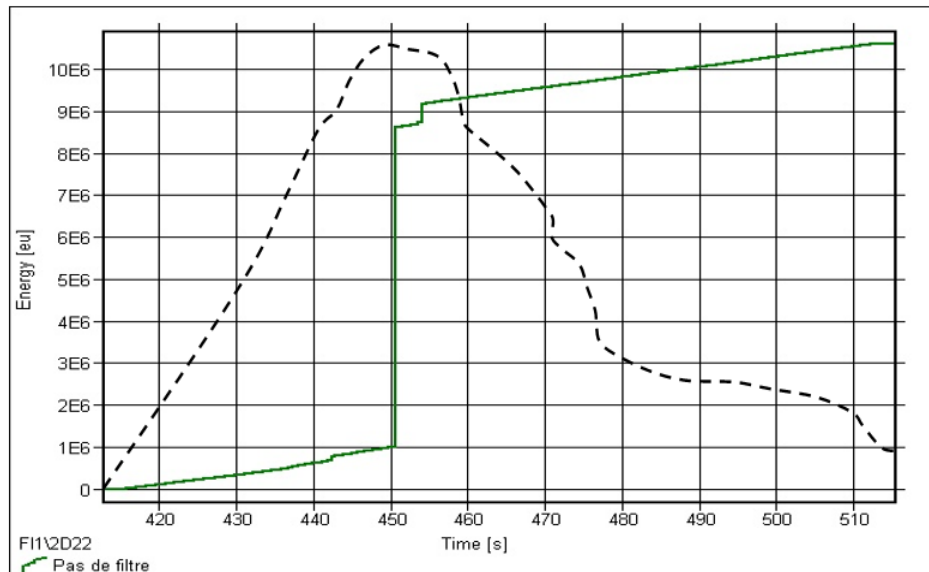


Figure 89 : Energie libérée détecté durant l'essai de traction-cisaillement.

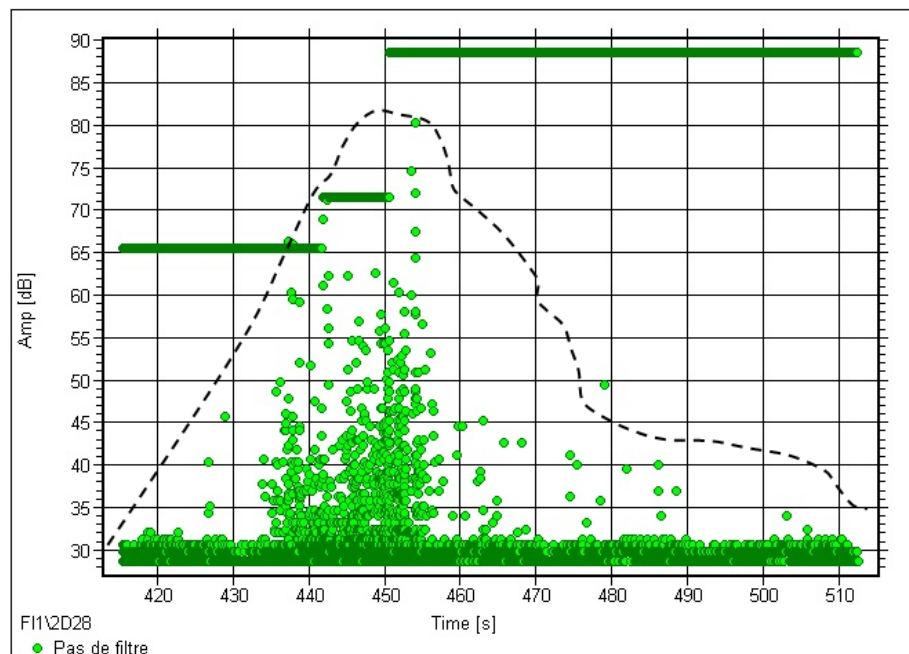


Figure 90 : Amplitude détecté durant l'essai de traction-cisaillement.

Cette technique nous a permis d'étudier les phénomènes de libération d'énergie sous forme d'ondes élastiques transitoires résultant des micro déplacements locaux internes au sein du matériau soumis à sollicitation traction-cisaillement. Dans le cadre de ce stage de recherche, nous l'avons adopté pour identifier les différentes phases de comportement de l'assemblage soudé

(élasticité, plasticité, endommagement,...), pour tenter d'établir le processus chronologique de ces phases de comportement. Il existe plusieurs paramètres à traiter mais on a jugé nécessaire d'étudier que les suivants : l'amplitude (figure 89) et l'énergie (figure 90). Leurs exploitations nous permettent d'établir des signatures acoustiques déterminant la chronologie du processus d'endommagement en fonction de la courbe de traction ou l'amplitude et l'énergie sont maximal au moment où la force maximale a la traction et maximale (limite élastique).

CHAPITRE III

ANALYSES

MICROSTRUCTURALES

III. L'évolution de la microstructure en fonction des paramètres de soudage

Pendant le soudage par FSSW, la matière est soumise à des températures élevées et des déformations importantes lors du soudage. La microstructure va donc subir des changements que nous allons ici identifier (évolution de la matière du joint, morphologie des grains.....). A partir de ces observations, nous allons essayer de s'appuyer sur les évolutions de la microstructure ainsi que de la micro dureté dans la soudure, nous délimiterons les différentes zones affectées thermo et/ou mécaniquement des soudures. En effet, comme toute autre technique de soudage, il est intéressant de pouvoir différencier les zones qui composent la soudure, afin d'évaluer l'étendue de la microstructure affectée par le procédé, nous allons maintenant tenter de comprendre le lien entre ces paramètres microstructuraux et la tenue mécanique des points.

III.1. L'influence de la vitesse de rotation et la distance de pénétration

Dans cette phase on va entamer une étude macro et microscopique en utilisant un microscope optique à balayage (Olympus AX70) (UMET, Lille, France) (Figure 90), sur trois joints soudés par FSSW avec différents vitesse de rotation et la distance de pénétration (échantillon A, B et C) ainsi que la méthode de découpage des échantillons (figure 91), les paramètres de soudage utilisé pour ces trois échantillons sont présentés dans le (tableau 15),



Figure 90 : Microscope optique à balayage utilisée (MEB, Olympus AX70).

En ce qui concerne l'assemblage hétérogène (Alu/Acier), la rhéologie des deux matériaux est différente. Par conséquent, le flux de matière va différer de celui de l'assemblage homogène. Pendant la rotation de l'outil dans les tôles, il n'y a pas de malaxage entre les deux matériaux, mais une remontée de l'acier dans l'aluminium. Ce phénomène entraîne la formation d'une accroche d'acier dans l'aluminium, qui permet notamment la liaison mécanique entre les deux tôles (Figure 91). Il peut donc être supposé que les dimensions de ces accroches vont être étroitement liées à la tenue mécanique des points de soudure d'après le tableau 15.

Echantillon	ω , tr/min	Dp, mm	F max, N
A	1000	1.9	700
B	1400	2.6	2950
C	2000	2.7	1600

Tableau 15 : Paramètres utilisé pour le soudage par FSSW.

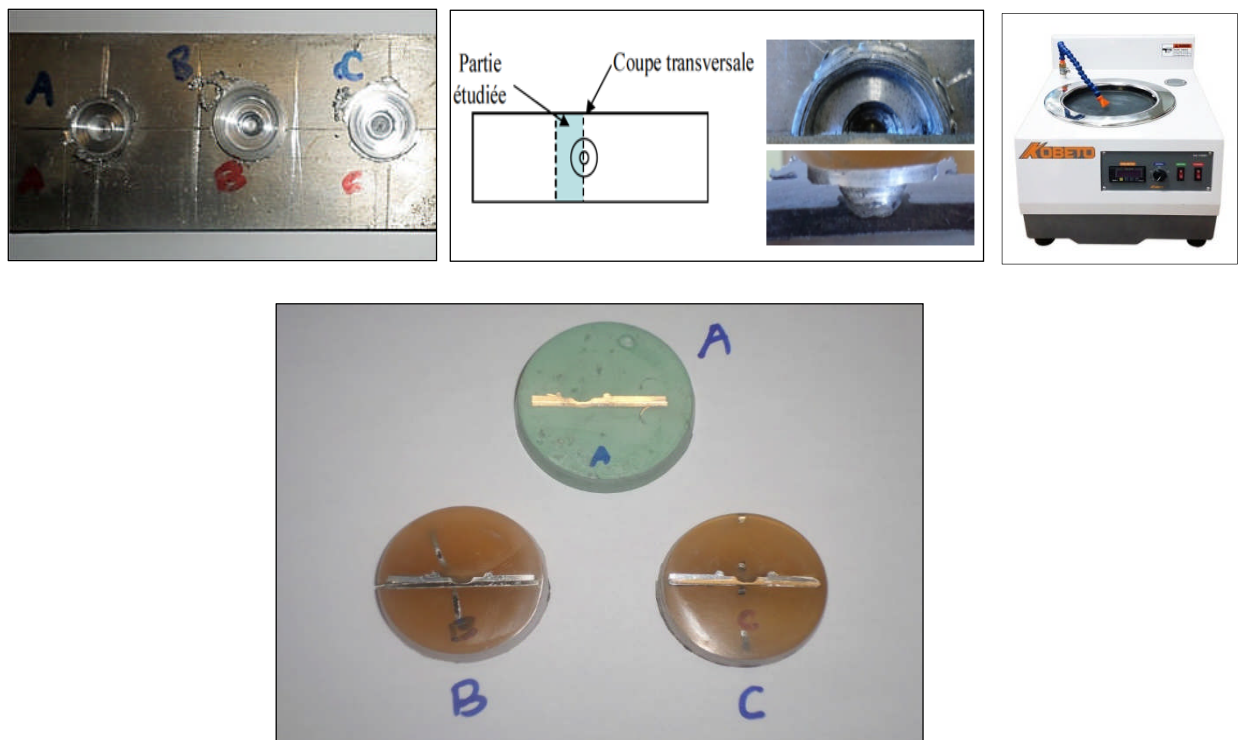


Figure 91 : Méthode de découpage et préparation des échantillons (A, B et C).

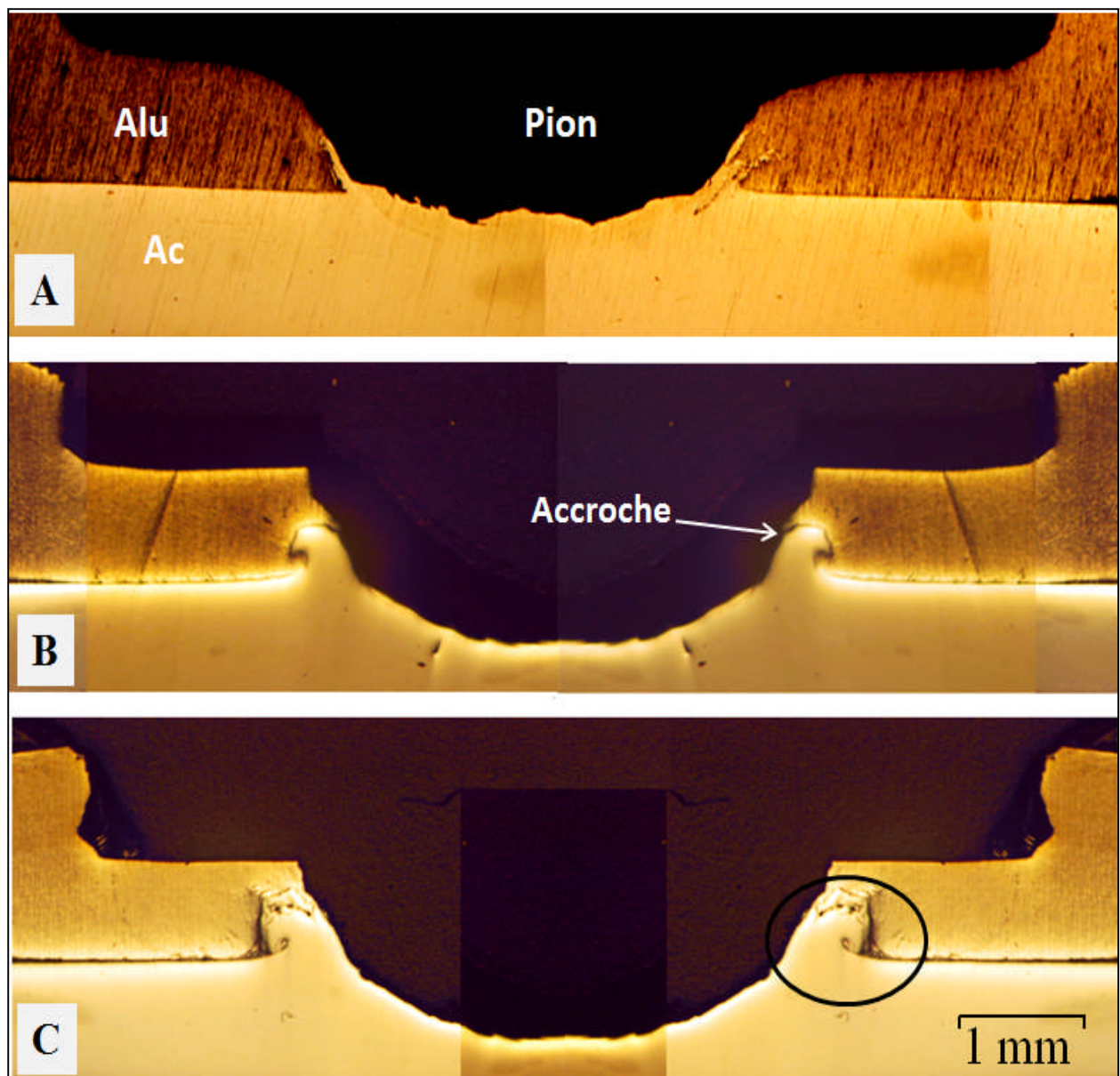


Figure 92 : Macrographie des trois profils de crochée à différentes paramètres de soudage.

