

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

République Algérienne Démocratique et Populaire

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Mohamed Khider-Biskra
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département : Génie Mécanique
Réf. :



جامعة محمد خيضر – بسكرة
كلية العلوم و التكنولوجيا
قسم: الهندسة الميكانيكية
المرجع:

Thèse

Présentée pour l'obtention du diplôme de

Doctorat en Sciences en : Génie Mécanique

Spécialité : Génie Mécanique

Option : Métallurgie

Présentée publiquement par

M^r. FARES KHALFALLAH

Soudage par friction de l'acier avec du céramique

Soutenue le : **05/03/2020**

Devant le jury composé de:

Pr. Ahmed Boutarfaia	Professeur	Président	Université Mohamed Khider-Biskra
Pr. Zakaria Boumerzoug	Professeur	Rapporteur	Université Mohamed Khider-Biskra
Pr. Nourredine Bouaouadja	Professeur	Examineur	Université Ferhat Abbas-Sétif 1
Pr. Kamel Loucif	Professeur	Examineur	Université Ferhat Abbas-Sétif 1

Année universitaire : 2019-2020

Je dédie ce modeste travail :

A ma chère mère ;

A la mémoire de mon père ;

A mon épouse ;

A mes enfants ;

Katre Ennada, Maram, Dhiyae Alhak & Miral.

A mes frères & sœurs

A mes amis & mes collègues de travail

Remerciement

Je remercie dieu, le tout puissant, qui m'a donné le courage et la patience durant toute la période de réalisation de ce travail.

Je tiens à exprimer mes vifs remerciements et ma sincère gratitude à mon directeur de thèse, monsieur ***Boumerzoug Zakaria***, professeur à l'université de Biskra, d'avoir accepté de diriger cette thèse. Je le remercie pour ses conseils, ses discussions scientifiques et son aide considérable afin de mener à bien ce travail.

J'adresse mes sincères remerciements à monsieur ***Ahmed Boutarfaia***, professeur et Recteur de l'université Mohamed Khider de Biskra, d'avoir accepté de présider le jury de soutenance.

Je remercie monsieur ***Bouaouadja Noureddine***, professeur au Département de Mécanique de l'université Ferhat Abbas - Sétif 1, d'avoir accepté d'être un membre du jury de soutenance, et de m'avoir fait l'honneur de lire et d'examiner le manuscrit de ce travail.

Je remercie monsieur ***Kamel Loucif***, professeur au Département de Mécanique de l'université Ferhat Abbas - Sétif 1, d'avoir accepté d'être un membre du jury de soutenance, et de m'avoir fait l'honneur de lire et d'examiner le manuscrit de ce travail.

Je remercie monsieur *Selvarajan Rajakumar*, professeur associé au département d'ingénierie de fabrication, Université Annamalai, Tamil Nadu - Inde, de m'avoir invité deux fois, dans le cadre d'un stage de courte durée, au Centre de Recherche et d'Assemblage des Matériaux (CEMAJOR).

Je remercie également monsieur *V. Balasubramanian*, professeur au département d'ingénierie de fabrication et directeur du Centre CEMAJOR, Université Annamalai, Tamil Nadu - Inde, de m'avoir accueilli au sein du CEMAJOR.

Enfin, je remercie sans exception, tous les amis, tous les collègues et tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

Table des matières

	Page
Dédicace.....	i
Remerciements.....	ii
Table des matières.....	iv
Liste des figures.....	viii
Liste des tableaux	xii
 Introduction générale	 1
 Chapitre I : Généralités sur l'assemblage Métal/Céramique	
I.1. Introduction.....	3
I.2. Généralités sur les matériaux	3
I.2.1. Classification des matériaux	3
I.2.2 Propriétés des matériaux.....	3
I.2.3. Matériaux métalliques	4
I.2.4. Les matériaux céramiques.....	6
I.3. Les assemblages métal/céramique.....	8
I.4. Techniques d'assemblage métal/céramique.....	8
I.4.1. Assemblage métal/céramique par fixation mécanique.....	9
I.4.2. Assemblage métal/céramique indirecte : Le brasage.....	10
I.4.3. Assemblage métal/céramique direct : Le soudage à l'état solide	14
I.4.4. Assemblage métal/céramique par soudage par friction rotative	17
I.5. Références bibliographiques.....	19
 Chapitre II : Procédé de Soudage par Friction Rotative	
II.1. Introduction.....	22
II.2. Soudage par friction.....	22
II.3. Soudage par friction rotative.....	24
II.3.1. Définition.....	24
II.3.2. L'histoire de développement du soudage par friction rotative.....	25
II.3.3. Principe général.....	26

II.4. Mécanismes de soudage par friction rotative.....	27
II.4.1. Phase de Friction.....	27
II.4.2. Phase de forgeage.....	29
II. 5. Conception des pièces à souder par friction rotative.....	29
II.6. Microstructure des joints de soudage par friction rotative	30
II.7. Modes de soudage par friction rotative	31
II.7.1. Soudage par friction à entraînement direct (ou entraînement continu).....	31
II.7.2. Soudage par friction inertielle	35
II.7.3. Comparaison entre les deux procédés de soudage par friction rotative.....	37
II.8. Couples de matériaux soudables par le soudage par friction rotative.....	38
II.9. Applications du soudage par friction rotative.....	38
II.10. Avantages et limites du soudage par friction rotative.....	41
II.11. Conclusion partielle	41
II.12. Références bibliographiques.....	42

Chapitre III : Synthèse Bibliographique

III.1.Introduction.....	44
III.2. Détails des travaux de recherche	44
III.3. Discussion des travaux publiés	47
III.4. Conclusion partielle	50
III.5. Références bibliographiques	51

Chapitre IV : Matériaux et Procédures Expérimentales

Introduction.....	52
Partie 1 : Matériaux et équipement utilisés.....	52
1.1. Matériaux utilisés.....	52
1.1.1 L'Acier doux	52
1.1.2 L'alliage d'aluminium Al 1100.....	52
1.1.3 L'alumine Al_2O_3	53
1.2. Préparation des pièces à souder par friction.....	53
1.3. Equipements de soudage par friction rotative.....	54
Partie 2 : Méthodologie et procédure expérimentale.....	55

Partie A : Soudage par friction rotative acier doux/aluminium 1100.....	55
2.a.1 Les paramètres de soudage par friction acier doux/aluminium 1100.....	55
2.a.2 Les réponses du plan d'expériences	57
2.a.3 Processus de soudage par friction rotative acier doux/aluminium 1100	58
Partie B : Soudage par friction rotative acier doux/alumine.....	59
2.b.1 Préparation de la couche intermédiaire en aluminium 1100.....	59
2.b.2 Processus de soudage par friction rotative acier doux/alumine	61
2.b.3 Les paramètres de soudage par friction acier doux/alumine.....	62
Partie 3. Techniques de caractérisations.....	63
3.1. Caractérisation microstructurale des joints soudés	63
3.1.1 Préparation des échantillons soudés pour l'observation macrographique et micrographique.....	63
3.1.2 Observations par microscopie optique.....	63
3.1.3 Observations par microscope électronique à balayage (MEB) et analyse par spectroscopie à rayons X à dispersion d'énergie (EDS).....	64
3.2. Caractérisation mécanique des joints soudés	64
3.2.1 Essai de traction.....	64
3.2.2 Essai de flexion 3 points.....	66
3.2.3 Mesures de micro-dureté Vickers.....	67
 Chapitre V : Résultats & Discussions	
Introduction.....	69
Partie 1 : Soudage par friction rotative acier doux/aluminium 1100.....	69
1.1. Caractérisation mécanique des joints acier doux/aluminium 1100.....	71
1.1.1 Essai de traction.....	71
1.1.2 Mesures de la microdureté Vickers.....	73
1.2. Analyse des effets des paramètres de soudage par la méthode MSR.....	74
1.2.1 Les modèles empiriques développés par MSR.....	74
1.2.2 Test de signification du modèle et ordre de contribution.....	74
1.2.3 Courbes des surfaces de réponses	76
1.3 Optimisation des paramètres de soudage.....	78
1.4. Validation de solutions optimales.....	80
1.5. Effet de la pression de forgeage/temps sur la microstructure des joints	81

Partie 2 : Soudage par friction rotative acier doux/alumine.....	84
2.1. Caractérisation microstructurale des joints acier doux/alumine	86
2.1.1. Observations par microscope optique.....	86
2.1.2. Observations par microscope électronique à balayage	87
2.1.3 Analyse par EDS des joints acier doux/alumine.....	89
2.2. Caractérisation mécanique des joints acier doux/alumine	91
2.2.1. L'effet du temps de friction sur la résistance à la flexion	91
2.2.2. L'effet du temps de friction sur les profils de la microdureté	92
Conclusion générale.....	95
Annexe : Méthode des surfaces de réponses (MSR)	
1. Plan d'expériences	97
2. Méthode des surfaces de réponses.....	97
2.1. Principe de la méthode des surfaces de réponses.....	97
2.2. Le processus d'optimisation par la méthode des surfaces de réponses	98
2.3. Terminologies de la méthode des surfaces de réponses.....	98
3. Plan composite centré	100
3.1. Construction d'un plan composite centré	101
3.2. Plans composite centré de petite taille	102
4. Modélisation par la méthode des surfaces de réponses.....	103
5. Analyse des données	104
6. Logiciels de plans d'expériences	405
7. Références bibliographiques	106

Liste des figures	Page
Figure I.1 Classification de divers alliages métalliques	4
Figure I.2 Exemple des applications d'alumine (Al_2O_3).....	8
Figure I.3 Procédés d'assemblage métal/céramique	9
Figure I.4 Exemples des assemblages métal/céramique par fixation mécanique...	10
Figure I.5 La mouillabilité du métal d'apport à l'état liquide	12
Figure I.6 Schéma de brasage réactif métal/céramique	12
Figure I.7 Cycle du procédé de brasage métal/céramique	13
Figure I.8 Exemples des assemblages métal/céramique par brasage	14
Figure I.9 Exemples des assemblages métal/céramique par soudage par diffusion	16
Figure I.10 Illustration schématique des contraintes thermiques dans l'interface métal/céramique.....	17
Figure I.11 Procédé de soudage par friction rotative	17
Figure II.1 Illustration schématique de deux étapes de base lors du soudage par friction : (a) friction à sec, (b) écoulement plastique	22
Figure II.2 Classification des procédés de soudage par friction	23
Figure II.3 Principaux procédés de soudage par friction	24
Figure II.4 Illustration d'un brevet sur le soudage par friction rotative par BEVINGTON (1891)	25
Figure II.5 Principe général de soudage par friction rotative	27
Figure II.6 Variations du couple de frottement pendant la phase de friction.....	28
Figure II.7 Interaction des surfaces pendant la phase de friction	29
Figure II.8 Conception des pièces à souder par friction rotative	30
Figure II.9 Illustration schématique des différentes zones de la soudure par friction rotative.....	31
Figure II.10 Séquences du soudage par friction à entraînement direct	33
Figure II.11 Caractéristiques des paramètres de soudage par friction à entraînement direct.....	34
Figure II.12 Illustration d'une machine de soudage par friction à entraînement direct.....	35
Figure II.13 Séquences du soudage par friction inertielle	36

Figure II.14	Caractéristiques des paramètres de soudage par friction inertielle.....	37
Figure II.15	Quelques applications du soudage par friction rotative	40
Figure III.1	Processus de soudage par friction rotative acier doux/alumine	47
Figure III.2	Joints acier doux/alumine soudés par friction rotative (a), après le test de flexion (b)	48
Figure III.3	Micrographie des interfaces acier-aluminium et alumine-aluminium du joint acier/alumine soudé par friction rotative	48
Figure III.4	Corrélation entre l'épaisseur de la couche intermédiaire et la résistance à la flexion pour différents temps de friction	49
Figure IV.1	Les échantillons à souder découpés et préparés.....	53
Figure IV.2	La machine de soudage par friction rotative (CEMAJOR, Université Annamalai – Inde).....	54
Figure IV.3	Organigramme des différentes phases du soudage acier doux/aluminium 1100.....	55
Figure IV.4	Processus de soudage par friction rotative acier doux/aluminium 1100.....	59
Figure IV.5	Organigramme des différentes étapes de soudage acier doux/alumine.	60
Figure IV.6	Préparation de la couche intermédiaire en aluminium 1100.....	61
Figure IV.7	Processus de soudage par friction rotative acier doux/alumine.....	62
Figure IV.8	Système de fixation de la tige d'alumine en mandrin de la machine....	62
Figure IV.9	Microscope optique de type MEIJI (Modèle : MIL7100).....	64
Figure IV.10	Microscopes électroniques à balayage de type JEOL.....	65
Figure IV.11	Machine d'essai de traction, universelle asservie de type FIE–Bluestar (Modèle : UNITEK 94100).....	66
Figure IV.12	Détails d'éprouvette d'essais de traction (Unité: mm).....	66
Figure IV.13	Principe d'un essai de flexion 3 points	67
Figure IV.14	Micro-duromètre Vickers de type Shimadzu (Modèle: HMV-2T).....	68
Figure V.1	Echantillons acier doux/aluminium 1100 soudés par friction rotative...	69
Figure V.2	Sections longitudinales des échantillons soudés acier doux/aluminium 1100	70

Figure V.3	Variations du raccourcissement des joints acier doux/aluminium 1100.	71
Figure V.4	Joints soudés acier doux/aluminium 1100 après les tests de traction....	72
Figure V.5	Fractographie par MEB : (a) l'échantillon 8 – coté Aluminium, (b) l'échantillon 8 – coté Acier et (c) l'échantillon 7.....	72
Figure V.6	Graphes de corrélation pour la réponse: (a) la résistance à la traction (R_t), (b) la microdureté (MD).....	75
Figure V.7	Courbes des surfaces de réponse et courbes isoréponses de la résistance à la traction (R_T).....	77
Figure V.8	Courbes des surfaces de réponse et courbes isoréponses de la microdureté (MD).....	79
Figure V.9	Micrographies par MEB de l'interface du joint de : (a) l'échantillon 7, (b) l'échantillon 11 et (c) l'échantillon 8.....	82
Figure V.10	Résultats de l'analyse par EDS de l'échantillon (7).....	83
Figure V.11	Joints acier doux/alumine soudés par friction rotative, avec l'utilisation d'une couche intermédiaire en aluminium.....	84
Figure V.12	Echantillons acier doux/alumine soudés par friction rotative, avec une couche intermédiaire en aluminium.....	85
Figure V.13	Micrographies par microscope optique des joints acier doux/alumine soudés par friction rotative (grossissement $\times 100$) : (a) échantillon 1, (b) échantillon 2, (c) échantillon 3 et (d) échantillon 4.....	86
Figure V.14	Micrographies par MEB des joints acier doux/alumine soudés par friction rotative (grossissement $\times 200$) : (a) échantillon 1, (b) échantillon 2, (c) échantillon 3 et (d) échantillon 4.....	87
Figure V.15	Analyse par MEB des interfaces alumine/aluminium 1100 et aluminium 1100/acier doux.	88
Figure V.16	Analyse par EDS des joints acier doux/aluminium 1100 soudés par friction rotative.....	89
Figure V.17	Variations de la résistance à la flexion et de l'épaisseur de la couche résiduelle d'Al en fonction du temps de friction.	92
Figure V.18	Variation de la microdureté le long des joints acier doux/alumine : (a) échantillon 1, (b) échantillon 2, (c) échantillon 3 et (d) échantillon 4...	93
Figure V.19	Variation de la microdureté à l'interface alumine/aluminium des joints acier doux/alumine	94

Figure A.1	Diagramme de la méthode des surfaces de réponses.....	98
Figure A.2	Représentation géométrique de la surface de réponses	99
Figure A.3	Plan composite centré à deux (02) facteurs.....	101

Liste des tableaux		Page
Tableau I.1	Classification des aciers de base selon le teneur en carbone	6
Tableau I.2	Propriétés physiques et mécaniques de certaines céramiques techniques.....	7
Tableau II.1	Comparaison entre soudage par friction à entraînement direct et soudage par friction inertielle.....	38
Tableau II.2	Combinaisons possibles de matériaux soudables par le soudage par friction.....	39
Tableau IV.1	Composition chimique de l'Acier doux (déterminée par Spectrométrie de fluorescence des rayons X (XRF)).....	52
Tableau IV.2	Composition chimique de l'alliage d'aluminium 1100 (déterminée par XRF).	52
Tableau IV.3	Composition chimique de l'alumine (déterminée par XRF).....	53
Tableau IV.4	Paramètres de soudage par friction acier doux/aluminium 1100	56
Tableau IV.5	Valeurs opérationnelles des facteurs A et B.....	57
Tableau IV.6	Plan composite centré (CCD) de petite taille conçu pour le soudage acier doux/aluminium 1100.....	58
Tableau IV.7	Paramètres de soudage par friction rotative acier doux/alumine.....	63
Tableau V.1	Matrice du plan composite centré (CCD) de petite taille	73
Tableau V.2	Analyse de variances (ANOVA) pour la résistance à la traction et la microdureté des joints aciers doux/aluminium 1100.....	75
Tableau V.3	Critères d'optimisation des paramètres de soudage acier doux/aluminium 1100	78
Tableau V.4	Solutions optimales du soudage acier doux/aluminium 1100	78
Tableau V.5	Comparaison entre les valeurs prévues et les valeurs expérimentales.	80
Tableau V.6	Paramètres de soudage par friction rotative des échantillons : 7, 11 et 8.	81
Tableau A.1	Taille de quelques plans composites centrés.....	103

INTRODUCTION

GENERALE

Introduction générale

Dans l'industrie moderne, les métaux et les céramiques sont parmi les matériaux les plus utilisables. Les métaux ont des propriétés particulières telles que la bonne malléabilité, la grande ductilité et la conductivité électrique et thermique élevée. Les céramiques ont certaines propriétés supérieures à celles des métaux, comme la dureté élevée, la résistance à l'usure à haute température, la bonne résistance mécanique et chimique, mais malgré ça leur usage est limité à cause de la fragilité et la faible résistance aux chocs. Pour éviter cette limitation d'usage, des joints dissimilaires métal/céramique ont été développés à fin de combiner les caractéristiques des métaux et celles des céramiques. Ces joints peuvent être obtenus par des procédés d'assemblage comme le brasage ou le soudage, mais le mécanisme d'assemblage métal/céramique n'a pas encore été complètement compris à cause de la différence en propriétés mécaniques et chimiques de ces matériaux.

Le soudage par friction est un procédé mécanique où la chaleur nécessaire pour le soudage est fournie en frottant ou en mettant en rotation l'une contre l'autre les pièces à assembler sous une pression (ou effort) axiale. Ce procédé permet l'assemblage rapide des matériaux similaires (identiques) ou dissimilaires (non identiques) à l'état solide, c'est-à-dire que la température au cours du processus de soudage n'atteint jamais la température de fusion des matériaux à souder. Les principaux paramètres de ce procédé sont : le temps, la vitesse de rotation et l'effort appliqué.