Le tableau qui montre la tenue mécanique en fonction des paramètres de soudage des joints de soudure soudée par FSSW (échantillon A, B et C) représenté dans la figure 92 met bien en évidence que plus l'accroche est importante, plus la tenue mécanique s'améliore. Le lien est indéniable. Il faut donc dans un premier temps une accroche suffisamment grande pour avoir une bonne tenue mécanique. Pour retarder une possible décohésion entre la tôle d'aluminium et

l'accroche d'acier, mais d'après le tableau 15 qui montre que la tenue mécanique de l'échantillon B est supérieur à celle de l'échantillon C malgré que la taille de ce dernier est plus importante que l'échantillon B d'après la figure 92. Donc il est préférable de faire une étude sur la nature de ces accroches.

III.2. Essai de micro dureté (Vickers)

III.2.1. Principe : La mesure de dureté Vickers est effectuée à l'aide d'une pointe pyramidale normalisée en diamant de base carrée et d'angle au sommet entre faces égal à 136° . L'empreinte a donc la forme d'un carré ; on mesure les deux diagonales d_1 et d_2 de ce carré à l'aide d'un appareil optique. On obtient la valeur d en effectuant la moyenne de d_1 et d_2 . C'est d qui sera utilisé pour le calcul de la dureté. La force et la durée de l'appui sont également normalisées [10].



Figure 93:Microduromètre Utilisée (Struers Duramin).

Les mesures effectuées lors de cette étude sont effectuées à l'IUT – CREST de Villeneuve d'Ascq à Lille – France - en utilisant une machine de marque struers (DURAMIN) (figure 93).

III.2.2.Exploitation des résultats

Une prise d'empreintes est réalisée sur nos échantillons A, B et C représenté dans la figure 92 avec un pas de 0,1 mm suivant X et une force $F = 980 \text{ mN}$ avec un temps $T = 15 \text{ S}$. Il s'agit de balayer tout le long de nos éprouvettes assemblées (aluminium/acier) par FSSW. la méthode utilisée pendant nos essais et représenté dans le schéma suivant (figure 94).

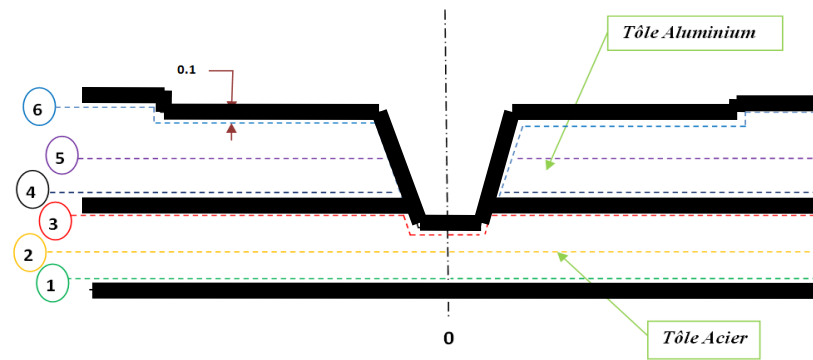


Figure 94: Représentation schématisée des zones testées pendant l'essai de micro dureté.

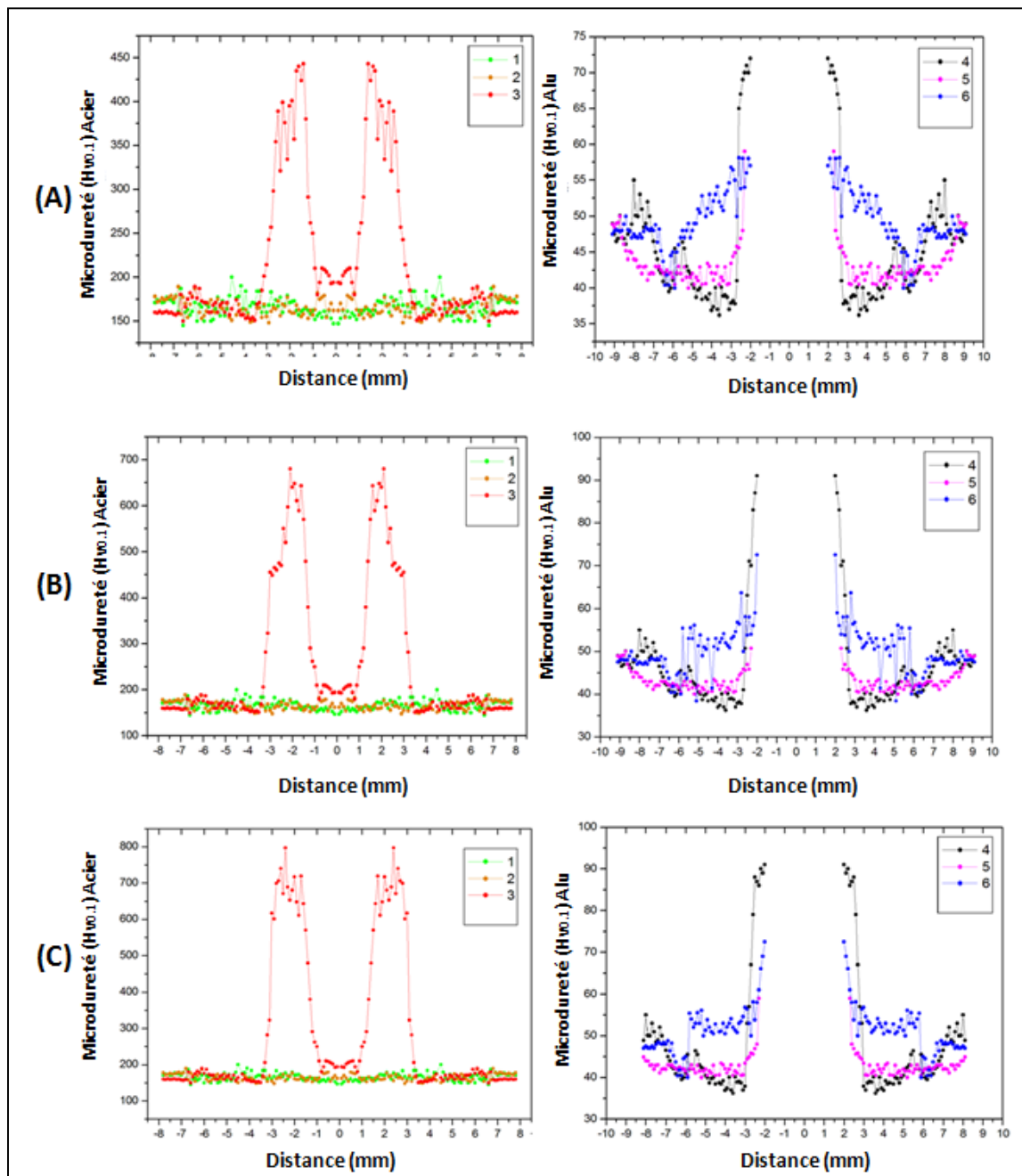


Figure 95: représentation graphique des résultats de dureté sur les échantillons A, B et C.

La figure 95 Montre la variation de la micro dureté de toutes les zones sur les échantillons A, B et C. Des valeurs minimum de dureté dans l'acier ont été trouvées aux régions de ZAT / ZATM avec des valeurs changeant de 150 HV0.1 à 245 HV0.1 et des valeurs maximal sous forme de pic ont été trouvées aux régions de ZM au niveau des accroches avec des valeurs changeant de 250 HV0.1 à 750 HV0.1 selon les paramètres de FSSW utilisés. Dans la tôle de l'aluminium les valeurs minimum de 35 HV0.1 à 65 HV0.1 ont été trouvées aux régions de ZAT / ZATM et des valeurs maximal de 58 HV0.1 à 87 HV0.1 sous forme de pic ont été trouvées aux régions de ZM selon les paramètres de FSSW utilisés.

D'après Bozzi et al [41], lors de l'assemblage de l'aluminium et de l'acier, il est possible que des composés intermétalliques se forment. Les intermétalliques sont connus pour leur importante microdureté, dépassant pour certains des valeurs de 1000 HV. Si elles se forment, ces zones intermétalliques dures et donc fragiles peuvent alors avoir un impact néfaste sur les propriétés mécaniques de l'assemblage. En outre, ces zones peuvent présenter de nombreuses fissures, ce qui peut devenir notamment problématique pour la tenue mécanique statique et dynamique.

III.2.3.Exploitation graphique des résultats de microdureté (Cartographie)

Afin de ressortir les zones rencontrées lors d'un soudage par FSSW, nous avons pris plusieurs empreintes le long de nos trois échantillons. On obtient une cartographie ou mapping (figure 96). L'exploitation graphique est réalisée sur le logiciel Tecplot. Le fichier d'entrée doit être dans un format spécifique (format. dat) c'est-à-dire trois colonnes séparées par un espace (x y z). Le fichier se lit de haut en bas et de la gauche vers la droite.

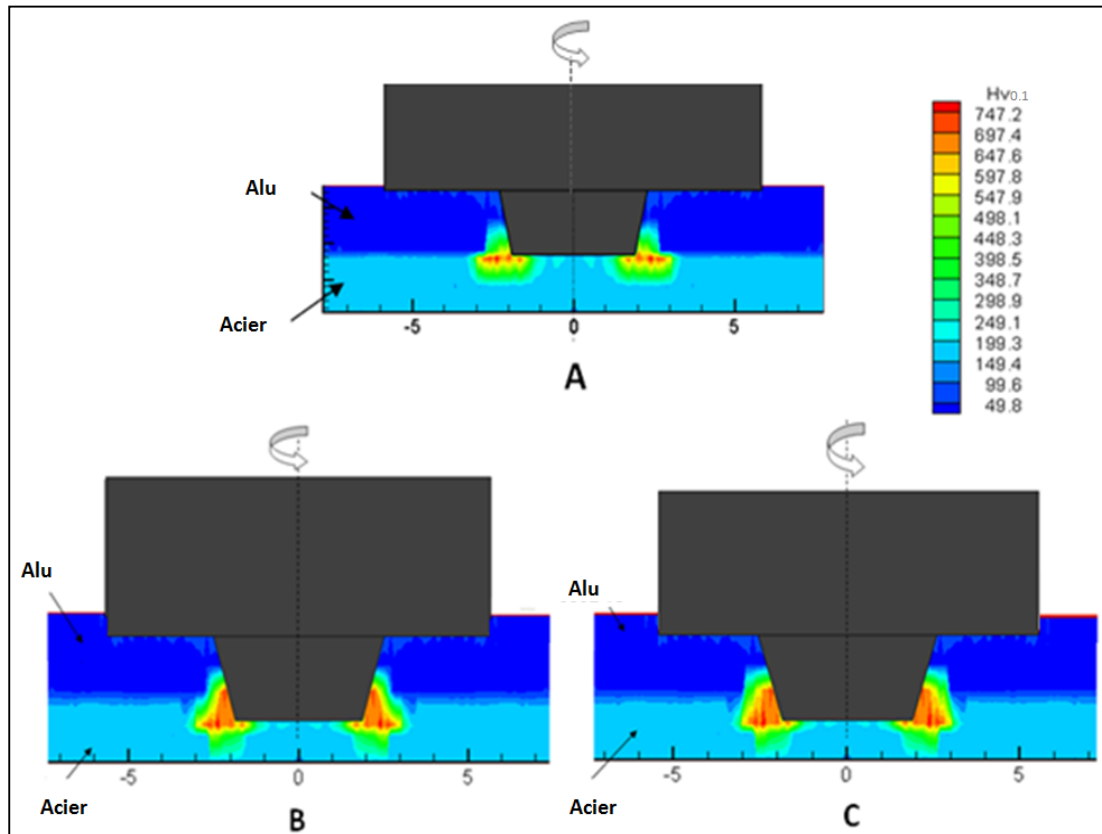


Figure96: Les cartographies des trois profils de microdureté A, B et C.

D'après les résultats des tests de microdureté réalisés sur les trois joints de soudures hétérogène Aluminium/Acier (Echantillon A, B et C) (figure 96) soudées par point par friction malaxage (FSSW) avec différents paramètres de soudage (vitesse de rotation et distance de pénétration), la comparaison entre les résultats de microdureté des trois échantillons A, B et C qui nous a montré que après l'augmentation de la distance de pénétration de 1,9 à 2,7 mm et l'augmentation de la vitesse de rotation de 1000 à 2000 tr/min dans l'échantillon C on a remarqué un élargissement des zones qui ont des valeurs de dureté importante sur la zone de malaxage ce qui signifie que la vitesse de rotation a clairement influencé sur le comportement mécanique (la dureté) des différentes zones du joint de soudure soudé par FSSW (Friction Stir Spot Welding).

III.3.Mode de rupture

Dans les essais au cisaillement, Lathabai et al. [65] et Tozaki et al. [60] ont montré que le soudage par point par friction malaxage FSSW présentait deux modes de défaillance.

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

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

La figure 97 illustre les principaux modes de rupture des assemblages soudés par point par friction malaxage avec différents paramètres. (a) tôle aluminium, (b) tôle acier.

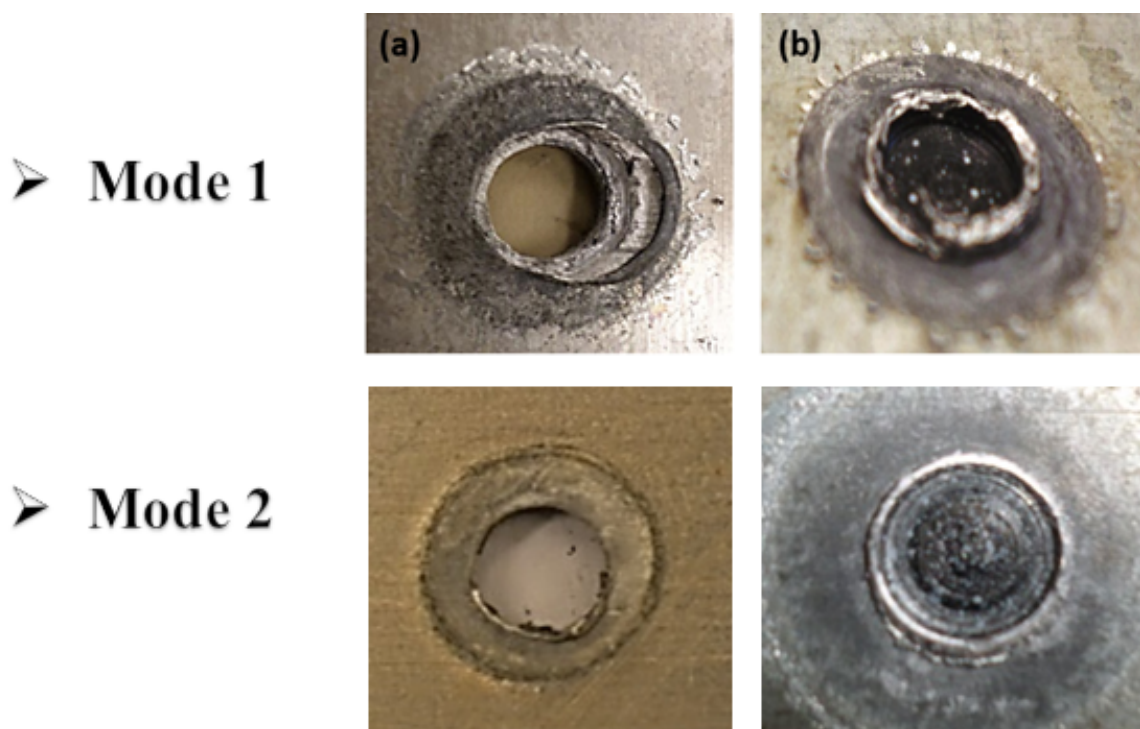


Figure 97: Mode de rupture observé aux conditions de soudage par FSSW.

Mode 1 : La figure 97-a montre la plaque supérieure est complètement séparée de la plaque inférieure. On observe un prétendu mode de défaillance lors de l'essai de traction sous forme d'un arrachement de la matière au niveau de la tôle supérieure causé par les accroches de la tôle de l'acier. La figure 97-b montre la vue de dessous de la plaque inférieure ou on observe clairement la zone de cisaillement (zone de transition). Donc il ya eu une déchirure de la tôle supérieure en périphérie de la zone soudée.

Mode 2 : La figure 97 montre la plaque supérieure est complètement décollé de la plaque inférieure à cause d'une faible pénétration au la zone de transition n'existe pas à cause de la faible pénétration de l'outil de soudage.

III.3.1. Analyse des zones de rupture

La figure 98 a identifié ces modes de défaillance qui illustrent les surfaces de fracture en cisaillement. Donc il est nécessaire de déterminer une relation entre le processus paramètres, la contrainte de cisaillement et la rupture.

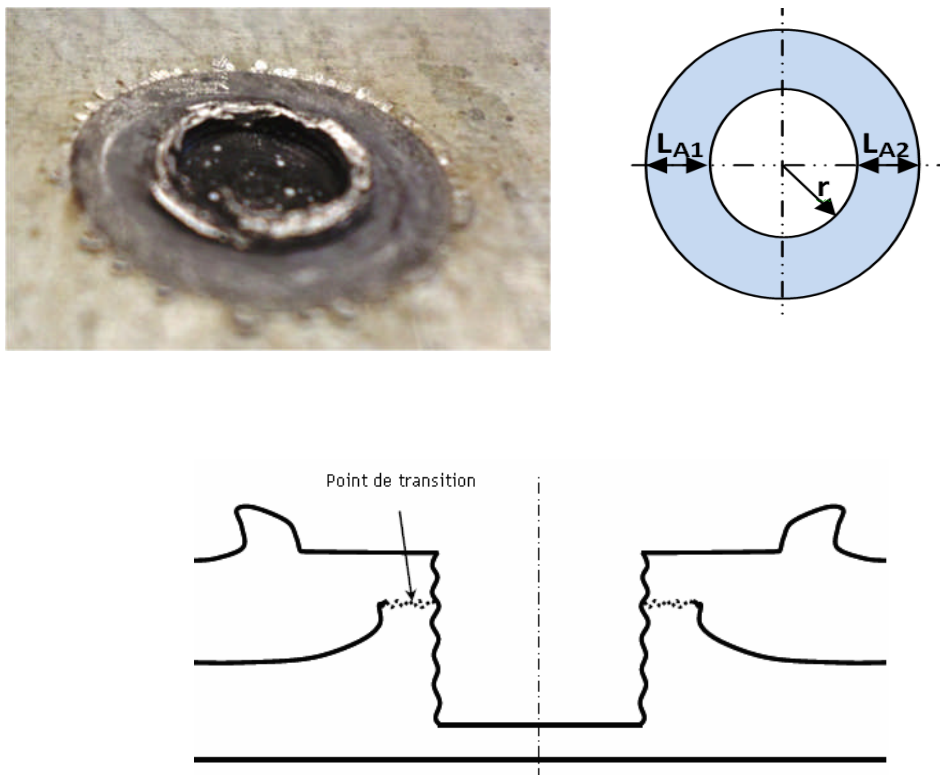


Figure 98 : Point de transition et modes de cisaillement.

Comme indiqué dans la figure 98, les variables LA1, LA2, sont mesurées respectivement entre les deux points de transition et le bord du trou de pion, et l'épaule de l'outil. La zone de fracture de cisaillement SC est approximativement égale à la zone délimitée par le cercle de trou du pion et le cercle de point de transition. Cette zone est égale à $(LA1+LA2) / 2$.

Donc la surface de cisaillement est exprimée par l'équation 4:

$$S_c = \pi [(r + L_A)^2 - r^2] \quad (4)$$

Avec r le rayon du pion.

La figure 99 illustre un exemple d'une zone de cisaillement de la plaque supérieure (upper sheet) et la plaque inférieure (lower sheet) d'un assemblage avec un point.

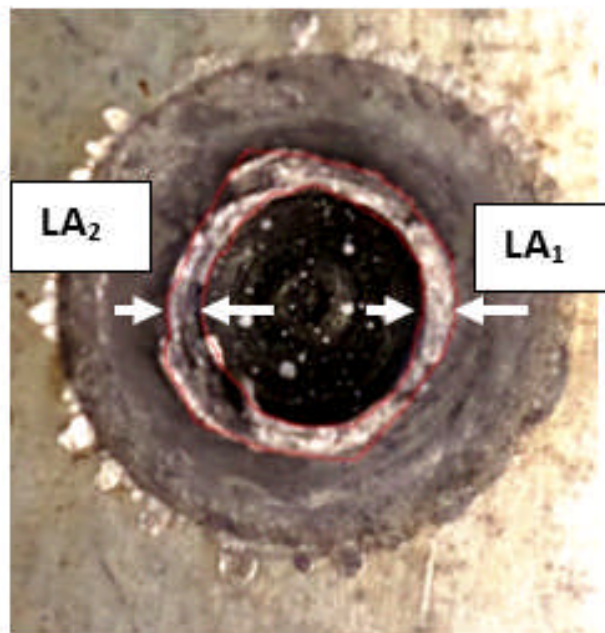


Figure 99 : Point de transition et modes de cisaillement 6061T-5.

Avec :

$$r = 2,5 \text{ mm}$$

$$LA1 = 2,5 \text{ mm}$$

$$LA2 = 2,5 \text{ mm d'ou}$$

$$S_c = \pi (25 - 6,25) = 58,87 \text{ mm}^2$$

Les résultats de l'ensemble des assemblages sont indiqués dans le tableau 16

Vitesse de rotation	Dp=1.9 mm		Dp=2.3 mm		Dp=2.9 mm	
1000 Tr/min	LA=0.45mm	10.05	LA=1.2mm	25.71	LA=1.9mm	43.52
1400 Tr/min	LA=2.1mm	49.17	LA=2.3mm	58.08	LA=2.5mm	61.08
2000 Tr/min	LA=2.3mm	59.08	LA=2.44mm	62.81	LA=2.54mm	65.31

Tableau 16 : Les résultats de calculs des zones de cisaillement.

III.4. L'évolution de la Microstructure

Un zoom de l'accroche (Figure 100) permet de mieux observer les mouvements de matière obtenus pendant le FSSW. L'étude bibliographique réalisée sur les assemblages entre aluminium et acier ainsi que le contraste de niveaux de gris observé en électrons rétrodiffusés permettent d'observer les zones grises apparaissant à la périphérie de l'accroche correspondent à des zones de composés intermétalliques. On peut aussi remarquer qu'il y a eu migration de blocs d'acier dans la tôle d'aluminium.

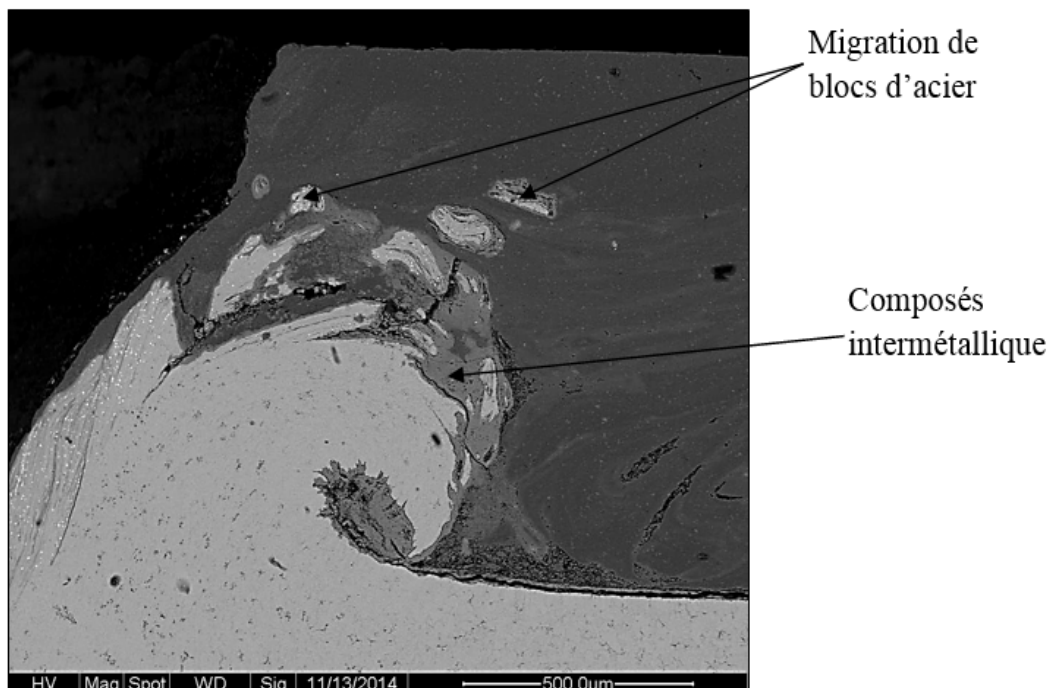


Figure 100 : Accroche droite de l'échantillon C (diffraction des électrons radiodiffusés « EBSD »).

Les tôles d'acier étant galvanisées, on peut se demander ce que devient le zinc qui a une température de fusion très basse (419 °C). Il est certain que le zinc passe à l'état liquide, et des observations en « EBSD » ont mis en évidence la migration du zinc dans la tôle d'aluminium (Figure 101). Ces zones riches en zinc présentent des fissurations importantes. Plus exactement, il semble que le zinc devenu liquide pendant le soudage ait tendance à se mettre au niveau des joints de grains, ce qui provoque une décohésion des grains. Cette fragilisation par le zinc liquide peut également jouer un rôle dans la tenue mécanique des points de soudure.