D'après la littérature, le soudage par friction est l'une des possibilités d'obtenir des joints métal/céramique, mais malheureusement, le nombre de métaux pouvant être soudés directement à des céramiques est très limité. Cette limitation peut être surmontée par insertion d'un troisième matériau, en tant que couche intermédiaire, dans le procédé de soudage métal/céramique, à condition que ce matériau forme une soudure par friction avec les deux autres matériaux lorsqu'ils sont soudés séparément. Les alliages d'aluminium font partie des matériaux les plus utilisés pour former la couche intermédiaire dans l'opération de soudage par friction métal/céramique.

Pour une contribution aux travaux de recherche précédents sur le soudage par friction métal/céramique, notre travail a pour objectif de réussir à souder par friction un acier doux avec un matériau céramique tel que l'alumine Al_2O_3 . Ce travail est réalisé en deux parties. Premièrement, l'acier doux est soudé par friction à l'alliage d'aluminium 1100, avec une

optimisation des paramètres de soudage afin d'obtenir des bons joints acier/aluminium 1100. Le but de cette partie est de former une couche intermédiaire en aluminium bien soudée à l'acier. En deuxième partie, l'alumine est mise en contact avec la couche aluminium soudée à l'acier pour réaliser le soudage par friction acier/alumine. Dans cette partie, les paramètres de soudage sont variés afin d'étudier leur effet sur les propriétés des joints acier/alumine.

Cette thèse s'articule autour de cinq chapitres :

Le premier chapitre présente le processus d'assemblage métal/céramique, tout en commençant par la définition de ces matériaux, de leurs propriétés et de leurs utilisations, ensuite la présentation des différentes techniques utilisées pour réaliser cet assemblage.

Le deuxième chapitre consiste à présenter le procédé de soudage par friction rotative, avec l'exposition de ses différents types, leurs principes de base, leurs avantages et leurs inconvénients.

Le troisième chapitre présente une synthèse bibliographique sur le soudage par friction rotative acier/céramique, tout en commençant par exposition des travaux de recherche publiés sur ce sujet, puis nous essayons d'extraire leurs principaux résultats.

Le quatrième chapitre discute les propriétés des matériaux utilisés et la procédure expérimentale suivie. Ce chapitre sera divisé en trois parties, la première partie présente les matériaux à souder, leurs caractéristiques et les étapes de leur préparation pour le soudage, ainsi que les équipements de soudage utilisés. La deuxième partie, discute la méthodologie et la procédure expérimentale suivie lors de la réalisation de ce travail, et la troisième partie rapporte les détails des techniques de caractérisations utilisées.

Le dernier chapitre rapporte tous les résultats obtenus avec les commentaires, les interprétations et la discussion.

A la fin de cette thèse, nous trouverons une conclusion générale suivie par des perspectives.

CHAPITRE I

Généralités sur l'assemblage

Métal/Céramique

I.1 Introduction

Ce chapitre présente des généralités sur les processus d'assemblage des matériaux dissimilaires, notamment les métaux avec les céramiques. En commençant par la définition de ces matériaux, leurs propriétés et leurs utilisations, ensuite la présentation des différentes techniques utilisées pour réaliser leur assemblage.

I.2. Généralités sur les matériaux

Un matériau désigne toute matière ou substance, d'origine naturelle ou artificielle, utilisée pour fabriquer un objet ou une pièce. Les matériaux sont à la source de la technologie et du monde industriel [1].

I.2.1. Classification des matériaux

Les matériaux peuvent être classés selon leur structure atomique, en quatre grandes familles [1] :

- *Les matériaux métalliques* comme le fer, le cuivre ou le bronze, qui sont généralement durs et bons conducteurs d'électricité ;
- *Les polymères* comme le coton, le cuir, le caoutchouc ou les plastiques (PVC, le polyester, ..),
- *Les matériaux céramiques* comme le verre, le plâtre ou les céramiques techniques ;
- *Les matériaux composites* comme la fibre de carbone, le contreplaqué ou le béton armé, additionnant les avantages des matériaux qui les composent.

I.2.2 Propriétés des matériaux

Un matériau est généralement sélectionné en fonction de ses propriétés particulières qu'il doit notamment à sa nature chimique et/ou à sa forme physique. Ces propriétés permettront ensuite un usage spécifique de l'objet fabriqué. Les propriétés des matériaux sont classées comme suit :

- **Propriétés physiques** : comme la masse volumique, le point de fusion, la conductivité électrique, la conductivité thermique, l'énergie de surface, la chaleur massique, le coefficient de dilatation thermique, l'indice de réfraction, ...etc.

- **Propriétés chimiques** : comme la résistance à l'oxydation, la résistance à la corrosion, la stabilité chimique, la réactivité, ...etc.
- **Propriétés mécaniques** : comme l'élasticité, la plasticité, la résistance à la rupture, la ténacité, la dureté, la résistance à l'usure, la tenue à la fatigue, la tenue au fluage, ...etc.

I.2.3. Matériaux métalliques

La figure I.1 : présente une classification de divers matériaux métalliques.

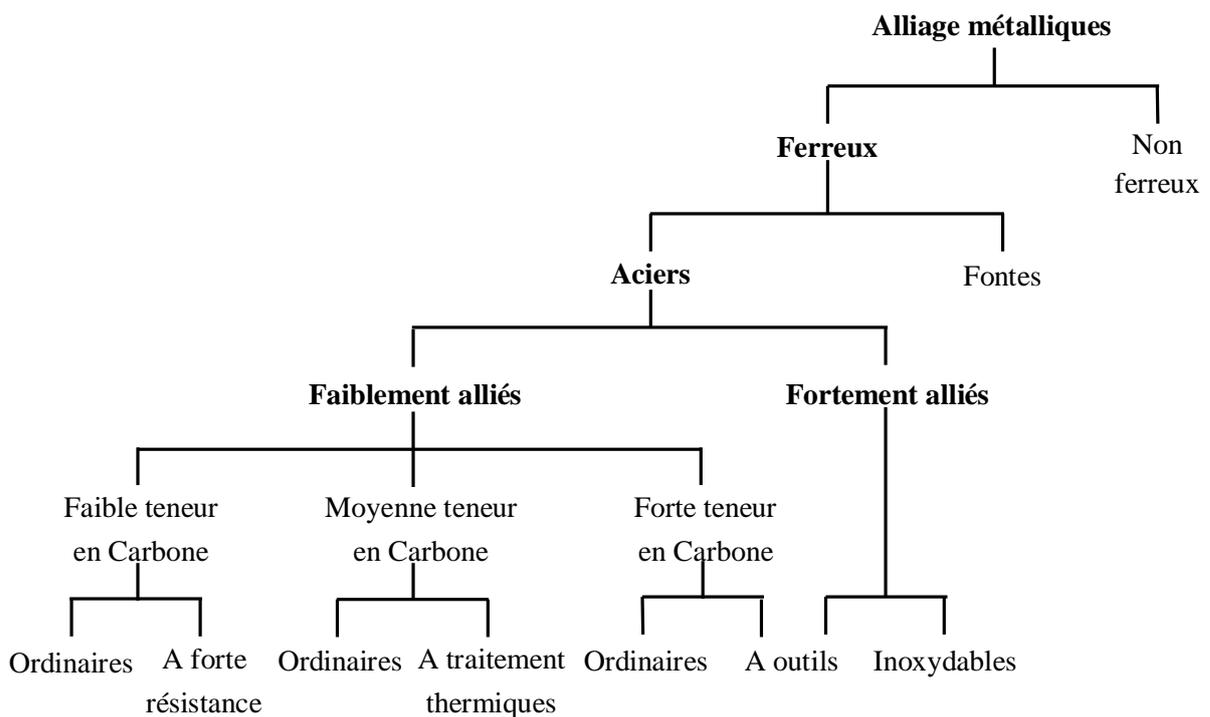


Figure I.1. Classification de divers alliages métalliques [2].

1- Les aciers et leur classification

Les aciers sont des alliages ferreux (à base de fer) contiennent moins de 2.14 % de carbone en poids, plus d'autres éléments introduits lors de leur élaboration. Il existe aujourd'hui des milliers de nuances d'aciers qu'on s'efforce de classer en fonction de deux critères : la composition chimique et le niveau de qualité.

La composition chimique des aciers permet de distinguer [1] :

- Les aciers non alliés : si l'ensemble des éléments d'alliage représente moins de 1 % (≤ 1 %) en poids

- Les aciers peu alliés : si la teneur de chaque élément d'alliage est inférieure ou égale à 5 % (≤ 5 %) en poids,
- Les aciers fortement alliés : dès qu'un des additifs atteint ou dépasse 5 % (cette distinction n'est pas normalisée).

Le niveau de qualité détermine la précision et la sévérité avec lesquelles sont garanties les propriétés d'usage. Il permet de distinguer [1]:

- Les aciers de base : ne faisant l'objet d'aucune prescription nécessitant des précautions spéciales durant la fabrication ;
- Les aciers de qualité : répondant à des prescriptions plus sévères que celles relatives aux aciers de base et demandant donc certaines précautions lors de la fabrication.
- Les aciers spéciaux : présentant une plus grande pureté que les aciers de qualité. Ils sont constitués des quatre familles [2] :
 - Les aciers de construction mécanique : sont utilisés pour la réalisation de machines ou de mécanismes très variés,
 - Les aciers à outils (ou aciers rapides) : sont choisis pour la fabrication de tous les outillages,
 - Les aciers inoxydables (très alliés) : ils ont une résistance à la corrosion très élevée,
 - Les aciers spéciaux divers.

2- Les aciers de base

Les aciers de base, ou dits parfois aciers d'usage général, représentent plus de 80 % de l'ensemble des aciers disponibles. En plus du carbone, qui constitue l'élément d'alliage essentiel, ils contiennent d'autres éléments d'addition (manganèse, silicium, etc.) et des impuretés (soufre, phosphore, etc.) [2].

Généralement, les aciers de base sont soudables et ne sont pas destinés à subir des traitements thermiques. Selon la teneur en carbone, la famille des aciers de base comprend : les aciers extra-doux, les doux, les mi-durs, les durs et les extra-durs (Tableau I.1).

Tableau I.1. Classification des aciers de base selon le teneur en carbone [1, 2].

Aciers de base	Teneur en carbone C (% en poids)	Résistance à la traction
Extra-doux	< 0,1	Ordre de 350 MPa
Doux	0,1 à 0,25	Ordre de 400 MPa
Mi-doux	0,25 à 0,40	Ordre de 500 MPa
Mi-durs	0,40 à 0,60	Ordre de 600 MPa
Durs	0,60 à 1,00	Ordre de 700 MPa
Extra-durs	> 1,00	Supérieure à 750 MPa

3- Les aciers doux

Les aciers doux sont les aciers dont la teneur en carbone varie de 0,1 à 0,25 %, et dont la résistance à la traction est de l'ordre de 400 MPa. Ils sont largement utilisés en construction métallique (tubes, barres ou tôles).

I.2.4. Les matériaux céramiques

D'une manière générale, un matériau céramique est un solide inorganique non métallique [3].

1- Classification des matériaux céramiques :

La composition chimique des matériaux céramiques permet de distinguer deux types :

- *Les céramiques traditionnelles* : telles que la porcelaine, la poterie, les appareils sanitaires, les briques, les tuiles et tous les produits constitués essentiellement de silicates. Elles sont élaborées essentiellement à partir des alumino-silicates naturels (argile, kaolin, quartz), après mélanger avec l'eau (barbotine) [4].
- *Les céramiques techniques* : inclus les matériaux céramiques non silicatés comme les oxydes, les carbures, les nitrures, les borures,.... Elles sont obtenues le plus souvent par un traitement thermique (le frittage) [3, 4].

2- Les céramiques techniques (industrielles)

On appelle céramique technique, un matériau non métallique et non organique destiné à des applications industrielles.

3- Types des céramiques techniques

Il existe deux types de céramiques techniques [5] :

- *Les céramiques oxydes* : se composent principalement d'oxydes des métaux tels que l'oxyde d'aluminium (alumine) ou l'oxyde de zirconium (zircone).
- *Les céramiques non oxydes* : tels que le carbure de silicium, le nitrure de silicium et le nitrure d'aluminium.

Le tableau I.2 donne les propriétés physiques et mécaniques de certaines céramiques techniques.

4- L'alumine

L'oxyde d'aluminium (Al_2O_3), couramment appelé alumine, est la céramique technique de haute performance la plus utilisée. L'alumine est un céramique réfractaire ($T_{\text{fusion}} = 2054$ °C). L'alumine est utilisée dans des applications très diverses tirant profit de sa résistance chimique, thermique et électrique (figure I.2). Elle est par exemple utilisée comme matériau réfractaire, comme abrasif dans des applications de polissage et comme catalyseur dans plusieurs réactions d'importance industrielle (raffinage du pétrole).

Tableau I.2. Propriétés physiques et mécaniques de certaines céramiques techniques [4].

La céramique	Masse Vol. (g/cm^3)	Temp. de fusion ($^{\circ}\text{C}$)	Cond. Therm. ($\text{W}/\text{m}\cdot\text{K}$)	Coeff. de dilat. liné. ($10^{-6}/\text{K}$)	Module de Young (GPa)	Résist. à la compr. (MPa)
Alumine (Al_2O_3)	3.9	2050 – 2060	24 – 35	8 – 8.9	330 – 400	1750 – 3000
Zircone (ZrO_2)	5.6	2680 – 2710	2 – 12	7 – 9	180 – 240	1650 – 3600
Carbure de silicium (SiC)	3.2	2700 – 2830	90 – 200	4.3 – 4.6	390 – 440	2000 – 3500
Nitrure de silicium (Si_3N_4)	3.2	1890 – 1900	15 – 43	2.6 – 3.3	280 – 310	11000 – 15000
Nitrure de Bore (BN)	2.1	2900 – 3100	20 – 52	1 – 10	20 – 100	225 – 540



Figure I.2. Exemple des applications d'alumine (Al₂O₃) [6].

I.3. Les assemblages métal/céramique

En termes des applications industrielles, les céramiques et les métaux sont les matériaux les plus utilisables, en raison de leurs diverses propriétés physiques, chimiques et mécaniques. Mais malgré cela, aucun métal ou céramique ne peut répondre à tous les besoins du progrès industriel rapide.

Pour cette raison, l'utilisation des assemblages métal/céramique, qui combinent les propriétés de ces deux matériaux, devient de plus en plus indispensable pour répondre aux exigences des industries modernes.

I.4. Techniques d'assemblage métal/céramique

D'un point de vue pratique, l'assemblage d'un métal à une céramique n'est pas un processus simple ou facile [7], puisque la majorité des techniques d'assemblage implique le chauffage des matériaux à assembler, et lors du refroidissement les défauts ont apparu à cause des coefficients de dilatation thermique et des modules d'élasticité très différents. Cette différence entraîne au développement des contraintes résiduelles, et par conséquent à la dégradation de la qualité des assemblages [8].

Au cours des dernières années, plusieurs techniques ont été développées pour assembler les métaux aux céramiques, tels que la fixation mécanique, l'assemblage indirect par le brasage ou direct par le soudage (figure I.3).

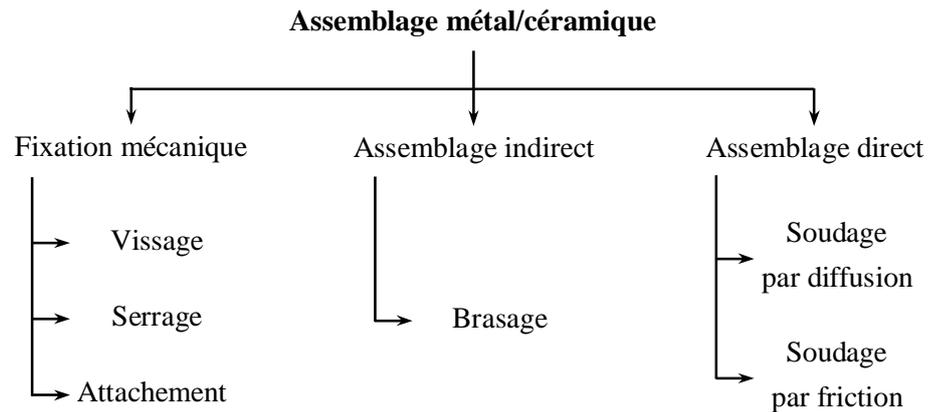


Figure I.3. Procédés d'assemblage métal/céramique [7].

I.4.1. Assemblage métal/céramique par fixation mécanique

En pratique, la fixation mécanique est une technique d'assemblage très ancienne, elle est basée sur la fixation ponctuelle et localisée par un clou, un rivet, une vis, une pince, un boulon ou une attache [9].

La fixation mécanique d'un métal à une céramique est généralement caractérisée par [9] :

- La nécessité d'une préparation mécanique spéciale des matériaux, tels que le perçage de trous, le filetage de vis ou le chanfreinage des surfaces adjacentes.
- Le processus d'assemblage est réalisé généralement sans cycle de chauffage.

Avantages et inconvénients de la fixation mécanique métal/céramique

Les assemblages métal/céramique par fixation mécaniques sont favorisés en raison de leurs avantages, tels que la facilité en assemblage et en démontage des matériaux (assemblages réversibles), et aussi le faible coût de réalisation [7, 9].

L'inconvénient principal de cette technique c'est la faible résistance des assemblages métal/céramique, à cause des contraintes générées par les processus de filetage ou de perçage.

La figure I.4 présente des exemples des assemblages métal/céramique développés par la fixation mécanique.



Figure I.4. Exemples des assemblages métal/céramique par fixation mécanique [10].

I.4.2. Assemblage métal/céramique indirecte : Le brasage

Le brasage est l'une des techniques d'assemblage les plus utilisées pour assembler différents types de métaux ou de matériaux céramiques [11].

1- Définition de brasage

Le brasage est défini comme un processus destiné à joindre de manière permanente deux ou plusieurs matériaux pour former un ensemble unique. Il peut s'effectuer entre des matériaux similaires (brasage homogène), ou entre des matériaux dissimilaires (brasage hétérogène) [12].

Cette technique est largement utilisée dans les industries de pointe telles que l'aérospatiale, l'aéronautique, l'automobile et l'électronique. Elle se caractérise par la possibilité de réaliser des assemblages de formes complexes difficiles ou même impossibles à réaliser par d'autres techniques d'assemblage [11,12].

2- Principe de brasage

Le procédé de brasage consiste à interposer un métal d'apport entre les surfaces des matériaux de base. Sous l'effet d'un chauffage externe, le métal d'apport dont le point de fusion est inférieur à celui des matériaux de base, fusionné est aspiré (par capillarité) dans l'espace situé entre les surfaces des matériaux à assembler. Le brasage ne nécessite pas la fusion des extrémités des pièces à assembler [12].

Le processus de brasage est basé sur [9, 12] :

- *Un métal d'apport* : constitue d'alliages binaires, ternaires ou quaternaires. Le choix du métal d'apport est lié à la valeur du point de fusion des matériaux de base et à sa réactivité thermodynamique vis-à-vis les matériaux de base. Le métal d'apport préserve la continuité de la matière entre les deux pièces à braser, alors qu'au niveau atomique, il n'y a pas de diffusion du métal d'apport dans les matériaux de base.
- *Un moyen de chauffage* : comme un fer à souder, un air chaud, une flamme ou un chalumeau), un four ou une induction électromagnétique.

3- Modes de brasage

Un processus de brasage peut être réalisé en deux modes [12] :

- Le brasage tendre (le terme technique en anglais c'est *soldering*) : où la température de chauffage est inférieure à 450 ° C. Les assemblages de la plupart des matériaux, réalisé par ce mode ont une faible résistance mécanique.
- Le brasage dur ou fort (en anglais *brazing*) : où la température de chauffage est supérieure à 450 ° C. Ce mode donne des assemblages d'une résistance mécanique élevée.

4- Le brasage métal/céramique

La formation d'un assemblage métal/céramique par le processus de brasage s'appuie essentiellement sur deux mécanismes de base [9, 13]:

- La mouillabilité du métal d'apport à l'état liquide sur les interfaces des matériaux de base.
- Les interactions entre le métal d'apport à l'état liquide et les matériaux de base.

Mouillabilité du métal d'apport

La mouillabilité est la faculté d'un liquide à s'étaler sur une surface solide. Elle est définie par l'angle de contact θ d'une goutte liquide sur un substrat solide en équilibre avec une phase vapeur (figure I.5) [9].

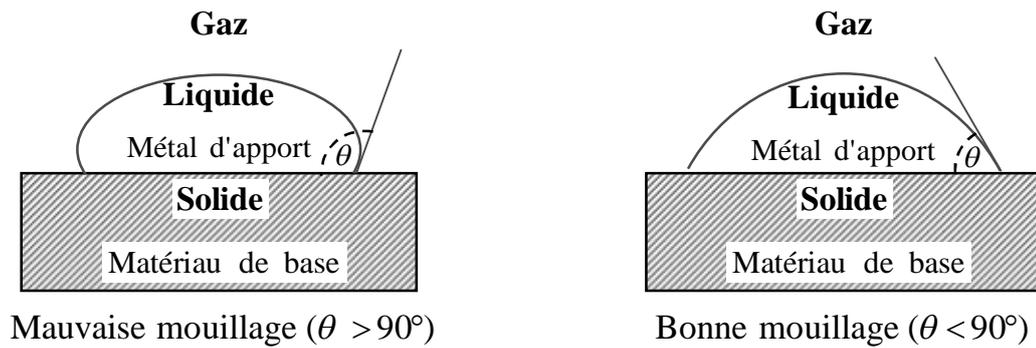


Figure I.5. La mouillabilité du métal d'apport à l'état liquide [9].

Le principal défi en développement des joints métal/céramique par brasage s'exprime dans la mauvaise mouillabilité de la céramique [13]. Pour cela, on peut jouer sur la nature du métal d'apport et/ou sur la préparation des surfaces des matériaux. Dans ce dernier cas, on distingue ainsi deux techniques essentielles de brasage :

- *Le brasage réactif (ou direct)* : l'amélioration de la mouillabilité par cette technique nécessite l'utilisation des métaux actifs sur la surface de la céramique sans la recouvrir. Dans cette technique, le métal actif réagit avec la surface de la céramique formant une couche interfaciale pouvant être mouillée par le métal d'apport (figure I.6). Le titane est un élément actif largement utilisé pour le brasage réactif des céramiques à base d'oxydes [14]. D'autres éléments actifs comme Ni, Al, Hf, Th, V, Nb, Ta, Cr, ..etc, peuvent être utilisés [15]. Pour le brasage de la céramique sur la céramique ou sur le métal, l'alliage ternaire Ag-Cu-Ti est le métal d'apport le plus populaire [16].

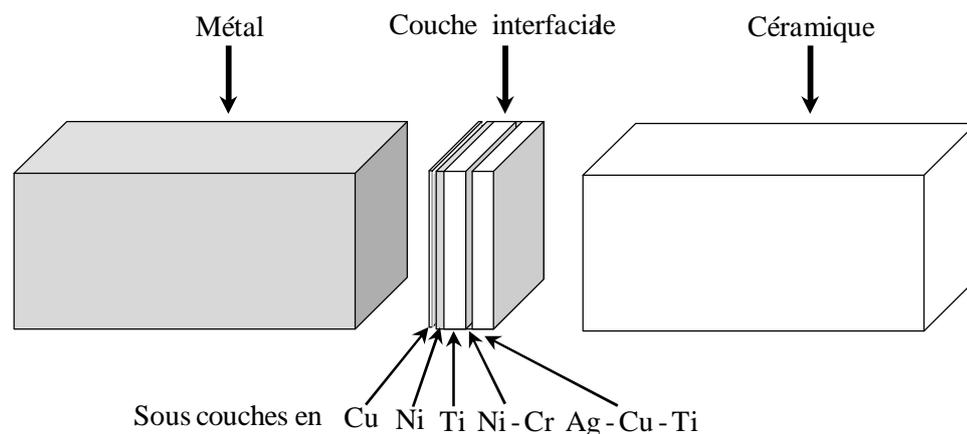


Figure I.6. Schéma de brasage réactif métal/céramique [15, 17].

- *Le brasage non réactif (ou indirect)* : cette technique consistait à revêtir la surface de la céramique par une couche métallique (métallisation) appropriée avant le brasage [18]. Les techniques de revêtement utilisées pour la métallisation des céramiques comprennent la pulvérisation cathodique ou la CVD. Les céramiques à base d'alumine peuvent être assemblées par brasage indirect avec un revêtement de molybdène-manganèse (Mo-Mn) [19].

Cycle du procédé de brasage métal/céramique

En général, le procédé de brasage métal/céramique se fait dans un four sous atmosphère contrôlée pour protéger les matériaux métalliques des différentes agressions chimiques qu'ils pourraient subir à haute température. La figure I.7 présente le cycle du procédé de brasage et les principales étapes de la formation de l'assemblage métal/céramique. La figure I.8 présente des exemples industriels des joints métal/céramique réalisés par brasage.

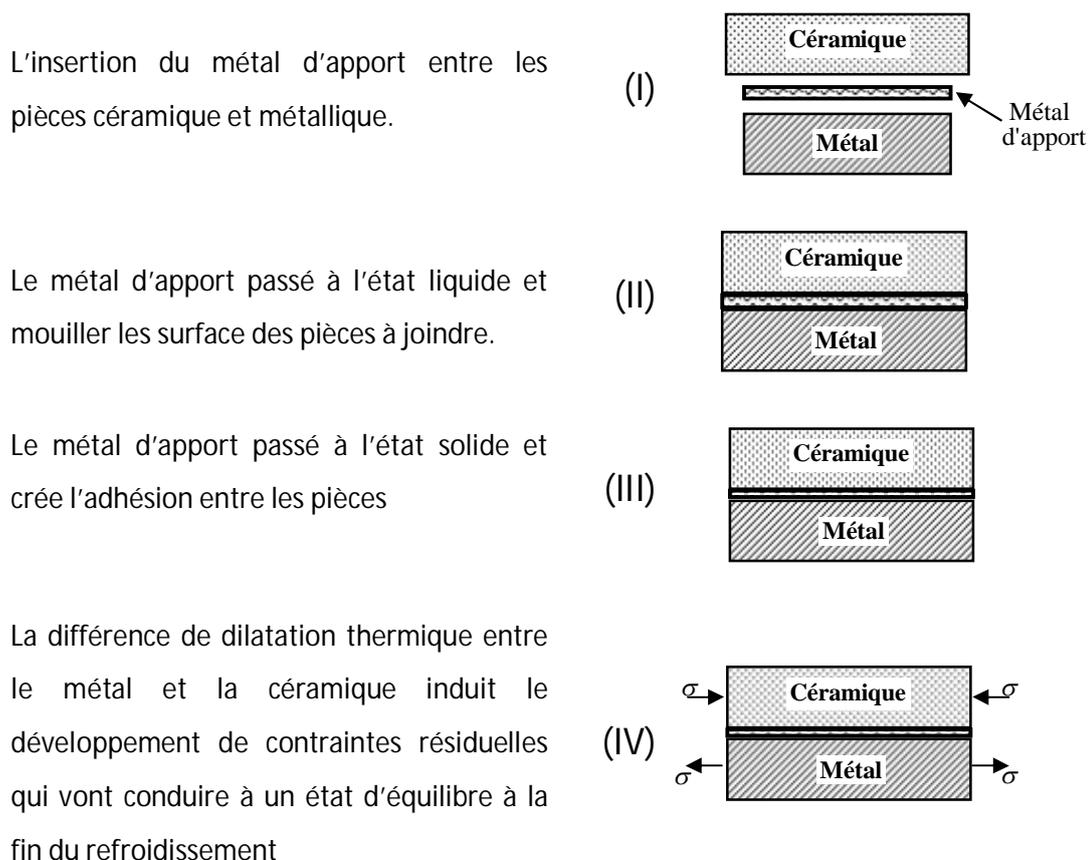


Figure I.7. Cycle du procédé de brasage métal/céramique [9].



Figure I.8. Exemples des assemblages métal/céramique par brasage [20].

I.4.3. Assemblage métal/céramique direct : Le soudage à l'état solide

Le soudage est une opération qui consiste à réunir deux ou plusieurs parties constitutives d'un assemblage, de manière à assurer la continuité entre les parties à assembler; soit par chauffage, soit par intervention de pression, soit par l'un et l'autre. La soudure est le nom donné au joint formé par le soudage. Le soudage fait une partie du domaine de l'assemblage, la différence essentielle entre les soudures et les autres assemblages est la continuité entre les pièces. Les soudures sont donc non démontables (assemblage irréversible) [21].

Dans le procédé de soudage, la liaison atomique réalisée au niveau du joint nécessite l'intervention d'une source d'énergie, intérieure ou extérieure, qui crée une élévation de la température de surfaces des pièces à souder. Les sources d'énergie utilisées sont de type électrique, chimique, mécanique ou optique [21].

1- Classement des procédés de soudage

On estime qu'il y a, actuellement, des dizaines de procédés de soudage subdivisés en deux grands groupes [21, 22] :

- Procédés de soudage par fusion : Dans ces procédés, les côtés des pièces à souder sont portés à fusion. Les procédés par fusion les plus courants sont le soudage oxyacétylénique ou par chalumeau, le soudage à l'arc électrique, le soudage au laser, etc.
- Procédés de soudage par pression : Dans ces procédés, les pièces à souder sont pressées l'un contre l'autre, avec ou sans chauffage additionnel des surfaces à souder. Ces procédés sont subdivisés en deux sous groupes: les procédés de soudage à l'état solide et les procédés de soudage par pression avec fusion.

2- Procédés de soudage à l'état solide

Dans ces procédés, les pièces à souder ne sont pas portées à fusion, alors elles conservent leurs propriétés originelles. Les procédés de soudage par diffusion et par friction sont des procédés de soudage à l'état solide [22].

3- Assemblage métal/céramique par soudage par diffusion

Le soudage par diffusion était l'une des premières techniques d'assemblage développées par l'homme, il consiste à assembler deux pièces à l'état solide en provoquant une diffusion réciproque des atomes à l'interface du contact [23]. Le soudage par diffusion est un processus capable de joindre une large gamme de combinaisons des matériaux similaires et dissimilaires.

Principe de soudage par diffusion

Le principe de ce procédé, dans sa forme la plus simple, est le maintien des surfaces planes des pièces à souder sous une charge (une pression) à une température élevée, généralement sous vide ou dans une atmosphère de gaz inerte. La chaleur peut être appliquée par un chauffage par rayonnement, par induction ou par résistance. Les durées du maintien peuvent aller de 1 à 60 minutes, tout en dépend des matériaux à souder [22].

Soudage par diffusion métal/céramique

Le soudage par diffusion est principalement réalisé dans une atmosphère protectrice, la chaleur étant appliquée par chauffage par rayonnement, par induction ou par résistance. Généralement, l'utilisation d'une couche intermédiaire métallique, qui peut interagir avec la céramique pendant le processus d'assemblage est nécessaire [24–26].

La pression peut être appliquée uniaxialement ou isostatiquement. Dans le premier cas, une basse pression (3-10 MPa) est appliquée pour empêcher la macro-déformation des pièces. Cette forme de procédé nécessite donc une bonne finition des surfaces de contact (finition supérieure à $0,4 \mu\text{m}$ est recommandée) [25].

En pressage isostatique à chaud, des pressions beaucoup plus élevées (100 - 200 MPa) peuvent être appliquées. La bonne finition des surfaces n'est pas exigée (finition de $0,8 \mu\text{m}$ et plus peut être utilisée) [25, 26].

La figure I.9, montre des exemples d'assemblage métal/céramique réalisés par soudage par diffusion.

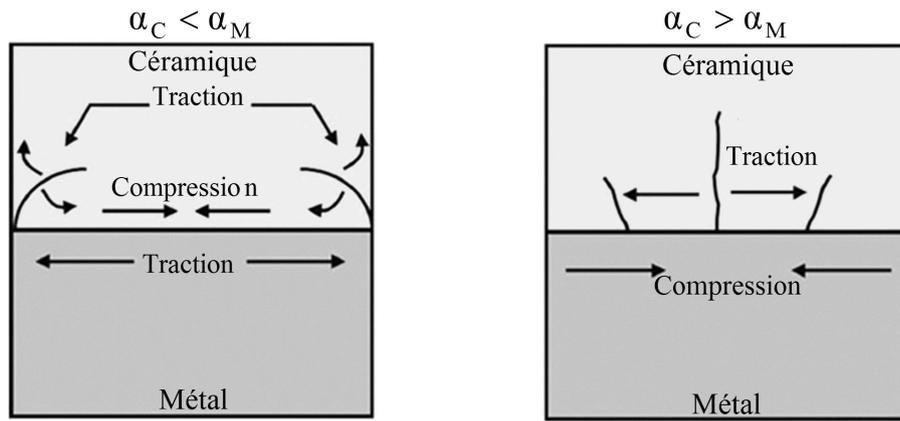


Figure I.9. Exemples des assemblages métal/céramique par soudage par diffusion [27].

Avantages et inconvénients du soudage par diffusion métal/céramique

Le soudage par diffusion est considéré comme une technique avantageuse pour l'assemblage des métaux aux céramiques. En comparaison au brasage, le soudage par diffusion n'implique pas l'insertion des éléments métalliques (métal d'apport) dans l'interface des joints, cela peut être avantageux du point de vue de la résistance à la corrosion du joint [28].

Le principal inconvénient de cette technique est le degré élevé des contraintes thermiques à l'interface, résultant de l'application des hautes températures et de la différence des coefficients de dilatation thermique des matériaux à assembler [7, 28]. La figure I.10 montre que si le coefficient de dilatation thermique « α_C » de la céramique est inférieur à celui du métal « α_M », la céramique est soumise à des contraintes de traction, et des fissures ont apparu sur les bords de la céramique (figure I.10.a). D'autre part, si « α_C » est supérieur à



(a) Fissures des bords en céramique

(b) Fissures de noyau en céramique

Figure I.10. Illustration schématique des contraintes thermiques dans l'interface métal/céramique [28].

« α_M », les contraintes de tractions agissent sur le noyau de la céramique et fissurent la, non pas sur les bords, mais transversalement sur le noyau (figure I.10.b).

I.4.4. Assemblage métal/céramique par soudage par friction rotative

Le soudage par friction rotative est une méthode de soudage à l'état solide, produisant l'assemblage par la compression d'une pièce en rotation sur une autre pièce fixe. La chaleur nécessaire au soudage est générée principalement par le frottement continu entre les surfaces des deux pièces (figure I.11) [29, 30].

Avantages du soudage par friction rotative métal/céramique

Par rapport aux autres procédés d'assemblage métal/céramique, le soudage par friction rotative présente les avantages spécifiques suivants [31] :

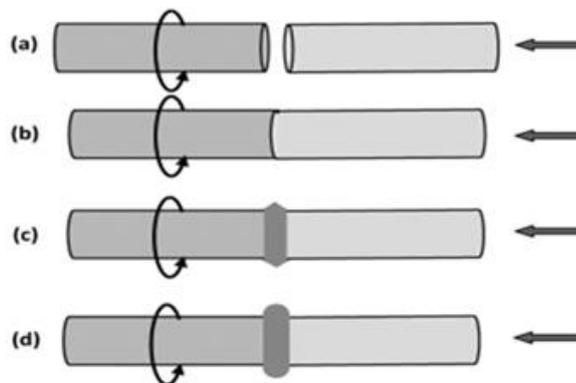


Figure I.11. Procédé de soudage par friction rotative [30].

- Plus rapide que les autres procédés (assemblage en quelques secondes),
- Ne nécessite pas l'utilisation d'un métal d'apport,
- La préparation des surface des matériaux à assembler, avant le soudage, n'est pas nécessaire, car la rotation et la friction tendent à éliminé les couches superficiels.

Qualité du joint métal/céramique soudé par friction rotative

Il n'est pas simple de créer une soudure solide par friction entre un matériau céramique et un métal. Parfois, le joint se casse brusquement à l'interface, ou dans une zone adjacente, du matériau céramique [32, 33].

Les raisons de ce comportement de rupture observé peuvent être attribuées aux causes suivantes [28] :

- La différence importante en type de liaison atomique entre une céramique et un acier. La liaison dans la céramique est principalement de nature ionique ou covalente (et généralement hybride), alors que les métaux ont une liaison métallique.
- La grande différence en coefficients de dilatation thermique entre les deux matériaux. Les céramiques ont généralement un coefficient de dilatation beaucoup plus bas. Lorsque les deux pièces se refroidissent après le soudage, des contraintes thermiques à l'interface de la soudure peuvent se produire, ce qui peut provoquer des fissures.

Utilisation d'une couche intermédiaire

L'insertion d'une couche intermédiaire, entre les pièces à souder, a été appliquée lors du soudage par friction des matériaux dissimilaires. Quelques travaux ont été concentrés sur l'évaluation de l'effet de la couche intermédiaire sur les propriétés mécaniques des joints [34, 35].

Dans le cas du soudage par friction rotative métal/céramique, l'utilisation d'une couche métallique intermédiaire est un moyen essentiel pour améliorer la qualité des joints métal/céramique. La couche métallique est utilisée afin de combler les grandes différences de propriétés des matériaux de base (coefficient de dilatation thermique, conductivité thermique, limite d'élasticité, module d'élasticité, etc.). L'insertion d'une couche métallique entre les deux pièces à souder conduit à l'absorption des contraintes causées par la différence de dilatation thermique des deux matériaux de base.