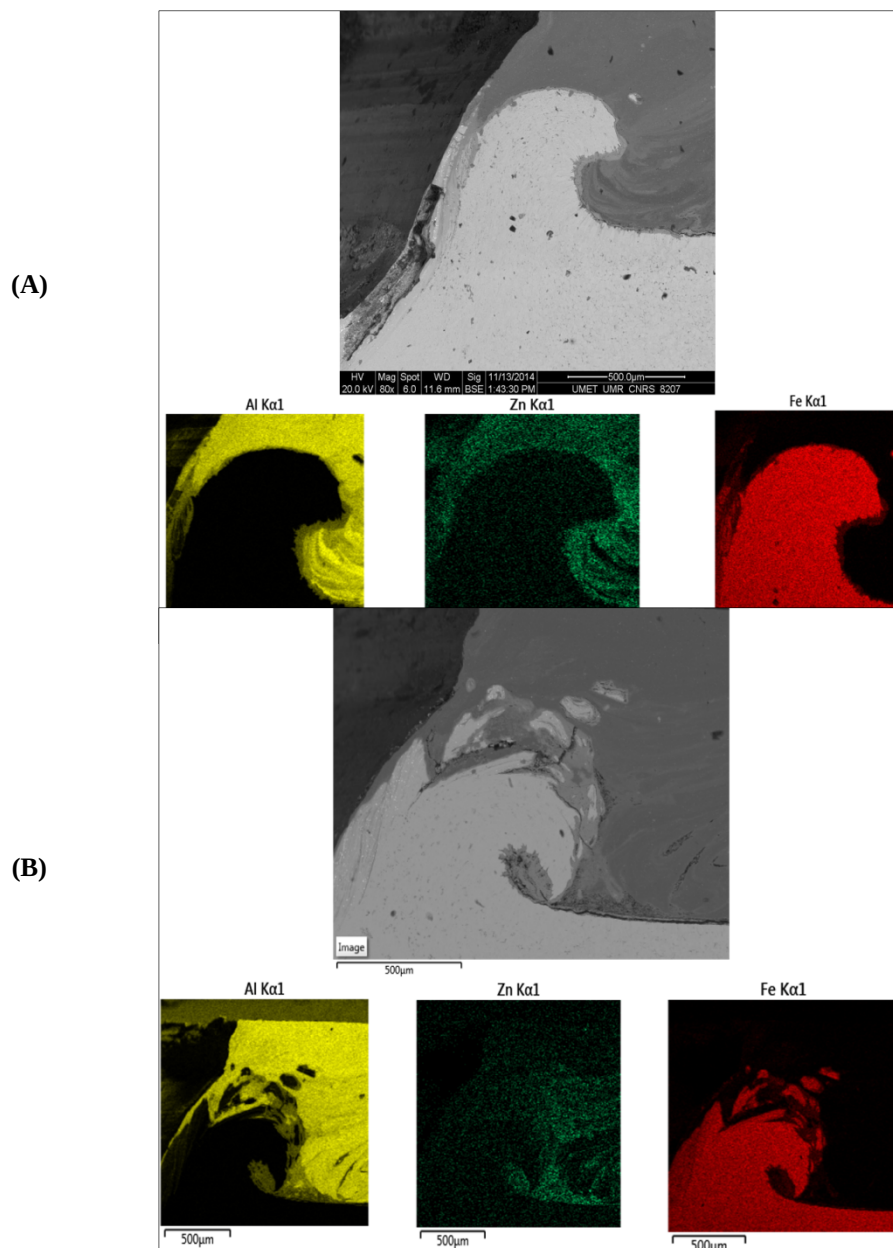


Figure 101 : Une analyse EDS révèle l'emplacement d'Al, Fer et le Zn dans la zone de malaxage de l'accroche droite (zone de malaxage) d'une soudure hétérogène(A) (Echantillon B), (B) (Echantillon C).

Lorsque la pénétration de l'outil augmente, et donc lorsque les déformations et les contraintes sont plus importantes, il y a davantage d'intermétalliques qui se forment.

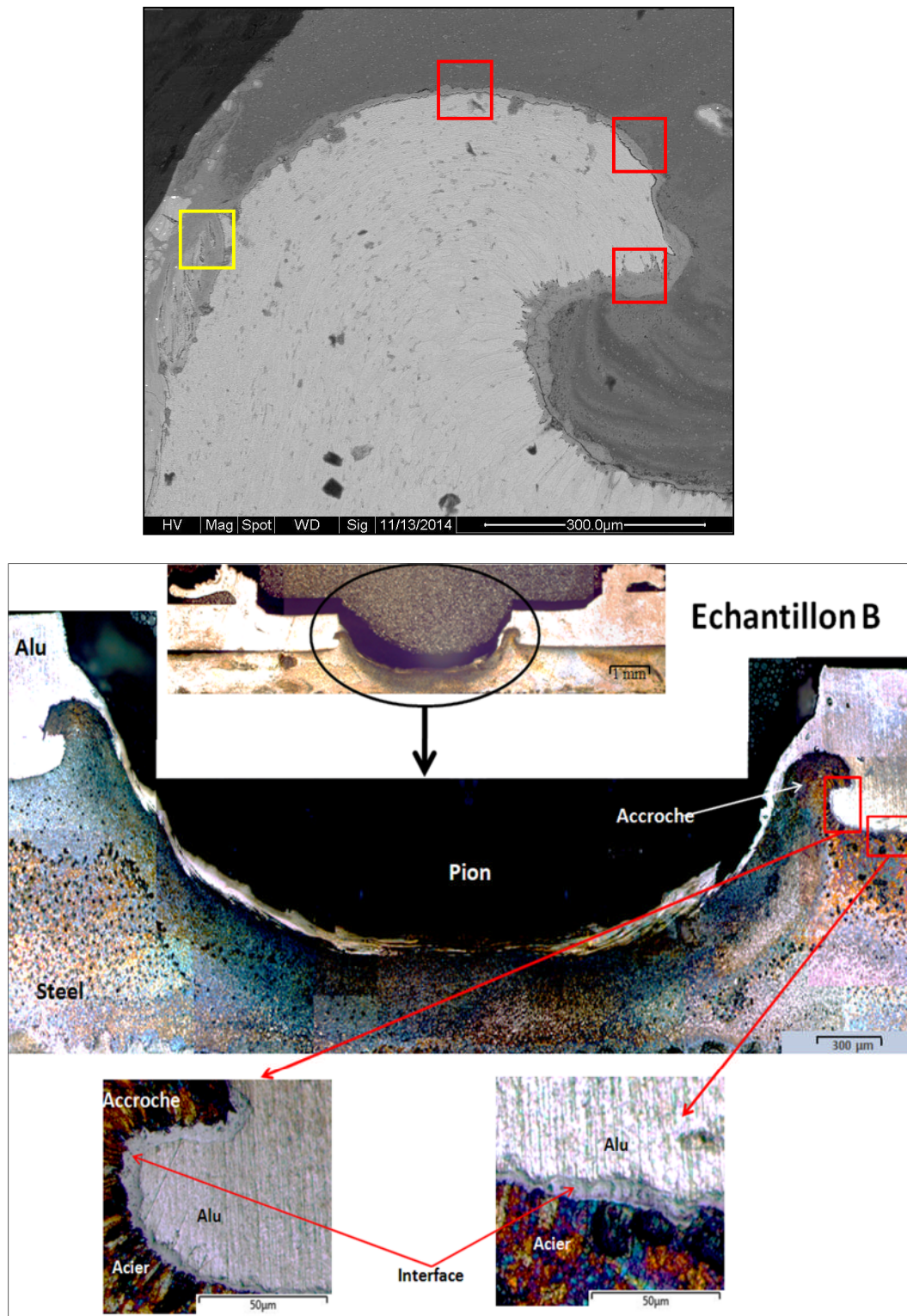


Figure 102 : Micrographie de l'accroche droite de l'échantillon (B) montrant l'emplacement des intermétalliques.

Il y a un effet de température qui joue un rôle dans la formation rapide des intermétalliques. En effet, plusieurs chercheurs ont montré que sous le pion de l'outil FSSW, les températures peuvent atteindre jusqu'à 1180°C. Ensuite, cet acier très chaud remonte dans l'aluminium pour former les accroches. Ainsi, il existe un fort gradient de températures à l'interface entre l'aluminium et l'acier lors de la remontée de l'acier. Il peut donc y avoir une fusion locale de l'aluminium, ce qui peut accélérer la précipitation.

L'emplacement des intermétalliques dans les soudures confirme cette hypothèse (Figure 102). En effet, quelle que soit la condition de soudage, les intermétalliques ont tendance à se former principalement au niveau du front entre la remontée d'acier et l'aluminium, et jamais à la base de l'accroche. Les positions des zones intermétalliques correspondent aux zones à fort gradient thermique : en périphérie du pion (zone Jaune) et au front de la remontée d'acier (zones rouges), où les températures sont élevées.

III.5. Morphologie des grains et détection des zones

Comme nous l'avons vu dans la partie consacrée à la description du cycle de soudage FSSW, la matière est soumise à des températures élevées et des déformations importantes lors du soudage. La microstructure va donc subir des changements que nous allons ici identifier (morphologie des grains, détection des zones...).

À partir de ces observations, nous allons essayer de déterminer le mécanisme de recristallisation dans la tôle d'acier. Puis, en s'appuyant sur les évolutions de la microstructure, nous délimiterons les différentes zones affectées thermiquement et/ou mécaniquement des soudures. En effet, comme toutes les autres techniques de soudage, il est intéressant de pouvoir différencier les zones qui composent la soudure hétérogène alu/acier, afin d'évaluer l'étendue de la microstructure affectée par le procédé.

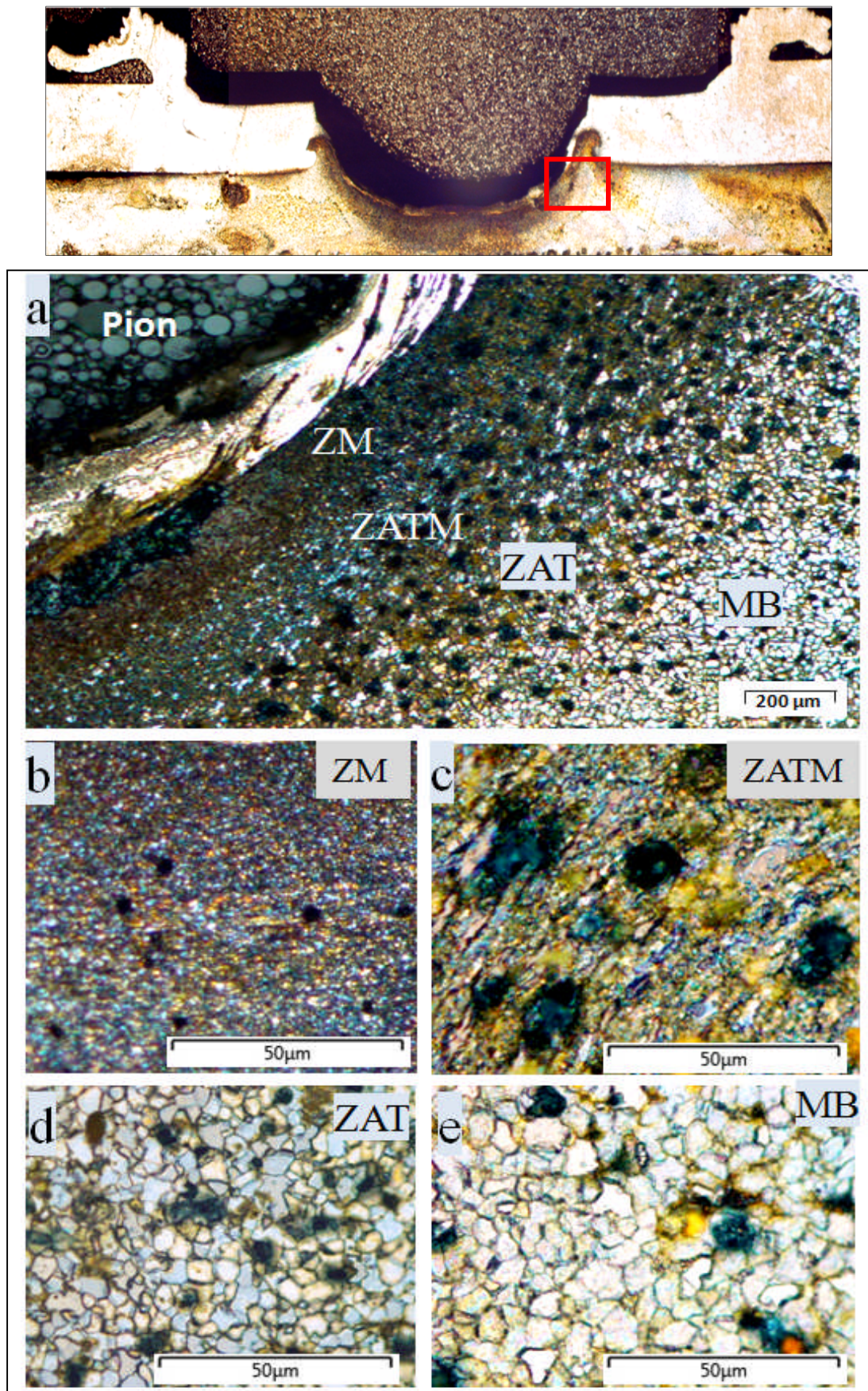


Figure 103 : Microstructure des zones d'un joint de soudure hétérogène Alu/Acier (Echantillon B) en (MEB).

La figure 103a représente un joint typique avec une formation de crochet optimale qui facilite la jonction des deux feuilles. Le crochet est formé lorsque le métal monte pendant la pénétration de l'outil. En outre, la figure 103b examine de plus près l'interface entre l'aluminium et l'acier dans la zone indiquée par un carré. Sur cette figure, quatre zones de la variation de la microstructure pourraient facilement être identifiées comme suit: zone d'agitation (ZM), zone affectée thermo-mécaniquement (ZATM) et la zone affectée par la chaleur (ZAT) et éventuellement le métal de base (MB). La figure 103c, présente tailles de grains dans la zone d'agitation qui sont plutôt fines en raison de l'outil qui a finalement été pressé contre la surface en acier. Cette pression de l'outil est essentielle pour pousser le métal au niveau de bas pour monter et entrer dans le métal supérieur pour former un crochet. ZATM est une zone juste adjacente à la ZM et a été sous l'influence des forces mécaniques de la pression de l'outil et en même temps de la chaleur générée par le frottement. La mesure de la taille des grains dans ces zones n'a pas été possible en raison de la limitation de la résolution du microscope optique et du fait que ces zones sont difficiles à graver. Plus loin de la ZM, on observe ZAT (Figure 103e) des grains légèrement plus gros que le métal de base (Figure 103f). Le métal de base dans la partie inférieure droite de la figure 103a est celui d'une tôle d'acier galvanisée, comme il se doit, il contenait des grains purement ferritiques.

CHAPITRE IV :
MODELISATION

IV. Modélisation des paramètres de soudages fssw

La modélisation numérique du soudage par FSSW est un problème complexe dans lequel interviennent des couplages physiques forts, en particulier, entre la mécanique et la thermique puisque les élévations de températures ne sont dues qu'à la dissipation mécanique. Le but de cette partie est de réduire le nombre des essais expérimentaux par l'optimisation des paramètres du procédé de soudage par FSSW. L'étude d'interaction a permis de trouver les combinaisons de différents facteurs et de réduire l'incertitude des réponses (températures) en raisonnant sur des moyennes.

IV.1. Introduction

Dans cette partie, l'objectif est de modéliser la température au cours du soudage par point par friction malaxage (FSSW) et d'analyser les interactions entre les différents facteurs. Un plan d'expérience a été utilisé en vue de mettre en évidence les facteurs les plus Importants. Cette partie peut être hiérarchisée comme suit :

- Choix des facteurs les plus intéressants et les plus aptes à être considérés comme Influent.
- Choix de l'intervalle de variation de chaque facteur, à savoir les valeurs : maximale, Minimale, centrale et le Choix aléatoire d'un certain nombre d'états et l'élaboration d'une matrice d'expériences avec tous les états possibles et réponses correspondantes.

Nous avons montré que les paramètres les plus influents : vitesse de rotation, distance de pénétration, jouent un rôle important dans l'évolution de la température et le choix de la qualité des points de soudure par friction malaxage.

IV.2. Modélisation

Nous avons utilisé le logiciel MODDE 5.0 pour les différents calculs statistiques. La Méthode retenue pour notre cas est MLR (Multiple Linear Régression). Une fois les valeurs de mesure expérimentales entrées et le traitement par ordinateur effectué, le programme assiste l'utilisateur pour l'interprétation des résultats et la prédiction des réponses. Il Calcule les coefficients du modèle mathématique, trace les surfaces de réponse (RMS) et Identifie les meilleurs réglages des différents paramètres pour optimiser le processus. Le Programme offre la possibilité de calculer deux critères importants qui permettent de juger la fiabilité statistique (R2) et le pouvoir de prédiction (Q2) du modèle. Un bon modèle mathématique doit avoir des critères R2 et Q2 dont la valeur numérique soit proche de l'unité. En utilisant cette technique, il est possible d'établir la fonction de sortie (réponse) suivante :

$$y = a_0 + \sum_{i=1}^4 a_i x_i + \sum_{1 \leq i < j \leq 4} a_{ij} x_i x_j + \sum_{i=1}^4 a_{ii} x_i^2 + e$$

IV.2.1. Choix des intervalles d'étude

Les intervalles d'étude des différents facteurs ont été choisis suivants les réponses obtenues à partir des essais préliminaires.

IV.2.2. Intervalle d'étude de la vitesse de rotation de l'outil N

D'après les valeurs expérimentales préliminaires, on a choisi l'intervalle d'étude de la vitesse de rotation comme suit :

$$1000 \leq \omega \leq 2000 \text{ tr/min}$$

IV.2.3. Intervalle d'étude de la distance de pénétration

$$1,9 \text{ mm} \leq Dp \leq 2,9 \text{ mm}$$

IV.3. Influence des facteurs de soudage choisis sur la réponse (température T max et force maximal F max)

On a déterminé l'influence de chaque facteur sur chacune des réponses, en traçant la variation des réponses en fonction de ces facteurs choisis (figures 104 et 105). On a démontré que les facteurs les plus influents sur les réponses sont respectivement la vitesse de rotation et puis la distance de pénétration.

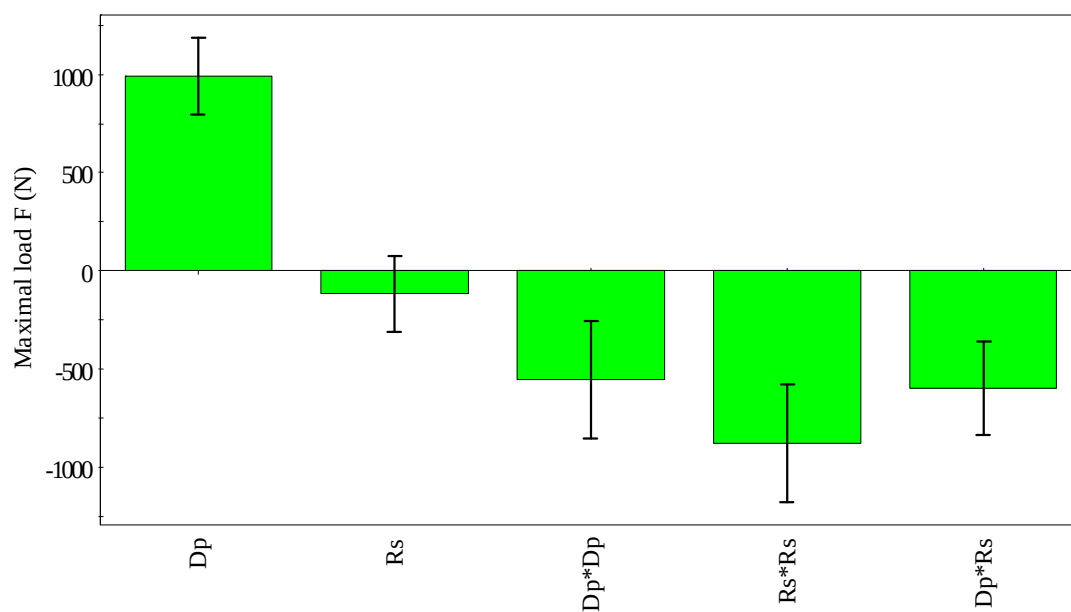


Figure 104 : Effets des différents facteurs sur la résistance maximale à la traction.

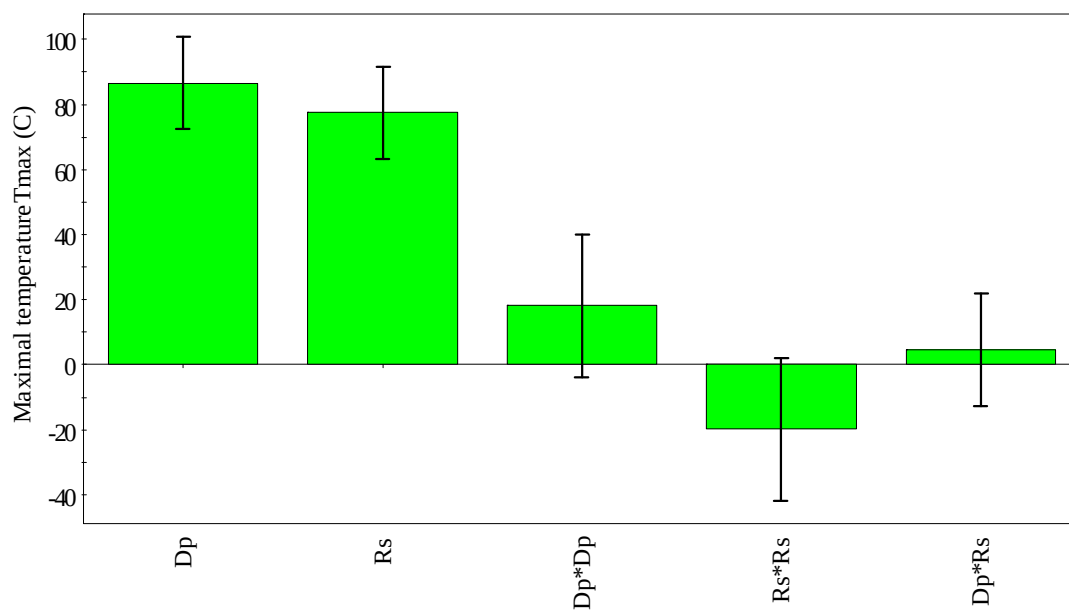


Figure 105 : Effets des différents facteurs sur la température.

IV.3.1. Graphique des facteurs significatifs en fonction des paramètres de soudage

Les figures 106, 107, 108 et 109 illustrent les effets des paramètres du soudage par point par friction malaxage sur la résistance du joint de soudure à la traction-cisaillement et l'évolution de la température. En augmentant la vitesse de rotation, la température croît vers la valeur maximale et la force maximale et de 1485 N. La distance de pénétration joue aussi un rôle très important dans ce phénomène, la température croît approximativement puis elle décroît tout en augmentant la vitesse de rotation. Les facteurs temps et vitesse de plongé ont également un effet significatif sur l'évolution de la température.

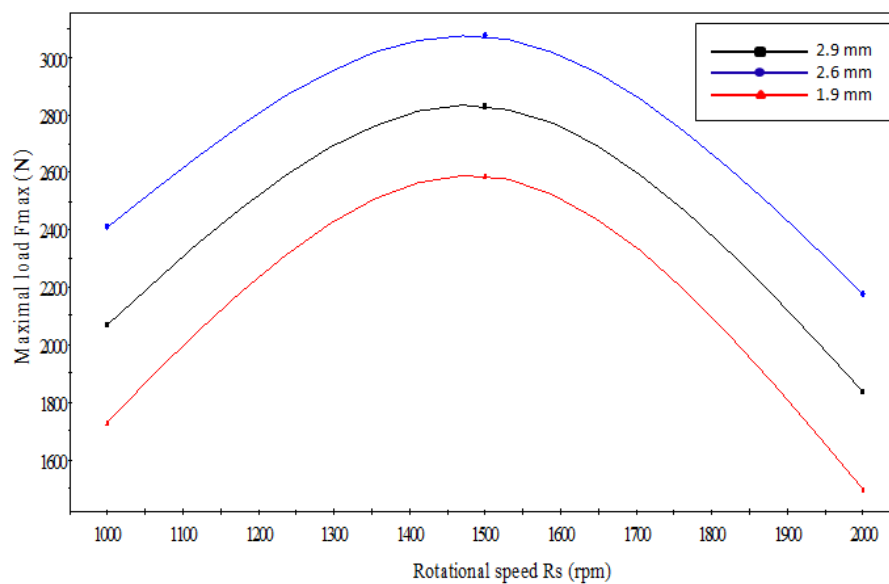


Figure 106 : Graphique des facteurs significatifs sur la réponse (F_{max}) en fonction de la vitesse de rotation de l'outil de soudage.

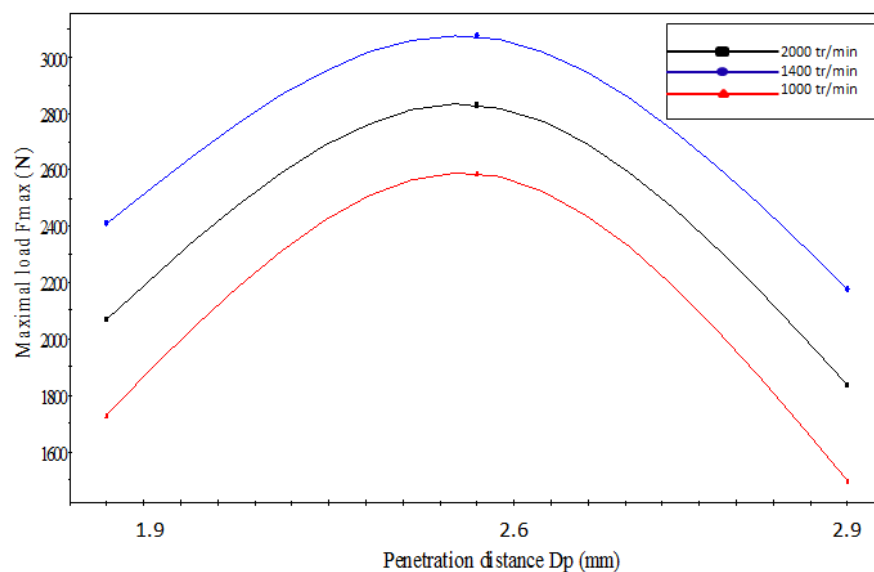


Figure 107: Graphique des facteurs significatifs sur la réponse (F_{max}) en fonction de la distance de pénétration.