I.5. Références bibliographiques

1. Ashby, M. F., Jones, D.R., *Engineering Materials 1: An Introduction to Properties, Applications, and Design*. 4 Ed., 2012. Elsevier, Oxford, U. K. p. 2-3.
2. Raouache, E., *Cinétique et mécanismes des transformations de phases dans un acier soudé*, 2012. Thèse de Doctorat en Sciences - Métallurgie, Université Mohamed Khider-Biskra-Algérie.
3. Fantozzi, G. Nièpce, J.C., Bonnefont, G., *les céramiques industrielles Propriétés, mise en forme et applications*, 2013. Dunod, Paris. p. 2.
4. Dupeux, M., *Aide-Mémoire : Science des matériaux*, 2008. Dunod, Paris. p. 277, 287.
5. Lebssisse, L., *Synthèse, étude structurale et morphologique des nouveaux matériaux en céramique*, 2017. Mémoire de Master, Université Kasdi Merbah-Ouargla-Algérie.
6. Image électronique, Available from:
https://www.ceramtec.fr/_img/content/werkstoffe.aluminiumoxid.jpg
7. Nascimento, R. M. D. O., Martinelli, A. E., Buschinelli, A. J. A., *Review Article: Recent advances in metal-ceramic, brazing-Cerâmica*, 2003. 49 : p. 178-198.
8. Paiva, O. C., Barbosa, M. A., *Brazing parameters determine the degradation and mechanical behaviour of alumina/titanium brazed joints*, Journal of Materials Science, 2000. 35: p. 1165-1175.
9. Cazajus, V., *Approches numérique et expérimentale de la liaison céramique métal réalisée par brasage en vue de la création d'un outil d'aide à la conception*, 2007. Thèse de Doctorat en Génie Mécanique, Institut National Polytechnique de Toulouse, France.
10. Image électronique, Available from:
<https://www.zhichuan-co.com/uploads/201815716/small/ceramic-mechanical-seal-tube41570472146.jpg>
11. Elsayy, A. H., Fahmy, M. F., *Brazing of Si₃N₄ ceramic to copper*. Journal of Materials Processing Technology, 1998. 77 : p. 266-272.
12. Humpston, G., Jacobson, D. M., *Principles of Soldering*. ASM International, 2004. p. 3, 4, 33.
13. Vianco, P. T., Hosking, F. M., Stephens, J. J., Walker, C. A., Neilsen, M. K., Glass, S. J., Monroe, S. L., *Aging of Braze Joints: Interface Reactions in Base Metal/Filler Metal Couples, Part II: High-Temperature Au-Ni-Ti Braze Alloy*, Welding Research November, 2002. p. 256-264.

14. Brochu, M., Pugh, M. D., Drew, R. A. L., *Joining silicon nitride ceramic using a composite powder as active brazing alloy*, Materials Science and Engineering A, 2004. 374 : p. 34-42.
15. Zhang, J. X., Chandel, R. S., Chen, Y. Z., Seow, H. P., *Effect of residual stress on the strength of an alumina–steel joint by partial transient liquid phase (PTLP) brazing*, Journal of Materials Processing Technology, 2002. 122 : p. 220-225.
16. Chang, S. Y., Hung, Y. T., Chuang, T. H., *Joining Alumina to Inconel 600 and UMCo-50 Superalloys Using an Sn₁₀Ag₄Ti Active Filler Metal*, Journal of Materials Engineering and Performance, 2003. 12 : p. 123-127.
17. Zhang, J. X., Chandel, R. S., Seo H. P., *Effects of chromium on the interface and bond strength of metal–ceramic joints*, Materials Chemistry and Physics, 2002. 75 : p. 256-259.
18. Włosiński, W., Krajewski, A., Piekoszewski, J., Stanislawski, J., Walice, L., *Intense pulsed plasma beams in ceramic/metal brazing*, Nukleonika, 2000. 45(2) : p. 145-146.
19. Moorhead, A. J., Kim, H. E., *Oxidation behaviour of titanium-containing brazing filler metals*, Journal of Materials Science, 1991. 26 : p. 4067-4075.
20. Image électronique, Available from:
<https://www.friatec-ceramics.com/cache/b/b/7/1/1/bb711a2e957cf27a80f157620fb12f07ca8b2b9b.jpeg>
21. Benissaad, S., *Le soudage TEC 340*, 1991. Office des publications universitaire. Université de Constantine, Algérie. p. 1-2.
22. Weman, K., *Welding processes handbook, 2 ed.*, 2012. Woodhead Publishing Limited, Cambridge, United Kingdom. p. 8.
23. Akselsen, O. M., *Review Diffusion bonding of ceramics*, Journal of Materials Science, 1992. 27 : p. 569-579.
24. Raevska, S., *Reduction of the stresses introduced during the diffusion bonding of dissimilar materials*. Journal of Materials Processing Technology, 1998. 77 : p. 50-53.
25. He, P., Yue, X., Zhang, J. H., *Hot pressing diffusion bonding of a titanium alloy to a stainless steel with an aluminum alloy interlayer*. Materials Science and Engineering A, 2008. 486 :p. 171-176.
26. Deschaux-Beaume, F., Frety, N., Colin, C., *Diffusion Bonding of Si₃N₄-TiN Composite with Nickel-Based Interlayers*. Metallurgical and materials transactions A, 2003. 34 : p. 1627-1636.
27. Image électronique, Available from:

<http://www.ccf.ac.uk/assets/Images/Industry/Diffusion4.jpg>

28. Uday, M. B., Ahmad-Fauzi, M. N., Alias M. N., Srithar R., *Current Issues and Problems in the Joining of Ceramic to Metal*, Joining Technologies, Mahadzir I., IntechOpen, 2016. p. 159-193.
29. Yilbas, B. S., Sahin, A. Z., Coban, A., Abdul-Aleem, B. J., *Investigation into the Properties of Friction Welded Aluminum Bars*, Journal of Materials Processing Technology, 1995. 54 : p. 76-81.
30. Celik, S., Karaoglan, A. D., Ersozlu, I., *An Effective Approach Based on Response Surface Methodology for Predicting Friction Welding Parameters*, High Temperature Materials and Processes, 2015. 35 : p. 235-241.
31. Cazes, R., *soudage par friction*, Techniques de l'ingénieur. Génie mécanique, 1996. (B7745) : p. 1- 6.
32. Noh, M. Z., Hussain, L. B., Ahmad, Z. A., *Alumina–mild steel friction welded at lower rotational speed*. Journal Of Materials Processing Technology, 2008. 204 : p. 279-283.
33. Zimmerman, J., Wlosinski, W., Lindemann, Z. R., *Thermo-mechanical and diffusion modelling in the process of ceramic–metal friction welding*, Journal of materials processing technology, 2009. 209 : p. 1644-1653.
34. Essa, A.A., Bahrani, A.S., *The friction joining of ceramics to metals*, Journal of Materials Processing Technology, 1991. 26 : p. 133-140.
35. Peng, L. Jinglong, L., Honggang, D., Chengzong, J., *Metallurgical and mechanical properties of continuous drive friction welded copper/alumina dissimilar joints*, Materials & Design, 2017. 127 : p. 311-319.

CHAPITRE II

Procédé de Soudage par

Friction Rotative

II.1. Introduction

Le soudage est l'une des méthodes d'assemblage préférées dans différents secteurs industriels, tels que le transport (automobiles, trains, ...), les bâtiments, la construction navale (navires et sous-marins) et l'aéronautique.

Ce chapitre donne un aperçu général d'une nouvelle technique de soudage appelé soudage par friction rotative.

II.2. Soudage par friction

Le soudage par friction semble être basé sur un principe physique remonte à plusieurs siècles: « le frottement, sous une pression, entre deux objets provoque un réchauffement ». Ce processus de soudage à l'état solide (ou mécanique) pouvant produire des soudures de haute qualité entre deux matériaux similaires ou dissimilaires. Les pièces à souder par friction sont forcés de se frotter les unes contre les autres, générant de la chaleur à l'interface. L'augmentation de la température dans la surface de contact, sans atteindre la température de fusion, adoucit les matériaux de chaque côté de l'interface de frottement. Quand la température désirée est atteinte, le frottement est arrêté et les pièces devenues plastiques sont pressées l'une contre l'autre pour former une soudure (Figure II.1). Le mouvement relatif des pièces à souder élimine les impuretés et les oxydes dans les interfaces, et assurant le nettoyage de la zone de soudage [1].

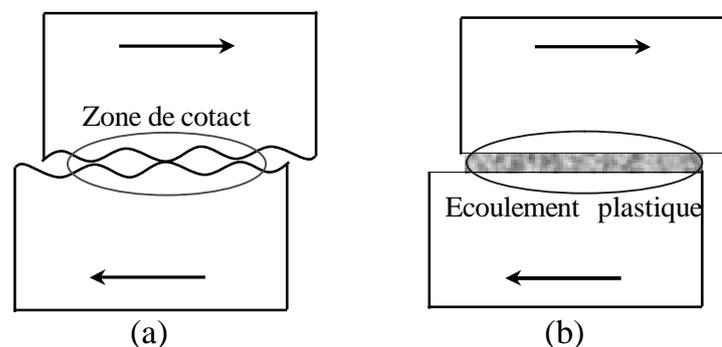


Figure II.1. Illustration schématique de deux étapes de base lors du soudage par friction : (a) friction à sec et (b) écoulement plastique [2].

Classement des procédés de soudage par friction

L'organigramme de la figure II.2 présente la répartition des principaux procédés de soudage basés sur la friction. On peut distinguer deux familles des procédés de soudage par friction, ceux avec rotation des pièces à souder et ceux sans rotation des pièces à souder.

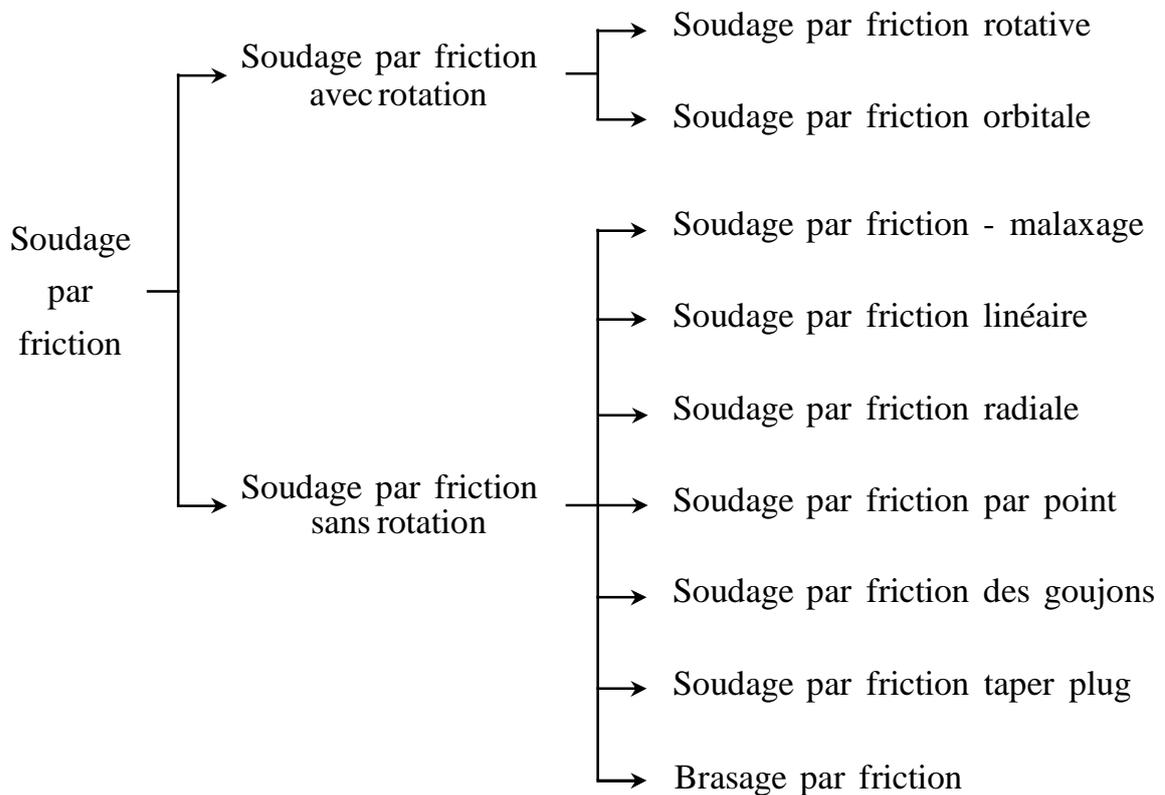
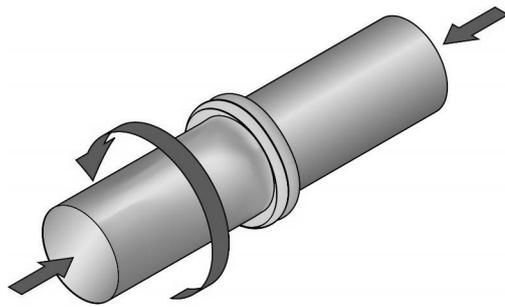
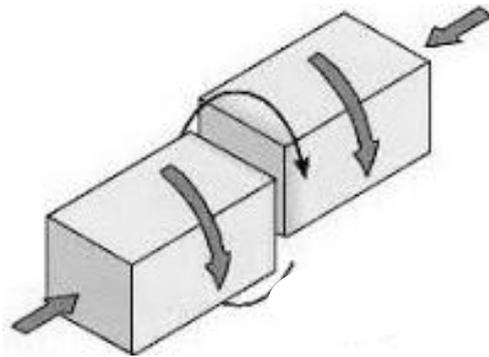


Figure II.2. Classification des procédés de soudage par friction [3].

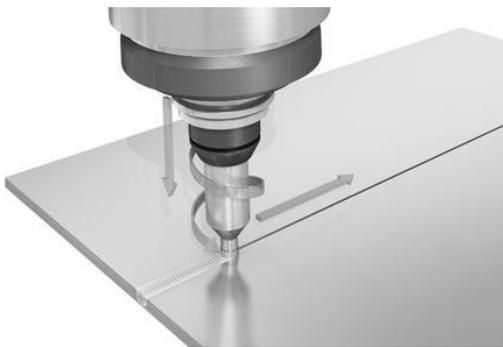
Les procédés de soudage par friction avec rotation peuvent être utilisés pour assembler des pièces symétriques par rapport à l'axe de rotation. La variante la plus utilisée des procédés de soudage par friction avec rotation est le soudage par friction rotative (Rotary Friction Welding). Dans le cas des procédés sans rotation, les pièces non symétriques par rapport à l'axe de rotation peuvent être assemblées l'une à l'autre. Certaines techniques de cette famille sont très connues, comme le soudage par friction-malaxage (Friction Stir Welding), le soudage par friction linéaire (Linear Friction Welding), le soudage par friction radiale (Radial Friction Welding), et d'autres variantes sont moins connues, mais néanmoins intéressantes comme le soudage par friction par point (Friction Stir Spot Welding) (Figure II.3).



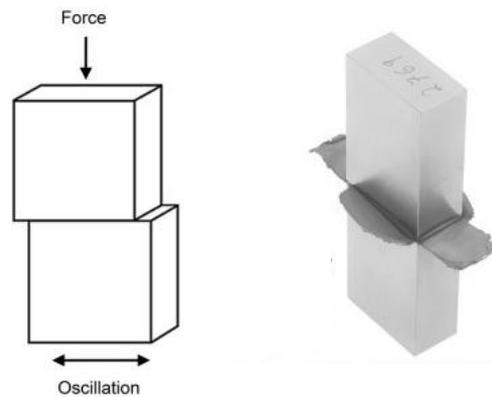
Soudage par friction rotative



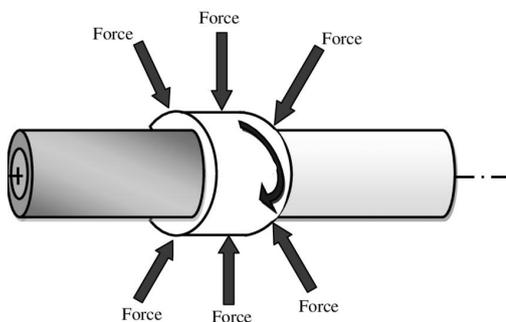
Soudage par friction orbitale



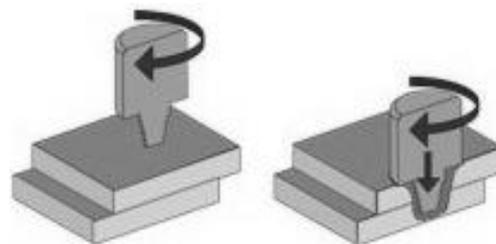
Soudage par friction - malaxage



Soudage par friction linéaire



Soudage par friction radiale



Soudage par friction par point

Figure II.3. Principaux procédés de soudage par friction [4].

II.3. Soudage par friction rotative

II.3.1. Définition

Le soudage par friction rotative est un procédé de soudage par friction où les pièces à souder sont tournées l'une contre l'autre sous l'action d'un effort axial, afin de produire la chaleur nécessaire à l'assemblage [5].

II.3.2. L'histoire de développement du soudage par friction rotative

Bevington a probablement été le premier à exploiter le soudage par friction rotative. En 1891, il obtint un brevet dans lequel le concept d'utilisation de la chaleur de friction pour le procédé de soudage était appliqué (Figure II.4). Cependant, ce n'est pas avant les années 1950 que ce concept a été plus largement envisagé et a atteint la faisabilité commerciale. Le soudage par friction a été mis sur le marché pour la première fois en Russie entre 1956 et 1957 environ, grâce aux efforts de Chudikov, qui a démontré avec succès la possibilité de réaliser des soudures bout à bout de haute qualité entre des tiges métalliques [6].

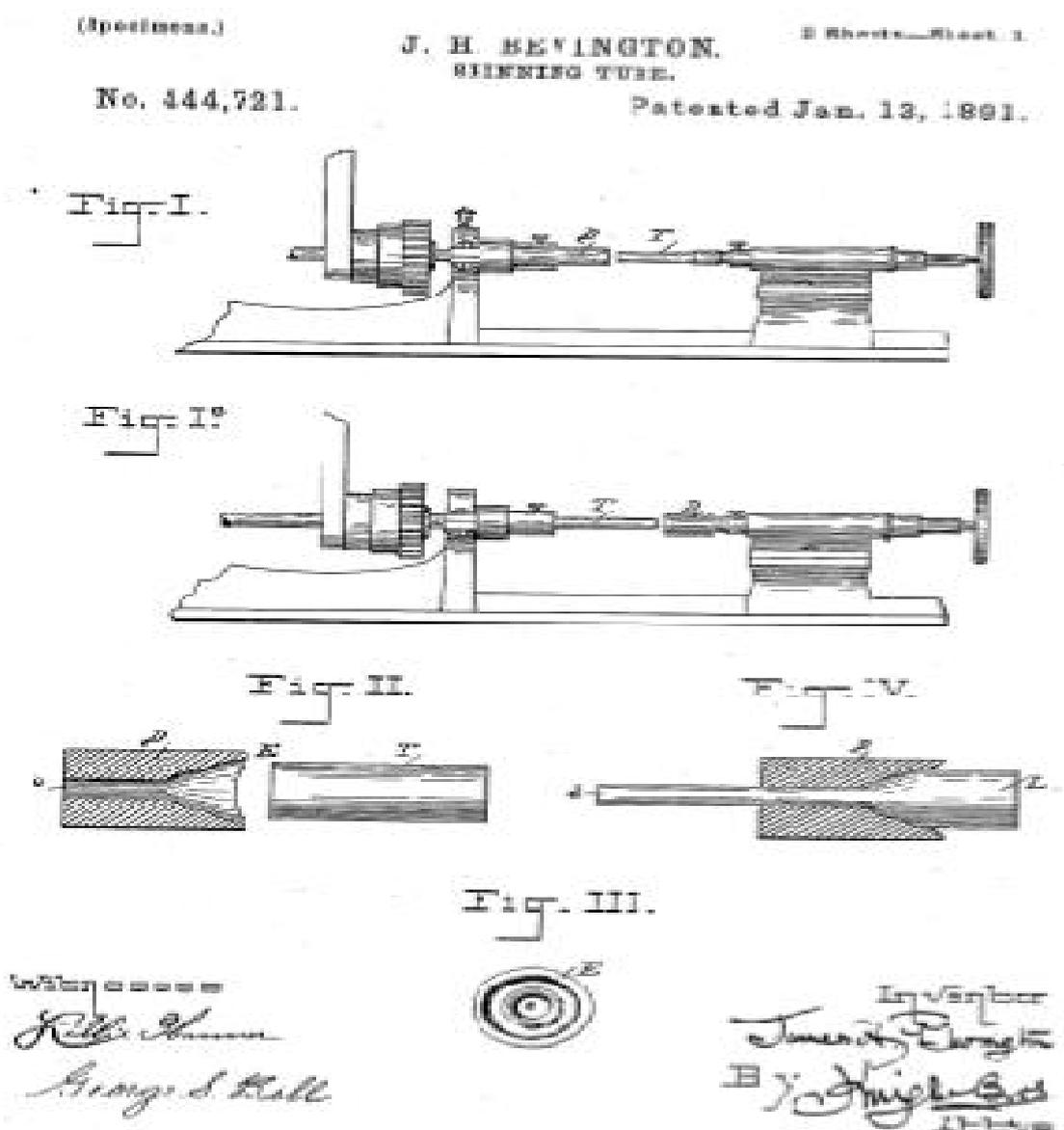


Figure II.4. Illustration d'un brevet sur le soudage par friction rotative par BEVINGTON (1891) [7].

En 1959, Vill et d'autres chercheurs russes ont commencé à définir plus systématiquement les paramètres de soudage en analysant la répartition de l'énergie dans des tiges d'acier soudées par friction. Aux années 1960, la société américaine de fonderies et de machines (American Machine and Foundry Company) a introduit le processus de soudage par friction dans le monde occidental, en rapportant un premier travail expérimental avec une discussion des caractéristiques de base du processus. Ensuite, Cheng (1962) a étudié de manière analytique la répartition de la température pendant le soudage de tubes métallique similaires, ainsi que pour la première fois dissimilaires. Hazlett (1962) et Gupta (1963) ont rapporté, en première fois, les propriétés mécaniques des soudures par friction de plusieurs combinaisons métalliques. Au cours de la même période, les instituts de soudage d'Europe occidentale (Royaume-Uni et en Allemagne de l'Ouest) avaient mené des recherches sur le soudage par friction [6].

Au Japon, l'intérêt croissant pour le soudage par friction chez les milieux industriels et universitaires a conduit à la création de l'association japonaise de soudage par friction (Japan Friction Welding Association) en 1964 [6].

Jusqu'en 1964, tous les procédés de soudage par friction rotative reposaient sur le processus de soudage par friction à entraînement direct (ou soudage par friction pilotée). En 1965, la compagnie américaine des tracteurs CATERPILLAR a introduit le concept d'utilisation d'un volant d'inertie fixé à l'axe rotatif. De cette manière, toute l'énergie nécessaire à la génération de chaleur à l'interface peut être fournie par l'énergie cinétique associée à l'inertie du volant rotatif. Depuis lors, le soudage par friction à inertie est devenu une technique de jonction populaire dans l'industrie de transport [6].

II.3.3. Principe général

Dans le procédé de soudage par friction rotative, la rotation est le moyen utilisé pour créer la friction (Figure II.5). L'une des pièces à souder au moins doit être de révolution, de façon à pouvoir être mise en rotation rapide, l'autre pièce restant fixe. La pièce tournante est serrée dans un mandrin rotatif entraîné par un moteur ou un volant d'inertie. Lorsque la vitesse de rotation désirée est atteinte, la pièce fixe est déplacée selon son axe de façon à appuyer sur la pièce en rotation [8].

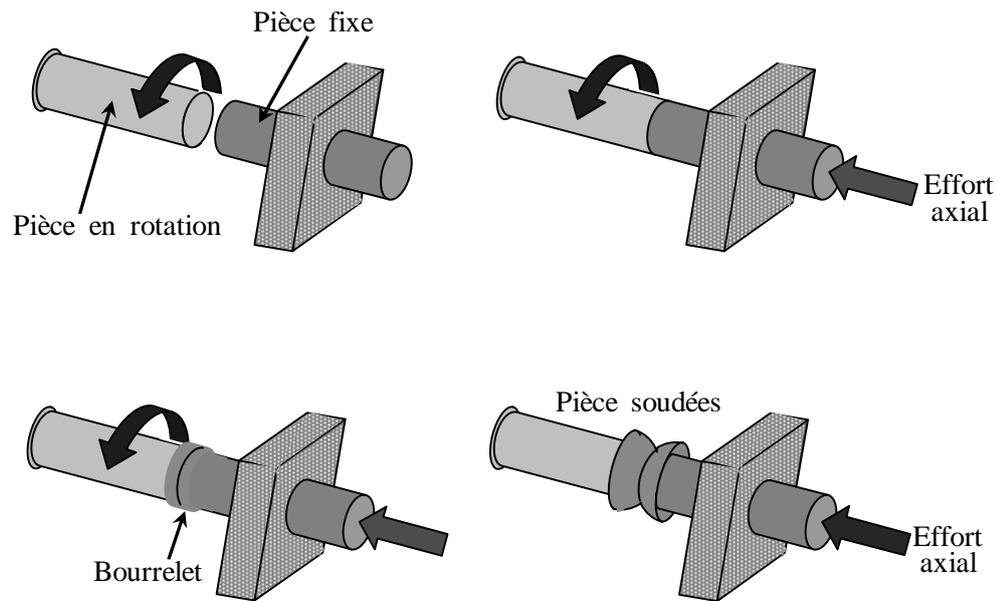


Figure II.5. Principe général de soudage par friction rotative [9].

Les faces en contact s'échauffent et deviennent la source de chaleur qui, par diffusion, élève la température des extrémités des pièces. Celles-ci deviennent plastiques et un fluage se produit vers la périphérie en formant un bourrelet caractéristique, tandis que la chaleur continue de se diffuser. Lorsque la température de soudage est atteinte, la rotation est arrêtée et un effort de forgeage est appliqué pour former la soudure [8].

II.4. Mécanismes de soudage par friction rotative

Le mécanisme de soudage par friction rotative comporte essentiellement deux phases : la phase de friction et la phase de forgeage.

II.4.1. Phase de Friction

La figure II.6 représente les variations dans le temps du couple résistant (ou de frottement) pendant la phase de friction. Les variations en couple résistant (ou de frottement) divisent la phase de friction en quatre stades distincts : le stade de frottement sec des deux surfaces préalablement préparées, le stade de transition ou de diminution du couple de frottement, le stade d'autorégulation et enfin le stade de décélération [6,10-14].

Stade I : Ce stade commence lorsque les deux pièces entrent en contact et commencent à se frotter l'une contre l'autre. Il correspond au début du cycle de soudage pendant lequel il se produit un frottement sec entre les deux surfaces.

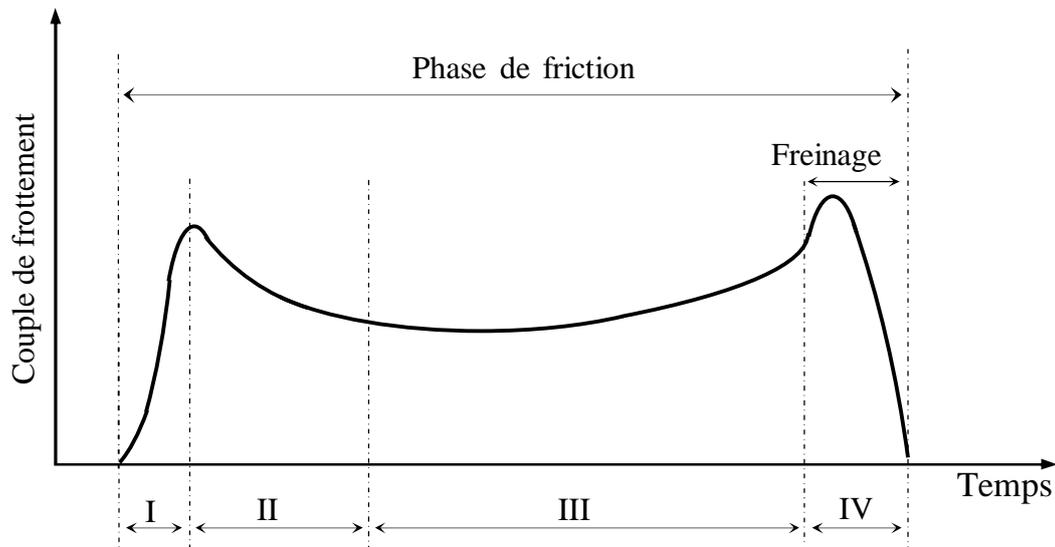


Figure II.6. Variations du couple de frottement pendant la phase de friction [6].

Les aspérités des deux surfaces grippent et s'arrachent mutuellement comme l'indique la figure II.7.(a, b). Les fragments arrachés sont plus ou moins, gros et nombreux suivant les valeurs de la vitesse de rotation et de la force axiale. Les débris creusent des larges sillons dans la surface tendre, conduisant à la destruction de la couche écrouie (figure II.7.c). Le couple de frottement, et par suite la température de l'interface, augmente rapidement à cause du grippage, jusqu'à une valeur maximale appelée couple maximum initial. L'augmentation de la température provoque l'adoucissement et l'écoulement plastique des fragments de l'interface.

Stade II : Ce stade est transitoire, il commence lorsque le couple commence à diminuer après la valeur maximale initiale et se termine lorsque il atteindrent une valeur d'équilibre presque constante. La couche plastique à l'interface commence à être expulsée vers la périphérie sous l'effet des forces d'inertie (radiales) et de contact (normales) (figure II.7.d). La matière expulsée commence à former une spirale (ou un bourrelet) autour l'interface.

Stade III : C'est un stade d'équilibre ou d'auto-régulation du couple de frottement. De plus, le taux de raccourcissement axial et la force axiale restent constants pendant cette période. La température de la couche interfaciale permet d'échauffer, par conduction et activation interne, le métal adjacent et conduit à une consommation de matière régulière dans le temps.

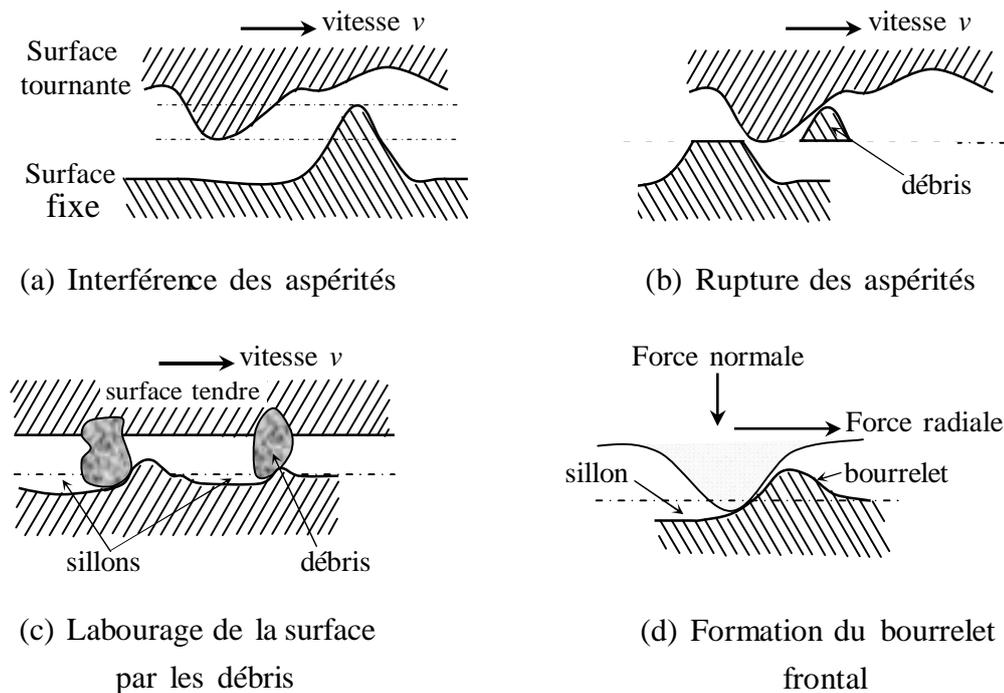


Figure II.7. Interaction des surfaces pendant la phase de friction [10].

Stade IV : C'est le stade de décélération, commence lorsque le freinage est appliqué pour arrêter la pièce en rotation. Durant ce stade, la couche plastifiée se déplace de nouveau vers la périphérie des pièces contribuant à l'augmentation du volume du bourrelet au fur et à mesure que la vitesse diminue.

II.4.2. Phase de forgeage

Le forgeage commence dès l'arrêt de la pièce tournante. Une poussée axiale est maintenue à un niveau suffisant pour conduire au forgeage à chaud du matériau de l'interface et à son refoulement (bourrelet). L'effort et la durée de forgeage n'ont aucune liaison avec la phase de friction. Ils ne dépendent que des conditions métallurgiques relevant de la nature des matériaux à souder.

II. 5. Conception des pièces à souder par friction rotative

La nature du soudage par friction rotative suggère qu'au moins une pièce doit avoir une forme ronde. La pièce en rotation doit avoir une symétrie de révolution car elle tourne à une vitesse relativement élevée. La conception des pièces à souder pour les combinaisons de tiges, de tubes et de plaques est illustrée à la figure II.8. Lorsque des tiges ou des tubes sont soudés à des plaques, la majeure partie du bourrelet provient de la tige ou du tube. Cet effet

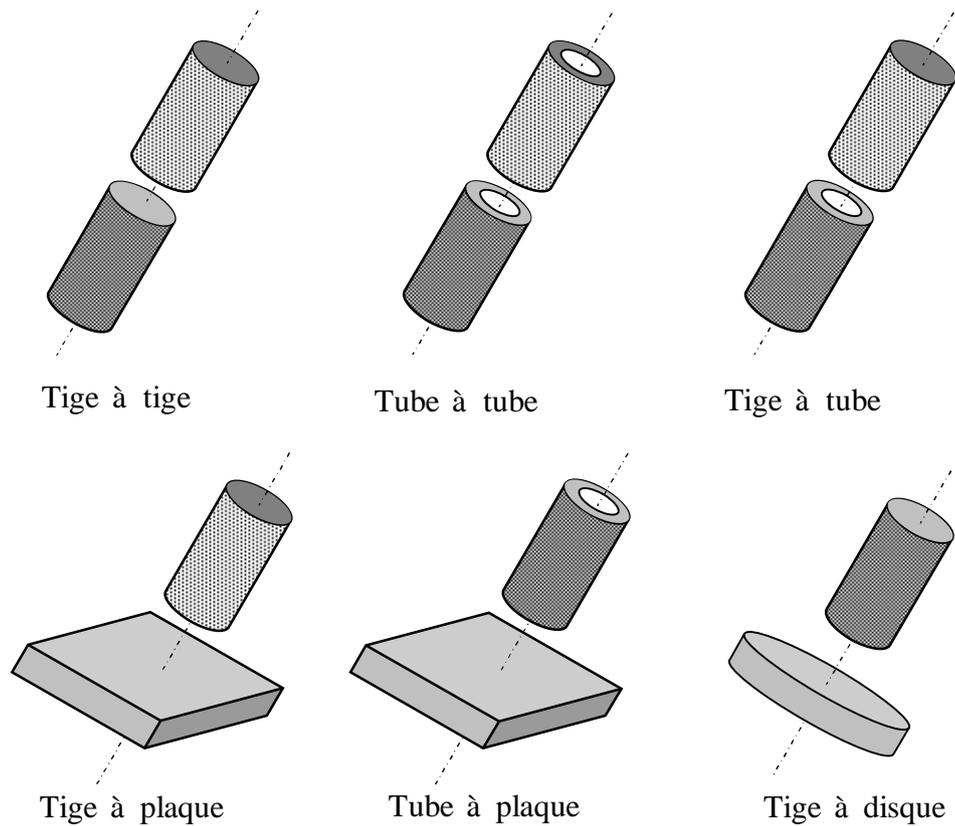


Figure II.8. Conception des pièces à souder par friction rotative [15].

peut être utilement employé dans le cas de soudage des matériaux dissimilaires ayant des propriétés mécaniques ou thermiques très différentes, de telle sorte que la pièce d'une faible conductivité thermique doit avoir une surface de contact plus large [15].

II.6. Microstructure des joints de soudage par friction rotative

En règle générale, la soudure produite par le soudage par friction rotative peut être divisée en deux zones (figure II.9) [1,6,11,16] :

- Zone de contact (zone de déformation plastique sévère) : C'est la zone où le frottement se produit et où des fragments des matériaux sont transférés d'une surface à l'autre. Cette zone a une structure de grain très fine due à une déformation intense et une recristallisation complète. La vitesse de rotation est le paramètre principal qui contrôle la structure de cette zone.

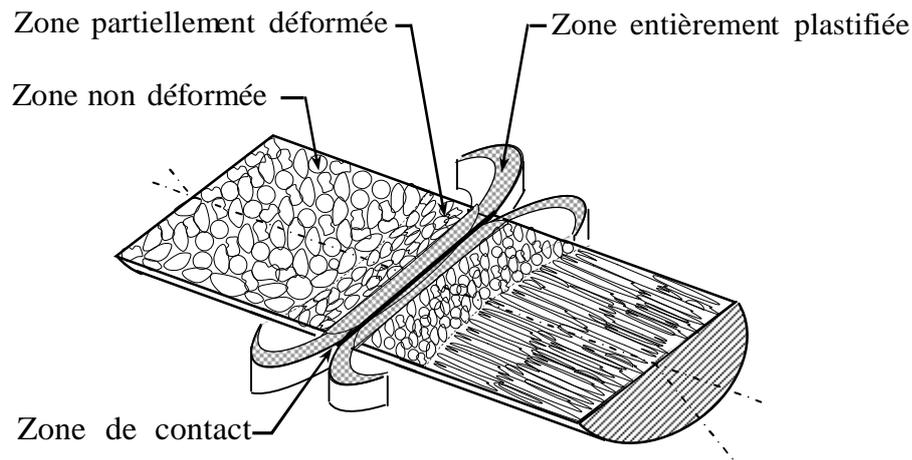


Figure II.9. Illustration schématique des différentes zones de la soudure par friction rotative [16,17].

- Zone affectée thermiquement (ZAT) : C'est la région exposée à une température relativement élevée pendant le soudage. Cette région est divisée en trois zones différentes, classées par ordre de proximité de la zone de contact. (figure II.9)
 - Zone entièrement plastifiée (zone de recristallisation dynamique) : Dans cette zone, Les grains subissent une déformation plastique considérable, mais ne participent pas au processus de frottement ni au transfert de la matière. Les grains dans cette zone sont fins et la densité de dislocations est extrêmement augmentée en raison de la température suffisamment élevée.
 - Zone partiellement déformée : La température et le degré de déformation plastique sont inférieurs à ceux apparus dans la zone précédente. Les grains deviennent plus gros par rapport à ceux de la zone entièrement plastifiée.
 - Zone non déformée : Dans cette zone, en fonction de la température maximale, les matériaux ne subissent pas de transformation de phase ou de déformation plastique. La croissance des grains peut avoir lieu dans cette zone.