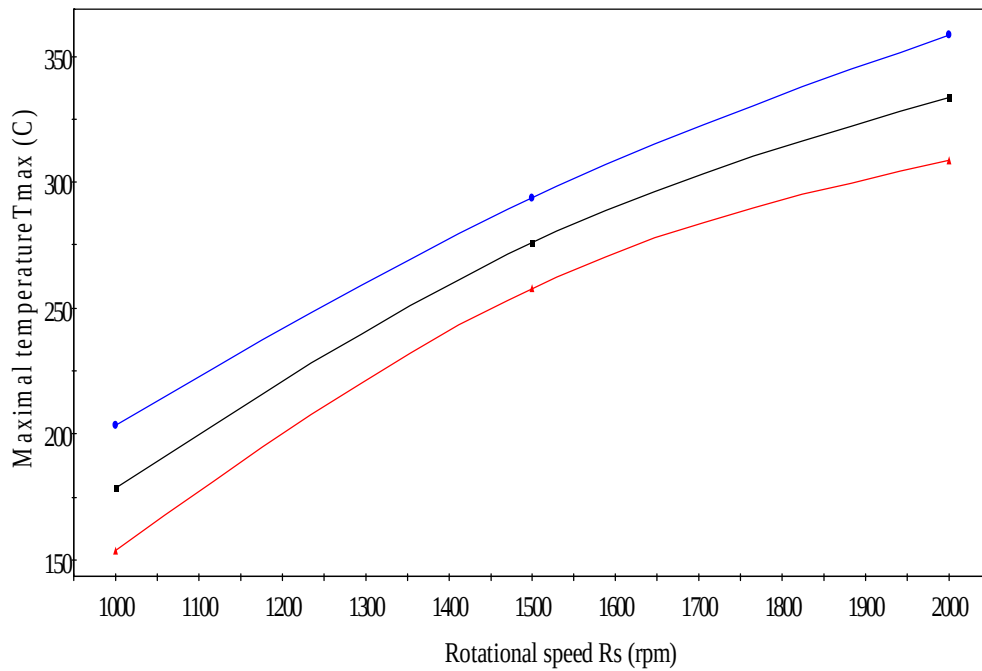


Figure 108 : Graphique des facteurs significatifs sur la réponse (Température) en fonction de la vitesse de rotation de l'outil de soudage.

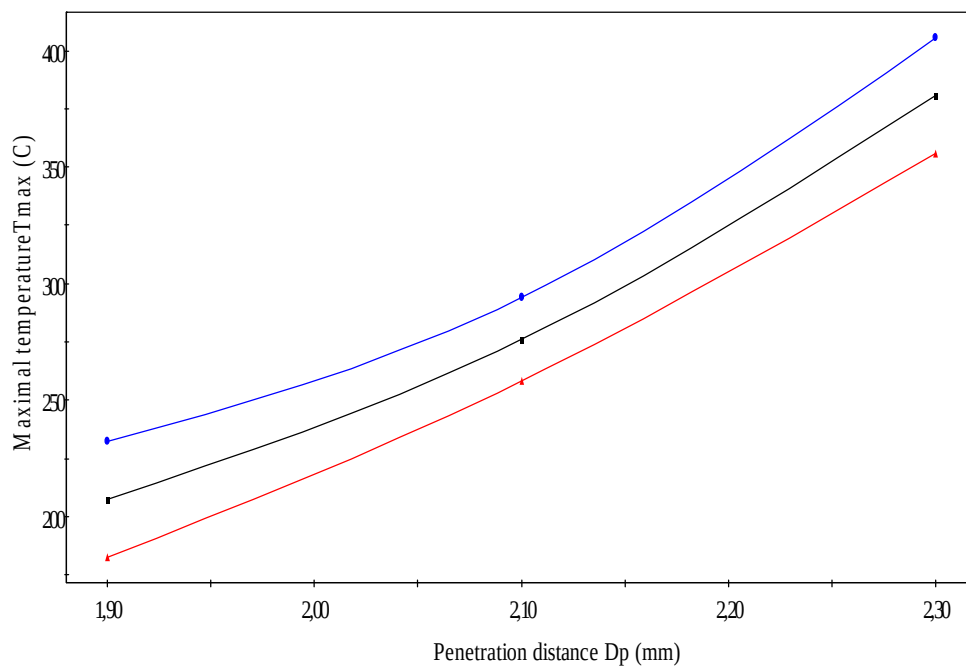


Figure 109 : Graphique des facteurs significatifs sur la réponse (Température) en fonction de la distance de pénétration.

IV.3.2. Interaction entre la vitesse de rotation et la distance pénétration

L'analyse de cette étape montre une interaction des 2 facteurs, vitesses de rotation et distance de pénétration (1,9 mm et 2,7 mm) et vitesses de rotation (1000 tr/min et 2000tr/min) tout en fixant le temps de maintien 2 sec et la vitesse de pénétration 16 mm/min. On constate sur la figure 110 que la température atteint le maximum avec une valeur de 410°C et diminue vers une valeur minimale tout en diminuant la vitesse de rotation.

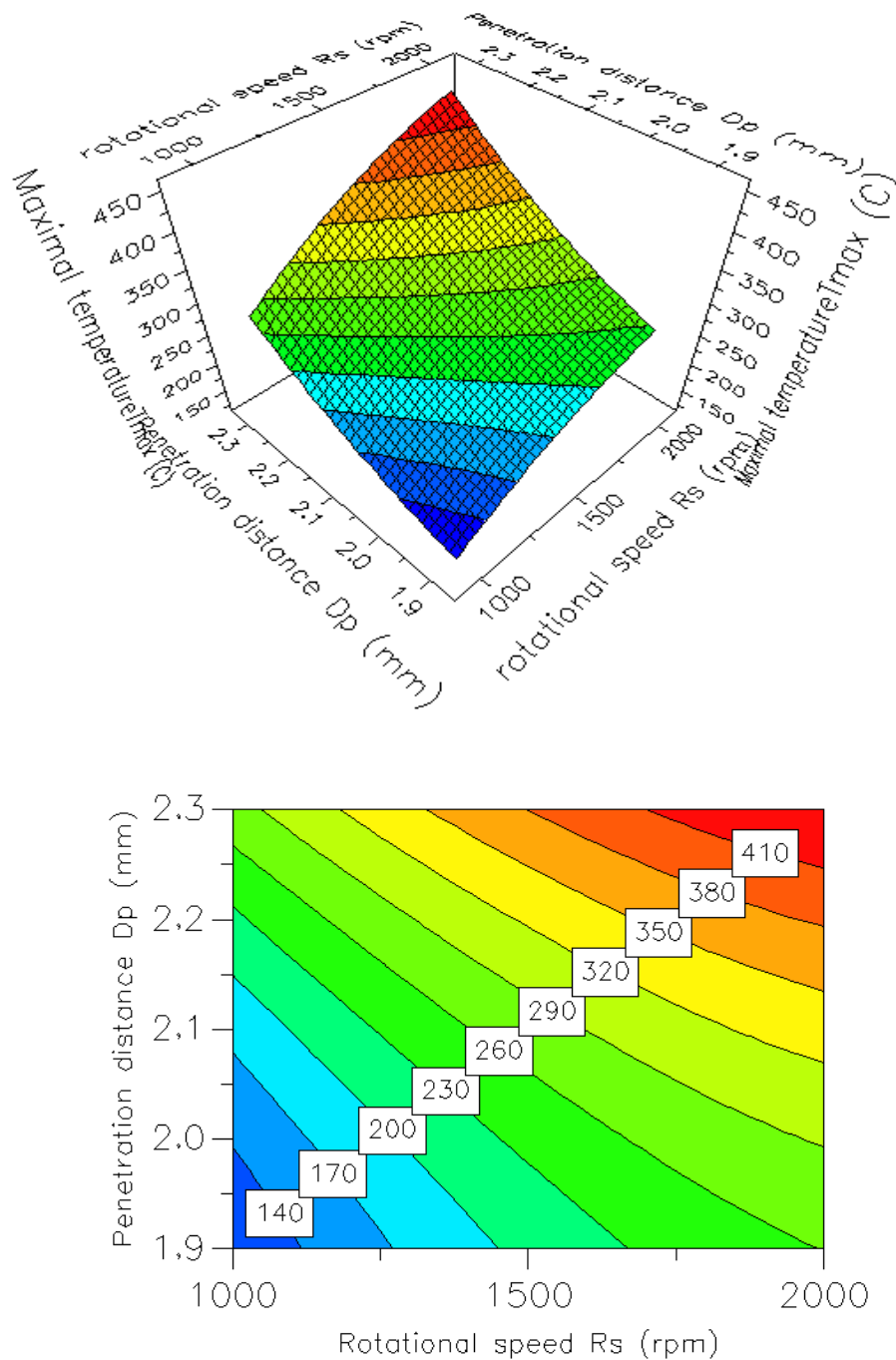


Figure 110 : Interaction entre la distance et la vitesse de rotation.

La figure 111 montre que la température atteint la valeur maximale tout en augmentant la distance de pénétration.

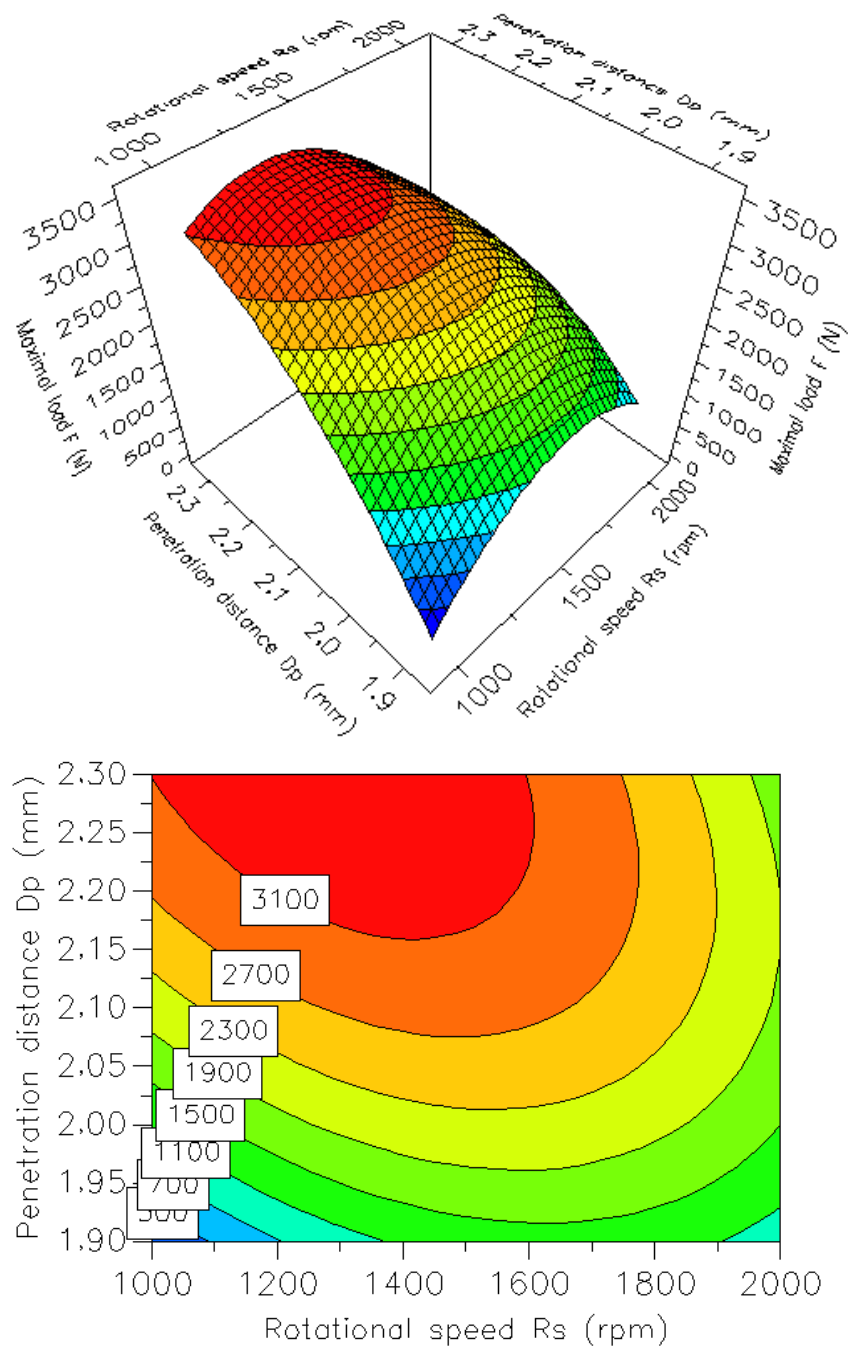


Figure 111 : Interaction entre la distance de pénétration et la vitesse de rotation

CONCLUSION

&

PERSPECTIVES

CONCLUSION GENERALE

Le procédé de soudage par point par friction malaxage ouvre de nouvelles perspectives dans l'assemblage des carrosseries. En particulier, ce travail a permis de mettre en avant le fort potentiel pour la réalisation de soudures entre l'aluminium et l'acier. L'ensemble des travaux effectués durant la thèse a également révélé la complexité notamment de la microstructure obtenue après soudage et de la précipitation des intermétalliques.