II.7. Modes de soudage par friction rotative

On distingue deux modes de soudage par friction rotative, selon la fonction dont on exécute la friction : le soudage par friction à entraînement direct (Direct Drive Friction Welding), le soudage par friction inertielle (Inertia Friction Welding).

II.7.1. Soudage par friction à entraînement direct (ou entraînement continu)

C'est le premier procédé de soudage par friction rotative développé.

1- Principe

Le soudage par friction à entraînement direct consiste à réaliser la soudure sur une machine à entraînement direct, c'est-à-dire que le moteur fournit directement le couple de frottement pendant la phase d'échauffement. Les différentes phases d'une opération de soudage à entraînement direct sont les suivantes (Figure II.10) :

- Mise en marche du moteur, la broche étant débrayée et freinée.
- Mise en place des pièces dans les mandrins et fermeture de ces derniers (Figure II.10.a).
- Démarrage du cycle automatique qui comprend les séquences suivantes :
 - L'embrayage de la broche et la mise en rotation uniforme de la pièce (2).
 - L'accostage des pièces (1) et (2) sous un effort axial (F_1) (Figure II.10.b). Les pièces deviennent en contact par leurs aspérités en formant une surface rigoureusement perpendiculaire à l'axe de rotation.
 - Le frottement intense, par l'application de F_1 , provoque une élévation de température ou échauffement (ou conversion de l'énergie mécanique en énergie calorifique) (Figure II.10.c). Le couple de frottement est pratiquement constant avec une consommation régulière de la matière en fonction du temps, donnant lieu à la formation du bourrelet. La chaleur diffuse de façon globale est symétrique de part et d'autre du plan de friction jusqu'à atteindre des conditions favorables au forgeage.
 - La rotation est interrompue par débrayage et freinage simultané du mandrin tournant. Le forgeage commence par l'application d'un effort F_2 approprié (Figure II.10.d). Le bourrelet subit une nouvelle et définitive augmentation de volume.

2- Paramètres de soudage par friction à entraînement direct

Les paramètres essentiels du soudage par friction à entraînement direct sont:

- Pour la phase de friction :
 - La vitesse de rotation « ω » : mesurée par « tr/min » (tour par minute),
 - La force (ou la pression) de friction « F_1 » (ou « P_1 »): mesurée en « Newton » (ou en MPa dans le cas de la pression),
 - Le temps (ou la durée) de friction « t_1 » : mesuré en « seconde ».
- Pour la phase de forgeage :

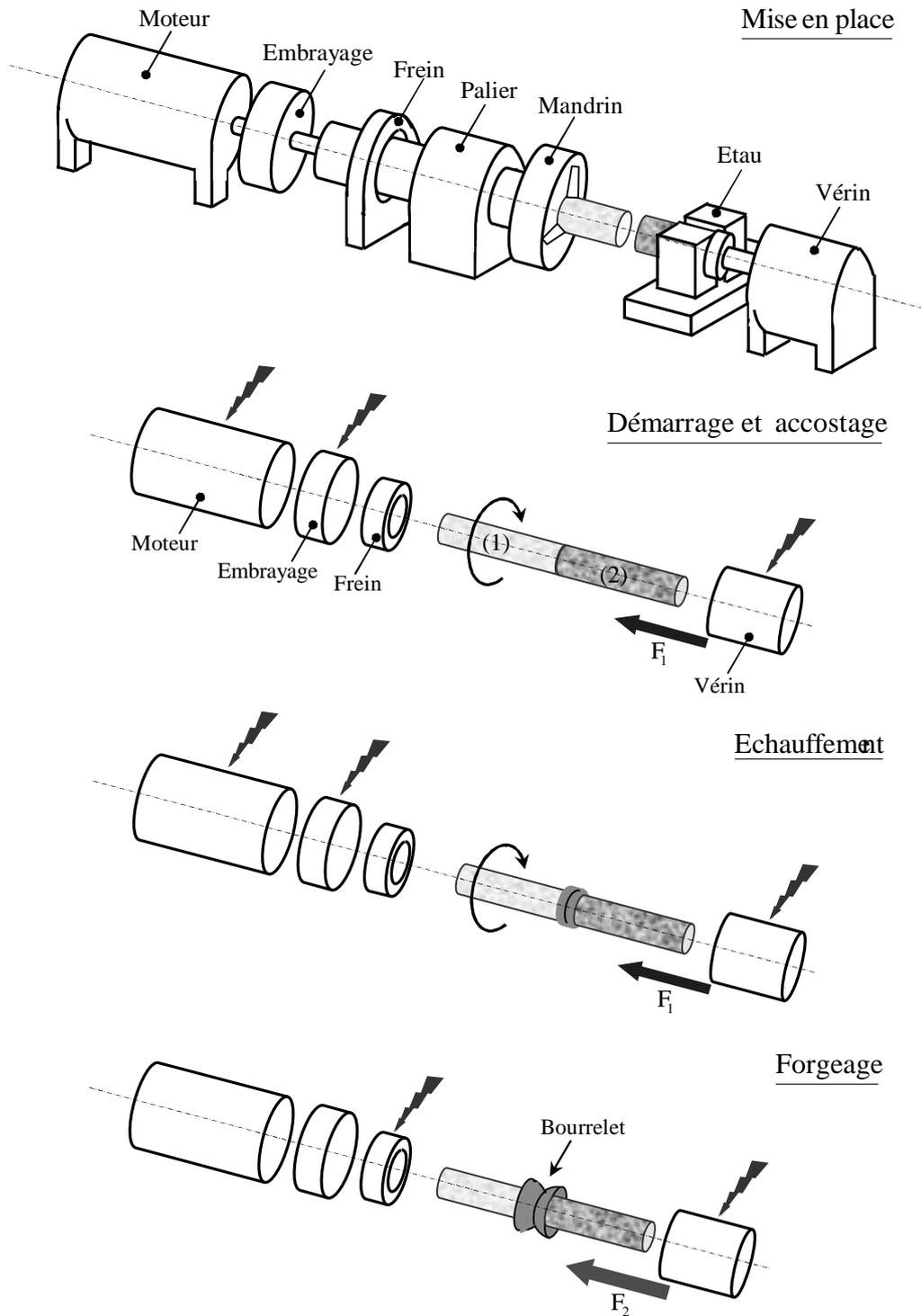


Figure II.10. Séquences du soudage par friction à entraînement direct [8].

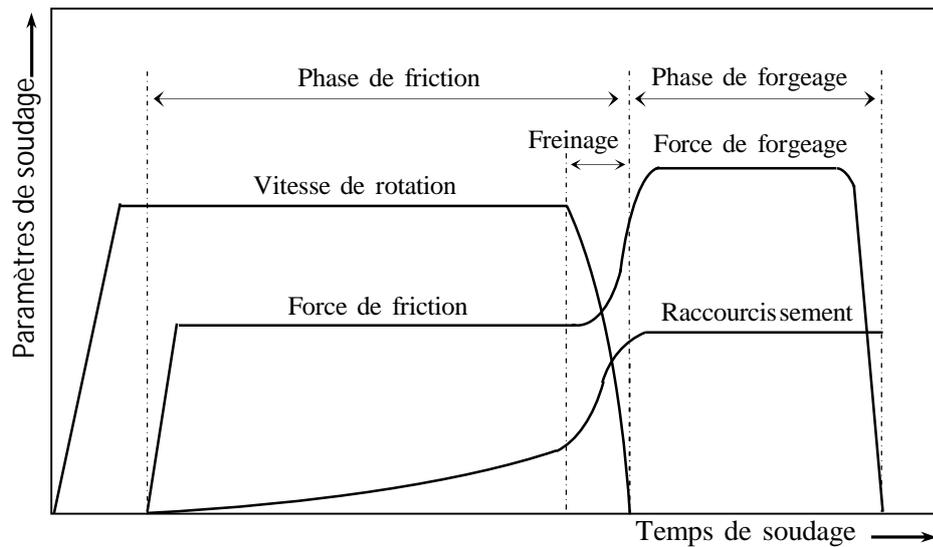


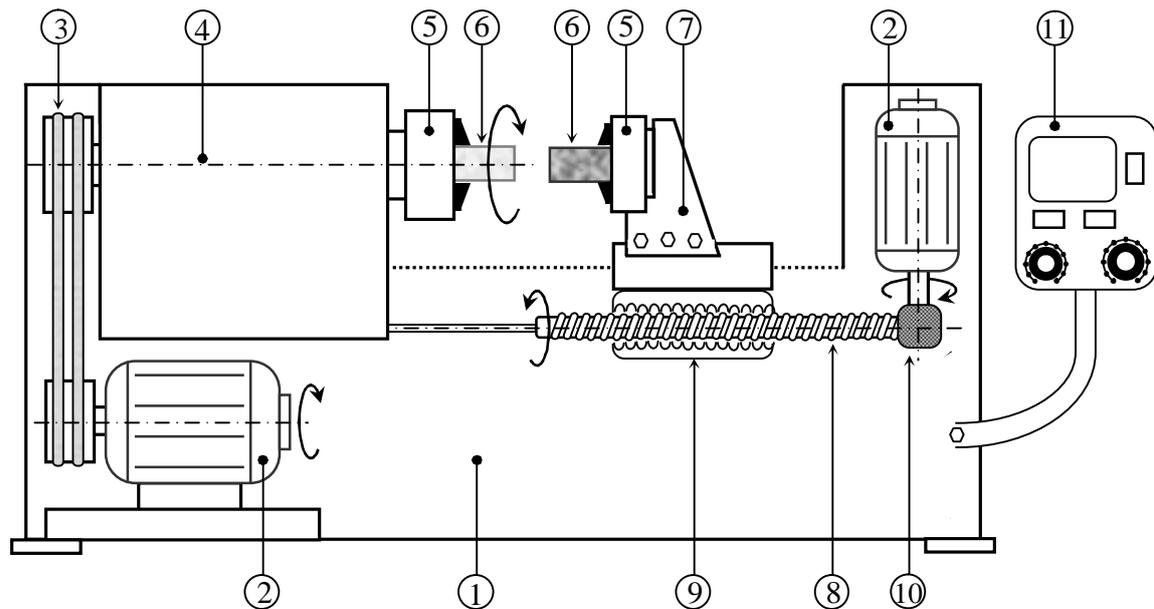
Figure II.11. Caractéristiques des paramètres de soudage par friction à entraînement direct [6,18].

- La force (ou la pression) de forgeage « F_2 » (ou « P_2 » : mesurée en « Newton » (ou en MPa dans le cas de la pression),
- Le temps (ou la durée) de forgeage : « t_2 » : mesuré en « seconde ».

3- Machine de soudage par friction à entraînement direct

Une machine de soudage par friction à entraînement direct combine essentiellement les composantes suivantes (figure II.12):

- Broche : son rôle est de recevoir le mandrin tournant auquel elle transmet le couple de friction provenant du moteur par l'intermédiaire d'un embrayage et d'un frein.
- Mandrins : La tenue des pièces est primordiale dans le processus de soudage par friction.
- Commandes du cycle :
 - La rotation : par un moteur électrique
 - Les efforts : par un vérin électrique (ou hydraulique), afin de réaliser un processus de soudage avec divers cycles d'efforts.



- | | |
|-------------------------------|--------------------------|
| (1) Bâti | (7) Support mobile |
| (2) Moteur | (8) Arbre vis sans fin |
| (3) Courroies de transmission | (9) Bloc écrou |
| (4) Palier (broche) | (10) Réducteur à roue |
| (5) Mandrins | (11) Panneau de commande |
| (6) Pièces à souder | |

Figure II.12. Illustration d'une machine de soudage par friction à entraînement direct.

II.7.2. Soudage par friction inertielle

Ce procédé vient de l'idée « opérer en temps court » en vue d'accroître les caractéristiques des soudures de certains matériaux à haute résistance et à faible diffusivité thermique [8].

1- Principe

Le soudage par friction inertielle ou par accumulation d'énergie consiste à relier une des pièces à souder à un volant d'inertie entraîné par un moteur. Le volant d'inertie est accéléré jusqu'à une vitesse donnée pour stocker l'énergie requise, puis le moteur d'entraînement est désengagé et les deux pièces sont assemblées par friction sous un effort axial (force de friction). L'énergie cinétique emmagasinée dans le volant rotatif est dissipée sous forme de chaleur, par frottement à l'interface de soudure, à mesure que la vitesse du volant diminue. Une augmentation de l'effort axial (force de forgeage) peut être appliquée avant que le volant s'arrête complètement, et maintenue pendant un temps donné après la fin

de la rotation. La vitesse de rotation critique du volant d'inertie est choisie de sorte que l'énergie cinétique transformée soit au moins égale à l'énergie totale nécessaire à un cycle complet de soudage.

L'opération de soudage par friction inertielle se déroule suivant les phases suivantes (figure II.13) :

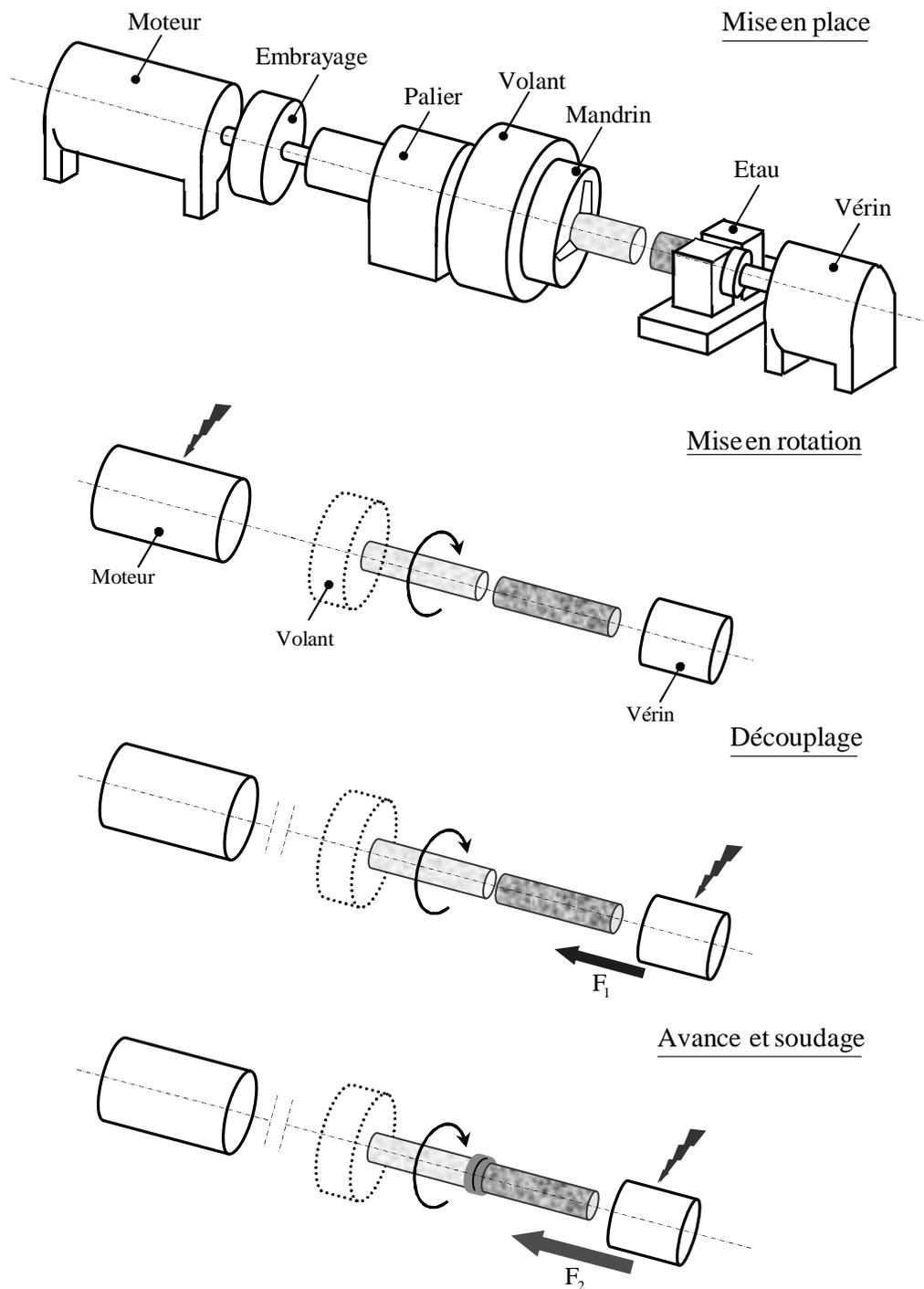


Figure II.13. Séquences du soudage par friction inertielle [8].

- Mise en place des pièces dans les mandrins
- Démarrage du cycle automatique qui comprend ;
 - La mise en marche du moteur, la broche étant embrayée et le volant entraîné jusqu'à la vitesse choisie,
 - Le découplage,
 - L'accostage avec l'application de l'effort de friction (F_1),
 - L'application de l'effort de forgeage (F_2).

2- Paramètres de soudage par friction inertielle

Les paramètres de soudage par friction inertielle sont essentiellement :

- La masse et les dimensions du volant d'inertie,
- La vitesse de lancement ou la vitesse de départ du cycle,
- L'effort de friction et de forgeage,
- Le temps de forgeage.

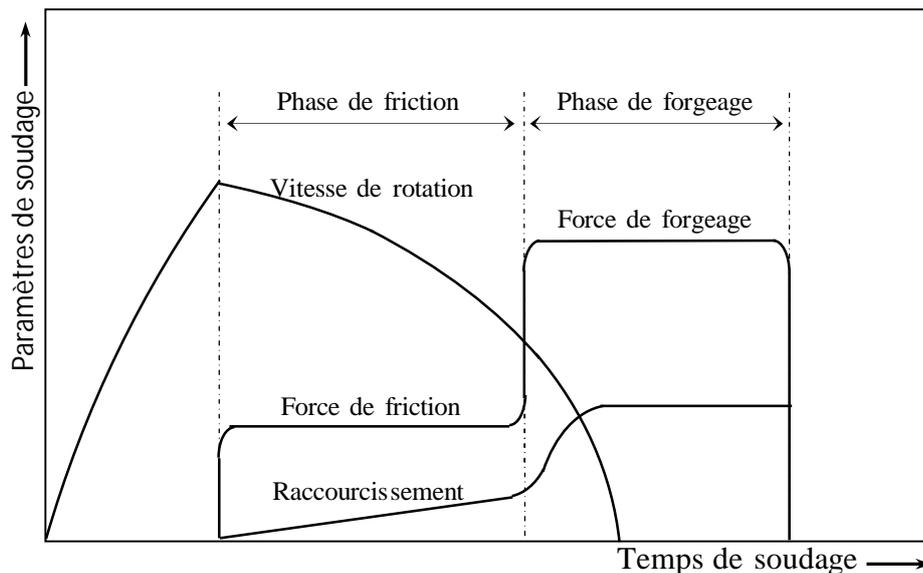


Figure II.14. Caractéristiques des paramètres de soudage par friction inertielle [6,18].

II.7.3. Comparaison entre les deux procédés de soudage par friction rotative

Le tableau II.1 donne une comparaison entre le soudage par friction à entraînement direct et le soudage par friction inertielle en illustrant les avantages et les inconvénients des deux procédés.

Tableau II.1. Comparaison entre soudage par friction à entraînement direct et soudage par friction inertielle [8].

Type de soudage	Soudage par friction à entraînement direct	Soudage par friction inertielle
Avantages	<ul style="list-style-type: none"> - Temps de soudage court, - Zone affectée thermiquement faible, - Des assemblages de bonne tenue en fatigue. 	<ul style="list-style-type: none"> - Facilité de réglage, - Excellente reproductibilité, - Des assemblages de Bonnes caractéristiques métallurgiques.
Inconvénients	<ul style="list-style-type: none"> - Centre des pièces peu chauffé, - Réglage pointus. 	<ul style="list-style-type: none"> - Temps de soudage long, - Zone affectée thermiquement forte.

II.8. Couples de matériaux soudables par le soudage par friction rotative

Le tableau II.2 résume certaines combinaisons des matériaux pour lesquels le soudage par friction rotative donne des résultats satisfaisants.

Le soudage par friction rotative (ou par friction en générale) peut être utilisé pour assembler une large gamme des matériaux similaires et dissimilaires, comme les métaux, les alliages métalliques, les céramiques et les plastiques. Dans le cas des matériaux dissimilaires, le mécanisme de soudage par friction est très complexe. Certains facteurs, comme les propriétés physiques et mécaniques des matériaux, l'énergie de surface, la structure cristalline, la solubilité mutuelle et les composés intermétalliques, peuvent jouer un rôle dans le mécanisme de processus. Dans le cas des métaux dissimilaires, il est fort probable que certains composés intermétalliques se produiront dans une couche très étroite à l'interface de la soudure. Les propriétés de cette couche des composés intermétalliques peuvent avoir un effet significatif sur les propriétés globales du joint.

II.9. Applications du soudage par friction rotative

Le soudage par friction rotative permet d'assembler des matériaux ne pouvant être assemblés avec des procédés conventionnels de soudage, comme l'aluminium à l'acier, l'aluminium au cuivre, le titane au cuivre,...etc (figure II.15). Cette possibilité offre au soudage par friction rotative d'être utilisé dans plusieurs domaines, par exemple : l'aviation, la navigation spatiale, la pétrochimie et l'industrie automobile.

Tableau II.2. Combinaisons possibles de matériaux soudables par le soudage par friction [1, 8, 15].

	Laiton	Bronze	Fonte	Céramiques	Carbure de tungstène cémenté	Tungstène	Vanadium	Molybdène	Cobalt	Alliages de zirconium	Alliages de titane	Titane	Alliages de nickel	Nickel	Alliages de magnésium	Magnésium	Alliages d'argent	Argent	Alliages d'aluminium	Aluminium	Alliage cuivre-nickel	Cuivre	Acier maraging	Acier inoxydable	Acier au carbone	Acier allié	Acier à outils
Acier à outils					●								●	●									●	●	●	●	●
Acier allié									●				●	●						○	●		●	●	●	●	
Acier au carbone		●		○					●				●	●						○	●	●	●	●	●	●	
Acier inoxydable										○	○	○	●	●						○	●	●	●	●	●	●	
Acier maraging													●	●									●				
Cuivre				○		◇		◇		●		●						●		○	●		●				
Alliage cuivre-nickel																						●					
Aluminium	●			●	●	●				●	●	●	●	●	●					●	●						
Alliages d'aluminium				●		●							●	●	●					●							
Argent																											
Alliages d'argent																		○									
Magnésium																●											
Alliages de magnésium											◇	◇			●												
Nickel														●													
Alliages de nickel													●														
Titane						◇		◇				●															
Alliages de titane												●															
Alliages de zirconium										●																	
Cobalt																											
Molybdène								●																			
Vanadium																											
Tungstène						●																					
Carbure de tungstène cémenté																											
Céramiques				○																							
Fonte																											
Bronze		●																									
Laiton	●																										

● Excellent soudage par friction

◇ Soudage par friction faible

○ Peut être soudé par friction

■ Données non disponibles



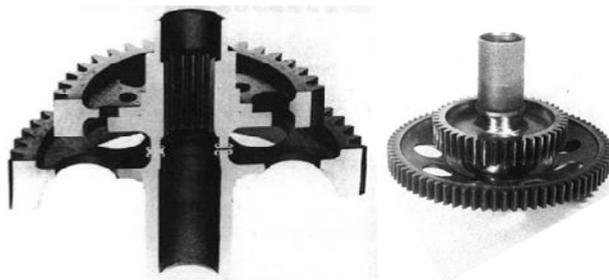
Soupape d'un moteur



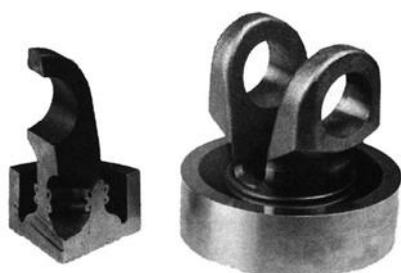
Arbre de direction



Connecteur bimétallique aluminium - cuivre



Roues dentées d'une boîte de vitesse



Piston d'un moteur



Pièce d'un turbo



Partie d'une boîte de vitesse



Partie d'un amortisseur

Figure II.15. Quelques applications du soudage par friction rotative [19].

II.10. Avantages et limites du soudage par friction rotative

En comparaison aux autres procédés de soudage, le soudage par friction rotative (ou par friction en générale) présente les avantages suivants :

- Produire des assemblages de haute qualité et d'une bonne structure métallurgique,
- Sans besoin d'une préparation spéciale des pièces à souder,
- Plus rapide que les procédés de soudage conventionnels (par fusion),
- Déformations faibles après soudage, en raison des temps de soudage courts et des faibles températures,
- Possibilité d'assembler des matériaux dissimilaires tels que l'aluminium et le cuivre, l'acier et le nickel, ...etc.
- Possibilité d'automatisation,
- Sans métaux d'apport, sans gaz de protection et sans fumées de soudage ou rayonnement.

Cependant, le soudage par friction rotative a certaines limites, telles que :

- Une des pièces à souder doit avoir un axe de symétrie pour pouvoir être entraînée en rotation autour de cet axe.
- Les coûts élevés des équipements et des outils de soudage,
- Les matériaux non forgeables, comme la fonte par exemple, ne sont pas soudables par friction.
- Certains matériaux comme le graphite, le sulfure de fer et le plomb, ne peuvent pas être soudés en raison de leurs coefficients de frottement faibles.

II.11. Conclusion partielle

Le soudage par friction est un procédé de soudage à l'état solide qui permet d'assembler des matériaux similaires ou dissimilaires. Ses caractéristiques techniques, telles que les faibles températures et les temps de soudage courts, encouragent à son utilisation dans divers secteurs industriels. Certaines combinaisons des matériaux, comme acier/céramique, ne peuvent pas être assemblés par des techniques de soudage conventionnelles, car leurs propriétés thermiques et mécaniques sont très différentes, mais ils peuvent être assemblés par le procédé de soudage par friction.

II.12. Références bibliographiques

1. Rombaut, P., *Joining of dissimilar materials through rotary friction welding*, 2011. Thèse de Master en Ingénierie - Génie Electromécanique, Université Gent, Belgique.
2. Foca, M., Racineux G., et Stainier L., *Développement d'une approche "Maximum Entropy" pour la modélisation thermo-mécanique du procédé de soudage par friction rotative*. 11^e colloque national en calcul des structures, CSMA, 2013. Giens, France.
3. Koen, F., *Le soudage par friction, un procédé de soudage multiple et innovateur*, 2011. Available from: <https://www.bil-ibs.be/fr/publicatie/le-soudage-par-friction-un-procede-de-soudage-multiple-et-innovateur>
4. Image électronique, Available from:
<https://www.twi-global.com/images/00025/4405540.jpg>
5. Kautz, D. D., *Fundamentals of Friction Welding*, Welding Fundamentals and Processes, Vol 06A, ASM Handbook, ASM International, 2011. p. 179-185.
6. Withers, P. J., Preuss M., *Simulation of rotational welding operations*, Metals process simulation, Vol 22B, ASM Handbook, ASM International, 2010. p. 432-442.
7. Bevington, J. H., *Spinning Tubes Mode of Welding the Ends of Wire, Rods, etc. and Mode of Making Tubes*, Patent 1208, 1891. U.P.N. British Patent Office, United Kingdom.
8. Cazes, R., *Procédés de soudage: Principes généraux et critères de choix*. Techniques de l'ingénieur. Génie mécanique, 1995. (B7700) : p. 1- 6.
9. Maalekian, M., *Friction welding - critical assessment of literature*. Science and Technology of Welding and Joining, 2007. 12 : p. 738-759.
10. Guidara, M., *Modolisation et identification des paramètres de soudage par friction*, 2002. Mémoire de D.E.A – Mécanique et Ingénierie, Université de Sfax, Tunisie.
11. Uday, M. B., Ahmad Fauzi M. N., Zuhailawati H., Ismail A. B., *Advances in friction welding process: a review*, Science and Technology of Welding and Joining, 2010. 15(7) : p. 534-558.
12. Li, P., Li, J., Li, X., Xiong, J., Zhang, F., Liang, L., *A study of the mechanisms involved in initial friction process of continuous drive friction welding*, Journal of Adhesion Science and Technology, 2015. 29(12) : p. 1246-1257.
13. Li, X., Li, J., Jin, F., Xiong, J., Zhang, F., *Effect of rotation speed on friction behavior of rotary friction welding of AA6061-T6 aluminum alloy*, Welding in the World, 2018. 62(5) : p. 923-930.

14. Jin, F., Li, J., Liu, P., Nan, X., Li, X., Xiong, J., Zhang, F., *Friction coefficient model and joint formation in rotary friction welding*, Journal of Manufacturing Processes, 2019. 46 : p. 286-297.
15. Johnson, C. A. et al, *Friction welding*, Welding processes, Vol 2, Welding Handbook, 8 Ed., American Welding Society (AWS), 1997. p. 740-763.
16. Caligulu, U., Acik M., Balalan Z., Kati N., *The Effects of Process Parameters for Joining of AISI 1010-Cu Alloys by Friction Welded*, International Journal of Steel Structures, 2015. 15(4) : p. 1-9.
17. Mercan, S., Ozdemir, N., *A couple of AISI 2205/AISI 1020 material combination with friction welding method*, NWSA-Technological Applied Sciences, 2013. 2A0080 8(2) : p. 18-34.
18. Stotler, T. V. et al, *Friction welding*, Welding processes – Part 2, Vol 3, Welding Handbook, 9 Ed., American Welding Society (AWS), 2007. p. 184-209.
19. Koen, F., *Soudage par friction*, 2011. Available from: <https://www.bil-ibs.be/fr/publicatie/soudage-par-friction>

CHAPITRE III

Synthèse

Bibliographique

III.1. Introduction

Ce chapitre du manuscrit est consacré à l'étude bibliographique, qui donne une synthèse des travaux déjà publiés sur le sujet de notre travail : le soudage par friction rotative acier/alumine.

III.2. Détails des travaux de recherche

Sur la base de nos recherches bibliographiques sur le soudage par friction rotative acier/céramique, nous avons constaté que les travaux sur ce sujet sont très limités. En premier lieu, on présente les détails de ces travaux selon un ordre chronologique :

Titre de la publication [1]	Strength of friction welded ceramic-metal joints
Auteurs	R. Weiss & F. Sassani
Année	1998
Méthodologie	Le soudage par friction rotative d'un acier doux au Zirconium partiellement stabilisé (PSZ), avec l'utilisation d'une couche intermédiaire en alliage d'aluminium Al-SiMgMn. Les joints acier/céramique ont été développés en deux phases. Premièrement, l'acier a été soudé à l'alliage d'aluminium par friction rotative. L'échantillon résultant a été usiné pour éliminer le bourrelet de soudage et réduire l'épaisseur de la pièce d'aluminium à des valeurs comprises entre 1,5 et 6 mm. Ensuite, les joints acier/aluminium ont été soudés à la céramique par un deuxième processus de soudage par friction.
Remarques	La couche d'aluminium est réduite au cours du processus de soudage, avec la formation d'un bourrelet en aluminium autour la soudure. Les joints triples acier / aluminium / céramique ont des bonnes caractéristiques mécaniques
Titre de la publication [2]	Alumina-mild steel friction welded at lower rotational speed
Auteurs	M. Z. Noh, L. B. Hussain & Z. A. Ahmad

Année	2008
Méthodologie	Des tiges, de diamètre 10 mm, en alumine et en acier doux ont été assemblées par un procédé de soudage par friction à une vitesse de rotation de 900 tr/min. Les pressions de friction et de forgeage sont fixées à 20 MPa et 40 MPa respectivement. Des temps de friction de 2 à 20 s sont choisis. Une petite tôle en aluminium 1100, d'épaisseur initiale de 1 mm, est pliée sur la tige d'acier et a mis en contact avec la tige en céramique pour former une couche intermédiaire entre l'acier et la céramique. La résistance des joints acier/céramique résultants est déterminée par un test de flexion 4 points. Le MEB et l'EDS sont utilisés pour observer et analyser l'interface des joints.
Remarques	<p>La céramique présente des fissures et des fractures au cours du processus de soudage par friction.</p> <p>La déformation de la couche intermédiaire d'aluminium au cours du soudage avec la diminution de son épaisseur.</p> <p>Une forte corrélation entre le temps de friction, l'épaisseur de la couche résiduelle et la résistance des joints.</p>
Titre de la publication [3]	Characterization and thermal modelling of friction welded alumina-mild steel with the use of Al 1100 interlayer
Auteurs	H. Seli, M. Z. Noh, A. I. Md. Ismail, E. Rachmand & Z. A. Ahmad
Année	2010
Méthodologie	<p>Le soudage par friction rotative des tiges, de diamètre 10 mm, en acier doux aux tiges, de même diamètre, en alumine. L'insertion d'une couche, d'épaisseur de 1.4 mm, en aluminium 1100 entre l'extrémité de l'alumine et l'extrémité de l'acier. Les paramètres de soudage sont : une vitesse de rotation de 900 tr/min, une pression axiale de 20 MPa et un temps de friction varié de 2 à 20 s. Les mesures de micro-dureté, le test de flexion, le MEB et l'EDS sont utilisés pour évaluer les caractéristiques des joints soudés.</p> <p>Une simulation par un modèle thermique à différences finies est réalisée pour définir et analyser la distribution de la température</p>

	(profils temps-température) au cours du processus de soudage.
Remarques	<p>Les propriétés mécaniques des joints changent avec les variations du temps de friction.</p> <p>L'observation des surfaces des joints fracturés montre la forte liaison à l'interface.</p> <p>Un bon accord entre les prévisions numériques et les mesures réelles de la température.</p>
Titre de la publication [4]	Evaluation of properties and FEM model of the friction Welded mild steel-Al6061-alumina
Auteurs	H. Seli, M. Awang, A. I. Md. Ismail, E. Rachmand & Z. A. Ahmad
Année	2013
Méthodologie	<p>Des tiges en acier doux soudées par friction à des tiges en alumine, avec l'utilisation d'alliage d'aluminium Al6061 pour former la couche intermédiaire. L'épaisseur initiale de la couche d'Al6061 est variée de 0.3 à 1.5 mm. Les paramètres de soudage sont : une vitesse de rotation de 900 tr/min, une pression axiale de 20 MPa et un temps de friction varié de 2 à 20 s</p> <p>Les mesures de micro-dureté, le test de flexion, le MEB et l'EDS sont utilisés pour évaluer les propriétés des joints soudés.</p> <p>Un modèle thermo-mécanique à éléments finis est développé pour prédire la distribution des déformations, des contraintes et de la température pendant l'opération d'assemblage.</p>
Remarques	<p>La résistance des joints soudés varie en fonction du temps de friction et de l'épaisseur initiale de la couche intermédiaire.</p> <p>Le modèle thermo-mécanique est entièrement couplé.</p> <p>Le comportement thermique, les contraintes et les déformations sont analysés avec succès.</p>
Titre de la publication [5]	Simulation of friction welding of alumina and steel with aluminum interlayer
Auteurs	N. R. J. Hynes & P. S. Velu

Année	2017
Méthodologie	Le développement d'un modèle numérique à base d'éléments finis pour comprendre le phénomène thermomécanique impliqué dans le processus de soudage par friction d'une céramique avec un acier en utilisant une couche intermédiaire en aluminium. La simulation numérique par le logiciel ABAQUS. L'effet du temps de friction sur la génération de chaleur est étudié.
Remarques	Le flux de chaleur augmente avec le temps de friction, puis reste constant. La consommation de la couche intermédiaire d'aluminium.

III.3. Discussion des travaux publiés

Les principaux résultats des travaux susmentionnés peuvent être résumés comme suit:

- Le soudage par friction direct d'un acier à une céramique est impossible, car l'acier nécessite une très grande quantité de chaleur pour créer un écoulement plastique [1]. Mais l'assemblage peut être développé avec succès en utilisant une couche intermédiaire en aluminium [2-6]. Dans ce cas, la couche d'aluminium aide à compenser le déséquilibre entre les propriétés thermiques et mécaniques des deux matériaux à souder (figure III.1 et III.2).

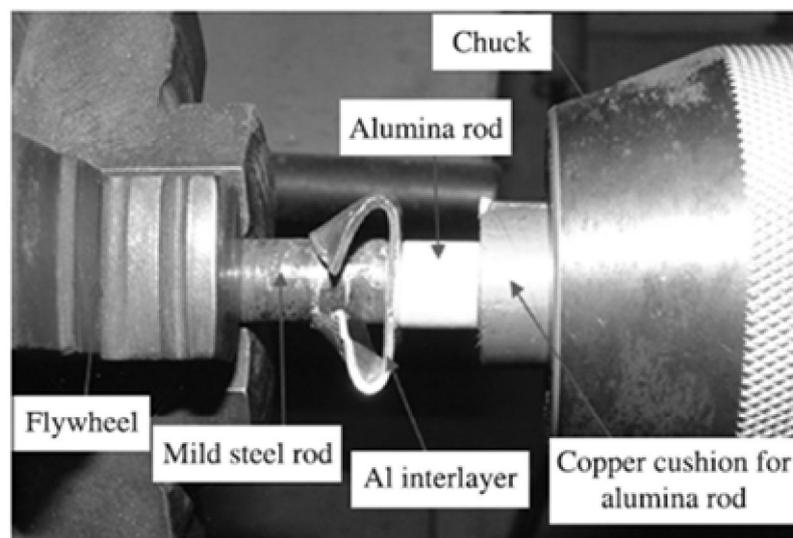


Figure III.1. Processus de soudage par friction rotative acier doux/alumine [4].