Les objectifs principaux de cette thèse étaient de comprendre les mécanismes métallurgiques qui interviennent durant le soudage et les relations qui existent entre la microstructure au sens large (flux de matière, morphologie de la zone de malaxage, taille de grains, nature des intermétalliques ...) et les propriétés mécaniques des soudures en vue d'une optimisation de leur performance. Dans ce but, une étude paramétrique du procédé combinée à une caractérisation microstructurale a mené à l'identification des facteurs principaux qui permettent une maîtrise du comportement mécanique des soudures.

Dans le cas hétérogène, l'assemblage est rendu possible par une remontée d'acier dans la tôle supérieure d'aluminium, que l'on appelle l'accroche. Il y a alors formation de composés intermétalliques à l'interface entre l'accroche d'acier et l'aluminium, grâce à un effet thermomécanique. Tout d'abord, compte tenu de la friction de l'outil sur l'acier, les températures deviennent très élevées au niveau de l'acier. La remontée de l'acier peut alors provoquer une fusion locale de l'aluminium, ce qui accélère la précipitation intermétallique. Ensuite, la pénétration de l'outil et la remontée de l'acier engendre des champs de contraintes importantes, ce qui contribue également à la formation des intermétalliques.

Les précipités intermétalliques qui en résultent au niveau des accroches présentent une taille d'environ 250 nm, et une dureté qui diffère fortement selon leur nature, allant jusqu'à 800 HV. Ces zones de composés intermétalliques peuvent alors devenir des zones très fragiles qui détériorent le comportement mécanique des soudures. Lorsqu'ils sont trop nombreux, et que leur microdureté est élevée, la rupture des points de soudure provient de nombreuses fissures qui apparaissent au niveau des zones intermétalliques. Mais ils restent nécessaires, car s'ils sont inexistantes, la tenue mécanique est très faible, la rupture ayant lieu par une rapide décohésion entre l'accroche d'acier et l'aluminium. Ainsi, pour une tenue mécanique optimale, une certaine quantité d'intermétalliques est nécessaire, ce qui correspond également à une surface d'accroche plus importante. Dans ce cas, l'accroche étant plus robuste, la rupture a lieu par déchirure de la tôle d'aluminium.

Donc la quantité et la nature des phases intermétalliques, ainsi que les dimensions des accroches jouent un rôle important dans le comportement mécanique des soudures. Ces facteurs varient selon les conditions de soudage appliquées, plus particulièrement la pénétration de l'outil et sa vitesse de rotation. La pénétration joue un rôle davantage dans la dimension des accroches : il a été observé que pour obtenir une bonne dimension d'accroche, il faut une pénétration importante. La vitesse de rotation, quant à elle, influence fortement la quantité d'intermétalliques, en étant liée notamment aux températures atteintes durant le soudage.

L'ensemble de ces résultats montre alors le fort potentiel du FSSW également pour la réalisation de soudures entre aluminium et acier.

PERSPECTIVES

Les différentes perspectives à envisager sont :

- Simulation numérique.
- Lois de comportement des zones de soudages par micro indentation.
- Influences des paramètres procès /morphologie de l'outil et leur matériaux utilisé sur la microstructure des joints soudée.
- Etude de l'endommagement des outils de soudage par FSSW (hétérogène).
- Détermination des contraintes résiduelles par ondes guidé.
- Fatigue uni et multi axial.
- Essais de corrosion

REFERENCES
BIBLIOGRAPHIQUE

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUE

- [1] S. Zimmer. ‘Contribution à l’industrialisation du soudage par friction malaxage’. Sciences de l’ingénieur [physics]. Arts et Métiers ParisTech, 2009.
- [2] J. Chapuis. ‘Une approche pour l’optimisation des opérations de soudage à l’arc’. Mécanique. Université Montpellier II - Sciences et Techniques du Langue doc, 2011.
- [3] W.M. Thomas, E.D. Nicholas, J.C. Needham, M.G. Murch, P. Templemith, C.J.Dawes, G.B. Patent 9125978.8,1991.
- [4] H. Badarinarayan, F. Hunt, K. Okamoto, Chapter 12: Friction Stir Spot Welding, Friction Stir welding and Processing, Edité par R.S. Mishra ET M.W. Mahoney, ISBN-13 978-0-87170-840-3, ASM International, 2007.
- [5] R. A. Mishra, Chapter 1 Introduction, Friction Stir Welding and Processing, Edité par R.S. Mishra ET M.W. Mahoney, ISBN-13 978-0-87170-840-3, ASM International, 2007.
- [6] S. Zimmer- Chevret, C. Guyomard, Laurent Langlois, Régis Bigot, Patrick Martin. FSW : Un Procédé De Soudage Pour Les Alliages D’aluminium De Fonderie. 11 ème Colloque National AIP PRIMECA La Plagne, France, 2009.
- [7] R.S. Mishra, Z.Y. Ma. Friction stir welding and processing. Materials, Science and Engineering, 50, 1-78, 2005.
- [8] R. A. Mishra, Chapter 1 Introduction, Friction Stir Welding and Processing, Edité par R.S. Mishra ET M.W. Mahoney, ISBN-13 978-0-87170-840-3, ASM International, 2007.
- [9] N. Balasubramanian, B. Gattu, R. S. Mishra, Process forces during friction stir welding of aluminium alloys, Science and Technology of Welding and Joining 2009, vol 14-no 2 p.: 141 – 145, 2009.
- [10] T. J. Haynie, A. D. Hofferbert, A. H. Koppy, Adaptator for friction stir welder, US Patent Application No.: US 2006/0032 887 A1, 2006 .
- [11] R. A. Mishra, Chapter 1 Introduction, Friction Stir Welding and Processing, Edité par R.S. Mishra et M.W. Mahoney, ISBN-13 978-0-87170-840-3, ASM International, 2007.
- [12] C. B. Fuller, Friction Stir Welding and Processing - Chapter 2 Friction Stir Tooling: Tool Materials and Designs, Friction Stir Welding and Processing, Edité par R.S. Mishra et M.W. Mahoney, ISBN-13 978-0-87170-840-3, ASM International, 2007
- [13] D. H. Wykes, Cerritos, Calif., Adjustable Pin for FSW Tool, Patent Number 5 697 544, 1997.

- [14] R.S. Mishra, Z.Y. Ma. Friction stir welding and processing. Materials Science and Engineering, 50, 1-78, 2005.
- [15] C. B. Fuller, Friction Stir Welding and Processing - Chapter 2 Friction Stir Tooling: Tool Materials and Designs, Friction Stir Welding and Processing, Edité par R.S. Mishra et M.W. Mahoney, ISBN-13 978-0-87170-840-3, ASM International, 2007.
- [16] Cook G.E., Smartt H.B., Mitchell J.E., Strauss A.M., Crawford R., Controlling robotic friction stir welding, Welding Journal, Vol. 82 No.6, pp.28-34, 2003.
- [17] N. Balasubramanian, B. Gattu, R. S. Mishra, Process forces during friction stir welding of aluminium alloys, Science and Technology of Welding and Joining 2009, VOL 14-NO 2 p.: 141 – 145, 2009.
- [18] T. J. Haynie, A. D. Hofferbert, A. H. Koppy, Adaptator for friction stir welder, US Patent Application No.: US 2006/0032 887 A1, 2006.
- [19] C. Genevois, ‘Genèse des microstructures lors du soudage par friction malaxage d’alliages d’aluminium de la série 2000 & 5000 et comportement mécanique résultant’, thèse soutenu en septembre à l’INPG, 2004.
- [20] D. Hof, ‘State of the Art of International Standardisation in the Field of Welding and Allied Processes’, Sudura, Soldagem Insp. São Paulo, Vol. 15, No. 1, p.071-081, 2010.
- [21] R. Nandan, T. DebRoy, H.K.D.H. Bhadeshia, ‘Recent advances in friction-stir welding – Process’, weldment structure and properties, Progress in Materials Science 53: 980–1023, 2008.
- [22] S. Zimmer, W. Chapeau, B. Da Costa, X. Stassart, N. Ben Slima Ayadi, L.Langlois, J.C. Goussain, B. de Meester, L. D’Alvise, Manuel Pédagogique, Le soudage par friction malaxage, friction stir welding, ISBN 978-2-900781-67-8
- [23] H. B. Chen, K. Yan, T. Lin, S. B. Chen, C. Y. Jiang, Y. Zhao, The investigation of typical welding defects for 5456 aluminum alloy, friction stir welds, Materials Science and Engineering A 433: 64–69, 2006.
- [24] W. J. Arbegast, Chapter 13: Application of Friction Stir Welding and Related Technologies, Friction Stir Welding and Processing, Edité par R.S. Mishra et M.W.Mahoney, ISBN-13 978-0-87170-840-3, ASM International, 2007.
- [25] W. J. Arbegast, ‘Mechanisms of flow related defects in FSW welds’, Proceedings 6th FSW Symposium, Brazil, 2007.
- [26] W. J. Arbegast, A flow-partitioned deformation zone model for defect formation during friction stir welding. Scripta Materialia 58p. 372–376, 2008.

- [27] Norme Soumis A Enquête Probatoire, 'Defines Friction Stir Welding Terms'. In ISO 25239-1, 2011.
- [28] Y. G. Kim, H. Fujii, T. Tsumura, T. Komazaki, K. Nakata, Three defect types in friction stir welding of aluminum die casting alloy, *Materials Science and Engineering A* 415: 250–254, 2006.
- [29] G. Bjorkman, A. Kooney, C. Russell, Friction Stir Process Mapping Methodology, http://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/20040084055_2004085962.pdf, 2002.
- [30] D. S. Caravaca, C. R Bird, K. Beamish and S. Maddox, Correlation of phased array inspection and fatigue performance of FSW joints, 26th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering, OMAE 2007, San Diego, California, 2007.
- [31] D. Macel, 'Exemples De Travaux En Brasage : Essais Mécaniques Et Métallographies', (Institut De Soudure) 1601_0232_P_041_047- 41, 2016.
- [32] Prado, RA; Murr, LE; Shindo, DJ; Soto, HF. "Tool wear in the friction stir welding of aluminium alloy 6061+20% Al₂O₃: A preliminary study". *Scripta Materialia* 45: 75–80. Doi: 10.1016/ S1359- 6462(01)00994-0, 2001.
- [33] Kallee S W, 'Friction Stir Welders Provide Prefabricated Components and Panels'. *Aluminium International Today* July/August', 2004.
- [34] R. Sakano, K. Murakami, K. Yamashita, T. Hyoe, M. Fujimoto, M. Inuzuka, Y. Nagao, H. Kashiki, Development of spot FSW robot system for automobile body members, in: *Proceedings of the Third International Symposium of Friction Stir Welding*, Kobe, Japan, 2004.
- [35] M. Fujimoto, M. Inuzuka, M. Nishio, Y. Nakashima, Development of friction spot joining (Report 2)—Mechanical properties of friction spot joints, Reprints of the National Meeting of Japan Welding Society No. 74, pp. 6–7, 2004.
- [36] P.-C. Lin, S.-H. Lin, J. Pan, T. Pan, J.M. Nicholson, M.A. Garman, Microstructures and failure mechanisms of spot friction welds in lapshear specimens of aluminum 6111-T4 sheets, SAE Technical Paper No. 2004-01-1330, 2004.
- [37] P.-C. Lin, J. Pan, T. Pan, 'Fracture and fatigue mechanisms of spot friction welds in lap-shear specimens of aluminum 6111-T4 sheets', SAE Technical Paper No. 2005-01-1247, 2005.
- [38] Y. Tozaki, Y. Uematsu, K. Tokaji, Effect of processing parameters on static strength of dissimilar friction stir spot welds between different aluminium alloys, *Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures* 30 -143–148, 2007.

- [39] Y.-H. Zhao, S.-B. Lin, L. Wu, F.-X. Qu, The influence of pin geometry on bonding and mechanical properties in friction stir weld 2014 Al alloy, *Materials Letters* 59 -2948–2952, 2005.
- [40] H. Fuji, L. Cui, M. Maeda, K. Nogi, Effect of tool shape on mechanical properties and microstructure of friction stir welded aluminum alloys, *Materials Science and Engineering A* 419 -25–31, 2006.
- [41] S. bozzi, “Optimisation du procédé FSSW (Friction Stir Spot Welding) pour des assemblages homogènes A1/A1 et hétérogènes A1/Acier“, Thèse de doctorat en Sciences appliquées, Université de Paris-Sud. Faculté des Sciences d'Orsay, France, 2009.
- [42] S. Zimmer, J. Laye, L. Langlois, R. Bigot LCFC, Arts et Métiers Paris Tech centre de Metz Institut de Soudure. Overview of the means of production used for FSW, 2010.
- [43] M. Merzoug,” Etude paramétrique du soudage par friction malaxage”, thèse de doctorat ; UDL ,SBA, Algérie, 2010.
- [44] “A friction heat first for Mazda”, *Journal Aluminum Now*, p.11, 2005.
- [45] K. Kimapong, T. Watanabe, “Friction stir welding of aluminum alloy to steel”, *Welding Journal*, vol 83, p. 277-282, 2004.
- [46] J. Hyun Han, J. Pyoung Ahn, M.C. Shun, “Effect of interlayer thickness on shear deformation behaviour of AA5053 aluminum alloy/SS41 steel plates manufactured by explosive welding”, *Journal of Materials Science*, vol 38, p. 13-18, 2003.
- [47] C. Herbelot, T. Dang-Hoang, A. Imad, N. Benseddq ‘Damage mechanisms under tension shear loading in friction stir spot welding’, *Science and Technology of Welding and Joining*, France, Volume 15, Pages 688-693, 2010.
- [48] M. Tier, T. Rosendo, C.W. Olea, C. Mazzaferro, F.D. Ramos, M. Bayer, J.F. Dos Santos, A.A.M. da Silva, J. Mazzaferro, T.R. Strohaecke, “The influence of weld microstructure on mechanical properties of refill Friction Stir Spot Welding of 5042 Aluminium alloy”, *Proceedings of the 7th Friction Stir Welding Symposium*, Awaji Island, Japan, 2008.
- [49] P. Su, A. Gerlich, T.H. North, G.J. Bendzsak, “Energy generation and stir zone dimensions in friction stir spot weldings”, *SAE technical series*, 2006-01-0971, 2006.
- [50] A. Gerlich, M. Yamamoto, T.H. North, “Local melting and tool slippage during Friction Stir Spot Welding of Al-alloys”, *Journal of Materials Science*, 10.1007/s10853-007- 1791-7, 2007.

- [51] C. B. Smith, 'Friction Stir Welding and Processing' - Chapter 11 Robots and machines for friction stir welding / processing, Friction Stir Welding and Processing, Edité par R.S. Mishra et M.W. Mahoney, ISBN-13 978-0-87170-840-3, ASM International, 2007.
- [52] Nejah Jemal, Amarilys Ben Attar, Laurent Langlois, Sandra Zimmer-Chevret. Influence de la géométrie de l'outil sur la robustesse du FSW robotisé. [Rapport de recherche] Projet ANR-2010- SEGI-003-COROUSSO, Agence Nationale de la Recherche. 2014.
- [53] Norme soumis à enquête probatoire jusqu'au: ISO/DIS 25239-1, 25 novembre 2007.
- [54] A. Gerlich, M. Yamamoto, T.H. North, "Local melting and tool slippage during friction stir spot welding of Al-alloys", Journal of Materials Science, vol 43, 2008.
- [55] M. Awang, V.H. Mucino, Z. Feng, S.A. David, "Thermo-Mechanical Modeling of Friction Stir Spot Welding (FSSW)", SAE Technical paper series, 2006.
- [56] A. Gerlich, G. Avramovic-Cingara, T.H. North, "Stir Zone Microstructure and Strain Rate during Al 7075-T6 Friction Stir Spot Welding", Metallurgical and Materials Transactions A, vol. 37A, p. 2773-2786, 2006.
- [57] N. Balasubramanian, B. Gattu, R. S. Mishra, Process forces during friction stir welding of aluminium alloys, Science and Technology of Welding and Joining , VOL 14-NO 2 p.: 141 – 145, 2009.
- [58] S. Muthukumaran, S. K. Mukherjee, Multi-layered metal flow and formation of onion rings in friction stir welds, Int J Adv Manuf Technol 38:68–73, 2008.
- [59] Y. Tozaki, Y. Uematsu, K. Tokaji, "Effect of tool geometry on microstructure and static strength in friction stir spot welded aluminium alloys", International Journal of Machine Tools and Manufacture, vol. 47, 2007.
- [60] Y. Tozaki et al. / Journal of Materials Processing Technology 210 (2010) 844–851
- [61] H. Badarinarayan et al. / International Journal of Machine Tools & Manufacture 49, 2009.
- [62] Y. Tozaki, Y. Uematsu, K. Tokaji, Fatigue behavior of dissimilar friction stir spot welds between A6061 and AZ31 fabricated by a scroll grooved tool without probe , Fatigue and Fracture of Engineering. Osaka, Japan, 6–8 November 2013.
- [63] P. Su, A. Gerlich, T.H. North and G.J. Bendzsak, "Material flow during friction stir spot welding", Science and Technology of Welding and Joining, vol. 11, Issue 1, 2006.
- [64] Y. Tozaki, Y. Uematsu, K. Tokaji, Fatigue Behaviour of Friction Stir Spot Welded Joints with Re-filled Probe Hole in Al-Mg-Si Alloy Design, Fabrication and Economy of Welded Structures International Conference Proceedings, 2008.
- [65] S. Lathabai, M.J. Painter, G.M.D. Cantin, V.K. Tyagi, "Friction spot joining of an extruded Al-Mg-Si alloy", Scripta Materialia, vol. 55, 2006.

- [66] D. Mitlin, V. Radmilovic, T. Pan, J. Chen, Z. Feng, M.L. Santella, "Structure-properties relations in spot friction welded (also known as friction stir spot welded) 6111 aluminum", *Materials Science and Engineering*, vol. 441A, 2006.
- [67] H.J. Liu, H. Fujii, M. Maeda, K. Nogi, "Tensile properties and fracture locations of friction-stir-welded joints of 2017-T351 aluminum alloy", *Journal of Materials, Proceeding Technology*, vol. 142, p. 692-696, 2003.
- [68] D. Mitlin, V. Radmilovic, T. Pan, J. Chen, Z. Feng, M.L. Santella, "Structure-properties relations in spot friction welded (also known as friction stir spot welded) 6111 aluminum", *Materials Science and Engineering*, vol. 441A, p. 79-96, 2006.
- [69] T.Y. Pan, W.J. Schwartz, K.A. Lazarz, M.L. Santella, "Spot Friction weldbonding for sheet aluminum joining", *Proceedings 6th FSW Symposium (CD-Rom)*, Saint-Sauveur, paper 17, 2006.
- [70] S. Lathabai, M.J. Painter, G.M.D. Cantin, V.K. Tyagi, "Friction spot joining of an extruded Al-Mg-Si alloy", *Scripta Materialia*, vol. 55, p. 899-902, 2009.
- [71] D.A. Wang, S.C. lee, "Microstructures and failure mechanisms of Friction Stir Spot Welds of aluminium 6061-T6 sheets", *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 186, p. 291-297, 2007.
- [72] D. Mitlin, V. Radmilovic, T. Pan, J. Chen, Z. Feng, M.L. Santella, "Structure-properties relations in spot friction welded (also known as friction stir spot welded) 6111 aluminum", *Materials Science and Engineering*, vol. 441A, p. 79-96, 2006.
- [73] H.J. Liu, H. Fujii, M. Maeda, K. Nogi, "Tensile properties and fracture locations of friction-stir-welded joints of 2017-T351 aluminum alloy", *Journal of Materials, Proceeding Technology*, vol. 142, p. 692-696, 2003.
- [74] S. Lathabai, M.J. Painter, G.M.D. Cantin, V.K. Tyagi, "Friction spot joining of an extruded Al-Mg-Si alloy", *Scripta Materialia*, vol. 55, p. 899-902, 2006.
- [75] T.Y. Pan, W.J. Schwartz, K.A. Lazarz, M.L. Santella, "Spot Friction weld bonding for sheet aluminum joining", *Proceedings 6th FSW Symposium (CD-Rom)*, Saint-Sauveur, paper 17, 2006.
- [76] H. Badarinarayan, Q. Yang, S. Zhu, "Effect of tool geometry on static strength of friction stir spot-welded aluminum alloy", *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 49, p. 142-148, 2008.
- [77] D. Mitlin, V. Radmilovic, T. Pan, J. Chen, Z. Feng, M.L. Santella, "Structure-properties relations in spot friction welded (also known as friction stir spot welded) 6111 aluminum", *Materials Science and Engineering*, vol. 441A, p. 79-96, 2006.

- [78] Feng Z. et al, Friction Stir Spot Welding of Advanced High-Strength Steels – A Feasibility Study, 2005-01-1248, SAE World Congress, April 11-14, 2005.
- [79] Y. Hovanski,a,. M.L. Santellab and G.J. Granta, Friction stir spot welding of hot-stamped boron steel. *Energy Materials and Manufacturing*, MSIN: K2-03, 2007.
- [80] Y. Tozaki, Y. Uematsu, K. Tokaji, Effect of processing parameters on static strength of dissimilar friction stir spot welds between different aluminium alloys, *Fatigue and Fracture of Engineering. Materials and Structures* 143–148, 2007.
- [81] T.A. Freeney, S.R. Sharma, R.S. Mishra, “Effect of welding parameters on properties of 5052 Al Friction Stir Spot Welds”, SAE Technical paper series, 2006.
- [82] H.J. Liu, H. Fujii, M. Maeda, K. Nogi, “Tensile properties and fracture locations of friction-stir-welded joints of 2017-T351 aluminum alloy”, *Journal of Materials, Proceeding Technology*, vol. 142, 2003.
- [83] J. Hyun Han, J. Pyoung Ahn, M.C. Shin, “Effect of interlayer thickness on shear deformation behavior of AA5083 aluminum alloy / SS41 steel plates manufactured by explosive welding”, *Journal of Materials Science*, vol. 38, 2003.
- [84] Y.C. Chen, T. Komazaki, Y.G. Kim, T. Tsumura, K. Nakata, “Interface microstructure study of friction stir lap joint of AC4C cast aluminum alloy and zinc-coated steel”, *Materials Chemistry and Physics*, vol. 111, 2008.
- [85] Yasunari Tozakia, Yoshihiko Uematsub, Keiro Tokajib. Effect of tool geometry on microstructure and static strength in friction stir spot welded aluminum alloys. *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 47, 2007.
- [86] P. Su, A. Gerlich, T.H. North and G.J. Bendzsak, “Material flow during friction stir spot welding”, *Science and Technology of Welding and Joining*, vol. 11, Issue 1, 2006, p.61-7
- [87] T.Y. Pan, W.J. Schwartz, K.A. Lazarz, M.L. Santella, “Spot Friction weldbonding for sheet aluminum joining”, *Proceedings 6th FSW Symposium (CD-Rom)*, Saint-Sauveur, 2006.
- [88] H. Badarinarayan, Q. Yang, S. Zhu, “Effect of tool geometry on static strength of friction stir spot-welded aluminum alloy”, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 49, 2008.
- [89] J.F. Henrichs, C.B. Smith, B.F. Orsini, R.J. DeGeorge, B.J. Smale, P.C. Ruehl, “Friction Stir Welding for the 21st Century Automotive Industry”, *Proc. of the 5th International Symposium of Friction Stir Welding*, Sept. 14-16, Metz, France, 2004.
- [90] Y. Tozaki, Y. Uematsu, K. Tokaji, “Effect of Welding Condition on Tensile Strength of Dissimilar FS Spot Welds between Different Al Alloys”, *Proc. of the 6th International*

Symposium of Friction Stir Welding, Oct. 10-13, Saint-Sauveur, Nr Montreal, Canada, 2006.

- [91] Q. Yang, S. Mironov, Y.S. Sato, K. Okamoto, “Microstructure and Mechanical Properties of Friction Stir Spot Welded AZ31 Mg Alloy”, Proc. of the 7th International Symposium of Friction Stir Welding, May 20-22, Awaji Island, Japan, 2008.
- [92] Y. Tozaki, Y. Uematsu, K. Tokaji, “Effect of tool geometry on microstructure and static strength in friction stir spot welded aluminium alloys”, International Journal of Machine Tools and Manufacture, vol. 47, 2007.
- [93] M. Colombié, “Matériaux industriels, Matériaux métalliques”, Edition DUNOD, p. 343-497, 2000.
- [94] A. A. M. da Silva*, E. Aldanondo, P. Alvarez, E. Arruti and A. Echeverria. Friction stir spot welding of AA 1050 Al alloy and hot stamped boron steel (22MnB5) Centro de Investigación en Tecnologías de Unión LORTEK, Barrio La Granja s/n, Ordizia 20240, Spain, 2010.
- [95] V.-X. Tran and J. Pan, Failure modes of friction stir spot welds in cross-tension specimens of dissimilar aluminium sheets Mechanical Engineering, University of Michigan, Ann Arbor, MI 48109, USA, 2010.
- [96] T. Gendo, K. Nishigushi, M. Asakawa, S. Tanioka, “Spot friction welding of aluminum to steel”, SAE Technical paper series, SAE 2007-01-1703, 2007.
- [97] W H Zhang, X M Qiu, D Q Sun & L J Han ,’Effects of resistance spot welding parameters on microstructures and mechanical properties of dissimilar material joints of galvanised high strength steel and aluminium alloy’, Science and Technology of Welding and Joining, 16:2, 153-161, (2011).