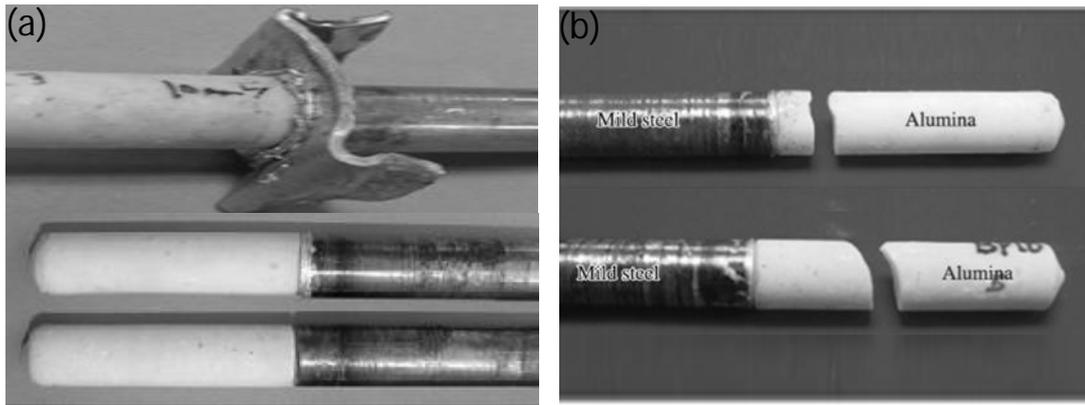


Figure III.2. Joints acier doux/alumine soudés par friction rotative (a), après le test de flexion (b) [4].

- La chaleur générée par la friction et la pression appliquée pendant le processus de soudage entraîne une déformation plastique de la couche d'aluminium [1-5]. Cette déformation conduit à deux phénomènes caractéristiques du soudage par friction acier/alumine, le premier étant la consommation de la couche d'aluminium et son refoulement vers l'extérieur pour former le bourrelet du joint [1]. Le deuxième phénomène est la diffusion de l'aluminium à travers les interfaces des matériaux à souder, ce qui conduit à la formation d'une couche en composés intermétalliques (IMC) à base Fe-Al, et à l'emboîtement mécanique (ou l'enchevêtrement mécanique, en anglais : *mechanical interlocking*), par occupation des pores de la céramique (figure III.3) [2, 4].

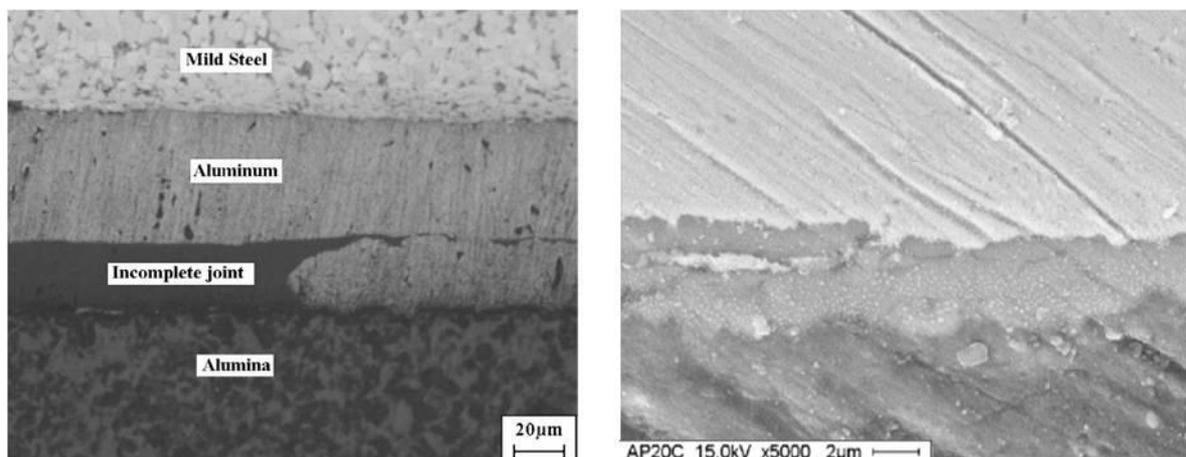


Figure III.3. Micrographie des interfaces acier-aluminium et alumine-aluminium du joint acier/alumine soudé par friction rotative [2, 4].

- Le temps de friction a un effet très remarquable sur la consommation ou la réduction de l'épaisseur de la couche intermédiaire (figure III.4). Avec l'augmentation en durées de friction, l'épaisseur de la couche d'aluminium résiduelle diminue progressivement [2]. Cette corrélation est le résultat de l'augmentation en taux de déformation de la couche d'aluminium avec l'augmentation du temps de friction. Une longue durée de friction conduit à l'augmentation du flux de chaleur générée et par conséquent la déformation de plus en plus de la couche d'aluminium [2, 6].
- La résistance à la flexion des joints acier/alumine augmente avec l'augmentation des temps de friction et la diminution de l'épaisseur de la couche d'aluminium résiduelle. La résistance des joints peut atteindre des valeurs élevées (200 MPa) (figure III.4.(a)) [1-4]. La corrélation directe entre la résistance des joints acier/alumine et le temps de friction peut être affectée par l'épaisseur initiale de la couche d'aluminium (figure III.4.(b)), où la résistance des joints développés en utilisant des couches minces d'aluminium (épaisseur initiale < 1.0 mm), se dégrade avec une augmentation en temps de friction. Cela est dû au fait que la majeure partie de la couche déformée d'aluminium est expulsée vers l'extérieur (le bourrelet), et la quantité de matière résiduelle est insuffisante pour produire une soudure complète (zones non soudées), ce qui dégrade la résistance des joints (figure III.3) [4].

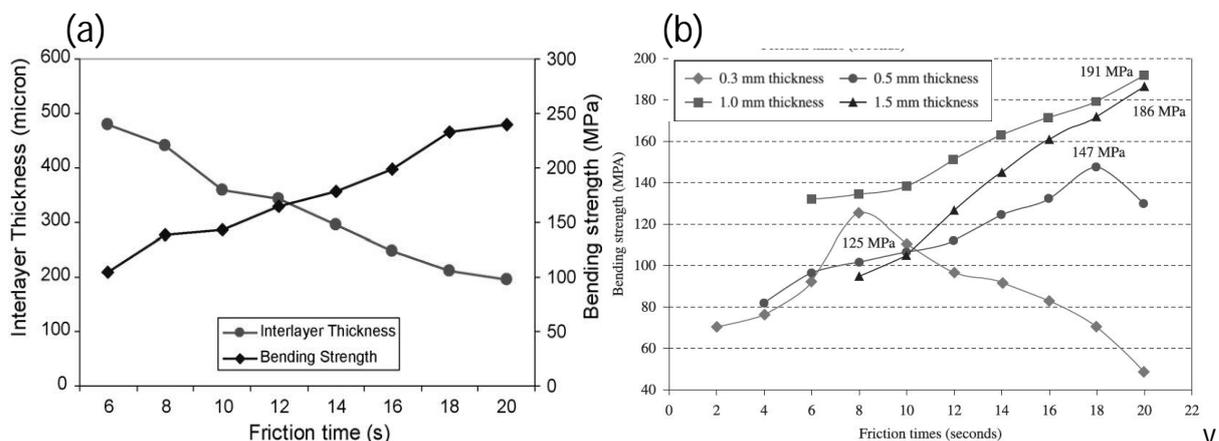


Figure III.4. Corrélation entre l'épaisseur de la couche intermédiaire et la résistance à la flexion pour différents temps de friction : épaisseur initiale constante (a) [2, 3], épaisseur initiale variée (b) [4].

III.4. Conclusion partielle

La synthèse bibliographique réalisée nous a permis d'avoir une compréhension plus approfondie de notre sujet, et cela à travers les points suivants :

- La possibilité de souder l'acier et la céramique par friction ;
- L'alumine est la céramique la plus favorable pour le soudage acier/céramique
- L'efficacité de l'utilisation d'une couche intermédiaire en aluminium dans la réussite du processus de soudage par friction rotative acier/alumine ;
- Le temps de friction est considéré comme le paramètre le plus influent sur les propriétés de joints acier/alumine.

Sur la base de ces données, nous pouvons choisir notre méthodologie de travail comme suivant :

- La fixation d'une couche en aluminium à la tige d'acier en utilisant le soudage par friction rotative.
- Le soudage de l'alumine et l'acier par friction rotative, avec la variation du temps de friction.

III.5. Références bibliographiques

1. Weiss, R., Sassani, F., *Strength of friction welded ceramic–metal joints*, Materials Science and Technology, 1998. 14 (6): p. 554-560.
2. Noh, M. Z., Hussain, L. B., Ahmad, A. Z., *Alumina–mild steel friction welded at lower rotational speed*. Journal Of Materials Processing Technology, 2008. 204: p. 279-283.
3. Seli, H., Noh, M. Z., Ismail, A. I. M. D., Rachman, E., Ahmad, Z. A., *Characterization and thermal modelling of friction welded alumina–mild steel with the use of Al 1100 interlayer*. Journal of Alloys and Compounds, 2010. 506 : p. 703-709.
4. Seli, H., Awang, Ismail, A. I. M. D., Rachman, E., Ahmad, Z. A., *Evaluation of Properties and FEM Model of the Friction Welded Mild Steel-Al6061-Alumina*. Materials Research, 2013. 16(2): p. 453-467.
5. Hynes, N. R. J., Velu, P. S., *Simulation of friction welding of alumina and steel with aluminum interlayer*, 2017. 93 (1-4): p. 121-127.
6. Noh, M. Z., Hussain, L. B., Ahmad, A. Z., *correlation between the bending strength and the thickness interlayer of alumina-mild steel friction welded at lower rotational speed*, Journal of Nuclear and Related Technology, 2007 (4): p. 75-81.

CHAPITRE IV

Matériaux

&

Procédures Expérimentales

Introduction

Ce chapitre est divisé en trois parties, la première partie présente les matériaux à souder, leurs caractéristiques et les étapes de leur préparation pour le soudage, ainsi que les équipements de soudage utilisés. La deuxième partie est le noyau de ce chapitre, dans laquelle nous discutons la méthodologie et la procédure expérimentale suivie pour la réalisation de ce travail. La troisième partie rapporte les détails des techniques de caractérisations utilisées.

Partie 1 : Matériaux et équipement utilisés

1.1. Matériaux utilisés

Les matériaux utilisés dans cette étude expérimentale sont : l'acier doux, l'alliage d'Aluminium **1100** et l'alumine Al_2O_3 .

1.1.1 L'Acier doux :

Des tiges d'acier doux de diamètre 12 mm ont été utilisées pour réaliser les joints acier/aluminium et acier/céramique. Le tableau IV.1 présente la composition chimique de l'acier doux utilisé.

Tableau IV.1. Composition chimique de l'Acier doux (déterminée par Spectrométrie de fluorescence des rayons X (XRF)).

Eléments	C	Si	S	P	Mn	Cu	Mg	Zn	Fe	Al
Acier doux	0.39	0.28	0.03	0.03	0.9	0.14	—	—	98.2	0.03

1.1.2 L'alliage d'aluminium Al 1100

Dans le but de former une couche intermédiaire en aluminium, des tiges d'aluminium pur Al 1100 de diamètre 12 mm ont été utilisées pour obtenir les joints acier/aluminium. Le tableau IV.2 présente la composition chimique de l'alliage d'aluminium utilisé.

Tableau IV.2. Composition chimique de l'alliage d'aluminium 1100 (déterminée par XRF).

Eléments	C	Si	S	P	Mn	Cu	Mg	Zn	Fe	Al
Al 1100	—	0.57	—	0.04	—	0.01	0.53	0.02	0.23	98.6

1.1.3 L'alumine Al_2O_3

La céramique utilisée dans cette étude est l'alumine Al_2O_3 . Elle est élaborée à partir d'une nano poudre et frittée à très haute température (1600 à 1700 °C). Cette céramique est commercialisée par la Société HITECH CERAMICS (Chennai – Inde), sous forme des tiges blanches de diamètre 12 mm. Le tableau IV.3 présente la composition chimique de la céramique utilisée.

Tableau IV.3. Composition chimique de l'alumine (déterminée par XRF).

Composés	Na ₂ O	CaO	MgO	SiO ₂	Al ₂ O ₃
Alumine	0.14	0.15	0.24	0.52	98.95

1.2. Préparation des pièces à souder par friction

Avant d'entamer les processus de soudage par friction rotative, les tiges des matériaux utilisés (acier doux, aluminium et alumine) sont découpées à des échantillons de longueur de 70 mm (figure IV.1). Les extrémités des échantillons ont été polies et nettoyées afin de réduire l'effet des contaminants, en particulier la graisse, qui peuvent affecter la qualité des joints.



Figure IV.1. Échantillons à souder découpés et préparés.

1.3. Equipements de soudage par friction rotative

Afin d'atteindre les objectifs de ce travail, une machine de soudage par friction à entraînement continu est utilisée pour développer les joints acier/aluminium et acier/alumine (figure IV.2). La machine est à servocommande, avec une vitesse de rotation variable ($V_{\max} = 3000 \text{ tr/min}$), de modèle: Rexroth, R. V. Machines-outils (Cap.20 kN Tools). Cette machine se trouve au sein du Centre CEMAJOR, Université Annamalai, Tamil Nadu - Inde.

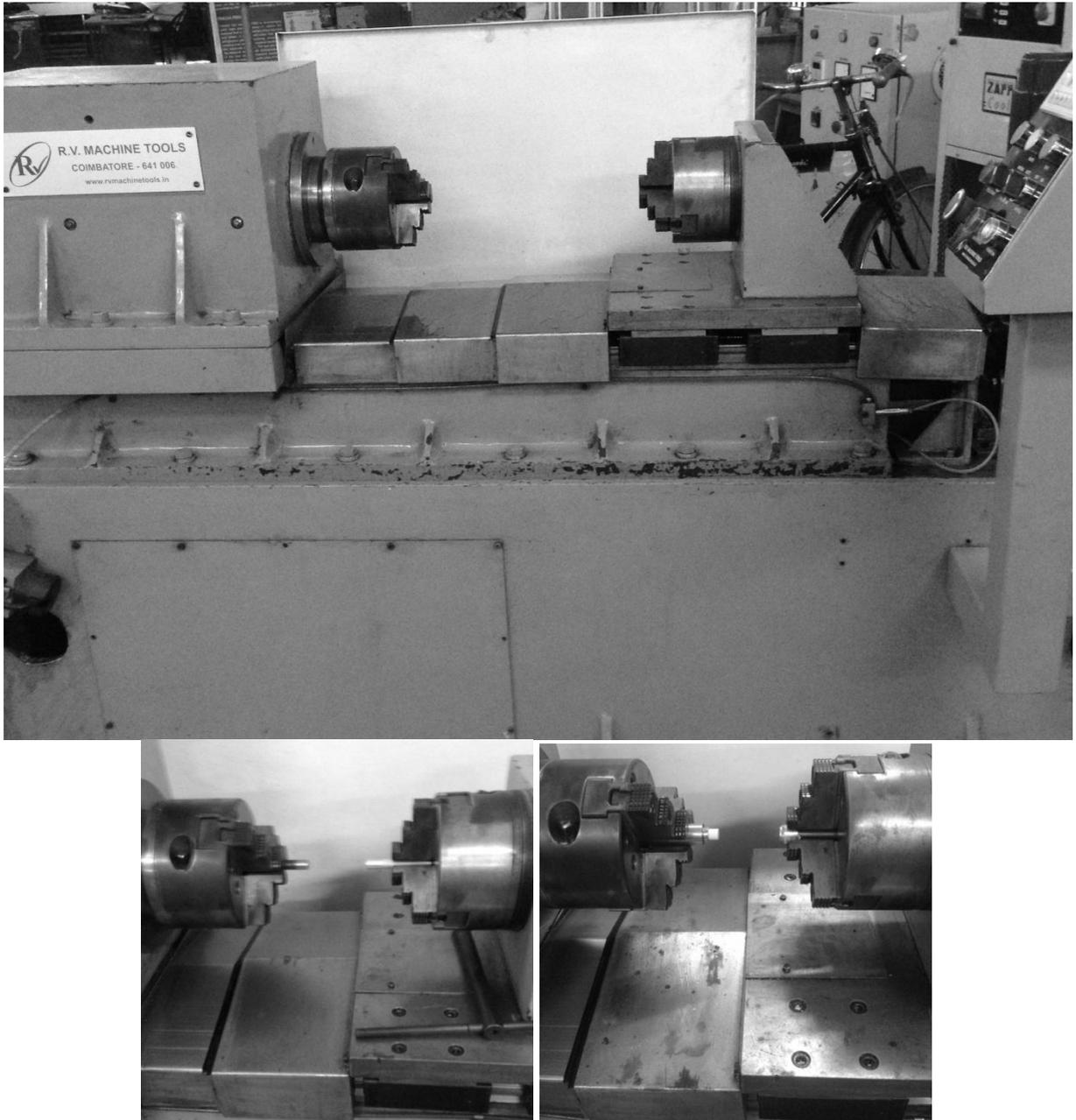


Figure IV.2. La machine de soudage par friction rotative (Centre de Recherche et d'Assemblage des Matériaux (CEMAJOR, Université Annamalai – Inde).

Partie 2 : Méthodologie et procédure expérimentale

Cette partie est réalisée en deux phases. Premièrement, l'acier doux est soudé par friction à l'alliage d'aluminium 1100, avec une optimisation des paramètres de soudage afin d'obtenir des bons joints acier/aluminium. Le but de cette partie est de former une couche intermédiaire en aluminium bien soudée à l'acier. En deuxième phase, le soudage par friction acier/alumine est réalisé par mise en contact de la tige d'alumine et la couche d'aluminium soudée à l'extrémité de la tige d'acier.

Partie A : Soudage par friction rotative acier doux/aluminium 1100

Dans le but d'optimiser les paramètres du processus de soudage par friction d'acier doux à l'alliage d'aluminium 1100, un plan d'expériences par la méthode des surfaces de réponses (MSR) est construit.

L'intérêt de l'utilisation du plan d'expérience est la minimisation du nombre des essais de soudage, ainsi de bien évaluer l'influence des paramètres de soudage sur les caractéristiques mécaniques des joints développés. Le travail avec la méthode MSR nécessite une connaissance préalable de son principe et de son mode d'utilisation. Une annexe à la fin de la thèse donne une vision détaillée sur la méthode des surfaces de réponses.

La figure (IV.3) montre l'organigramme des différentes phases de la partie A de notre travail.

2.a.1 Les paramètres de soudage par friction acier doux/aluminium 1100

Pour notre étude par la méthode MSR, nous avons sélectionnée un plan composite centré (CCD) à trois (03) facteurs :

Facteur 1 : Pression de friction/temps, symbolisé par **A** ;

Facteur 2 : Pression de forgeage/temps, symbolisé par **B** ;

Facteur 3 : Vitesse de rotation, symbolisé par **C**.

Chaque facteur sélectionné a cinq (05) niveaux ou valeurs. Les tableaux IV.4 et IV.5 représentent les paramètres de soudage (facteurs), leurs valeurs actuelles et leurs valeurs

codés. Un plan CCD de petite taille, avec une distance α égale à 1,414, est utilisé pour construire le plan d'expérience de notre étude.

Partie A : Soudage par friction rotative acier doux/aluminium 1100

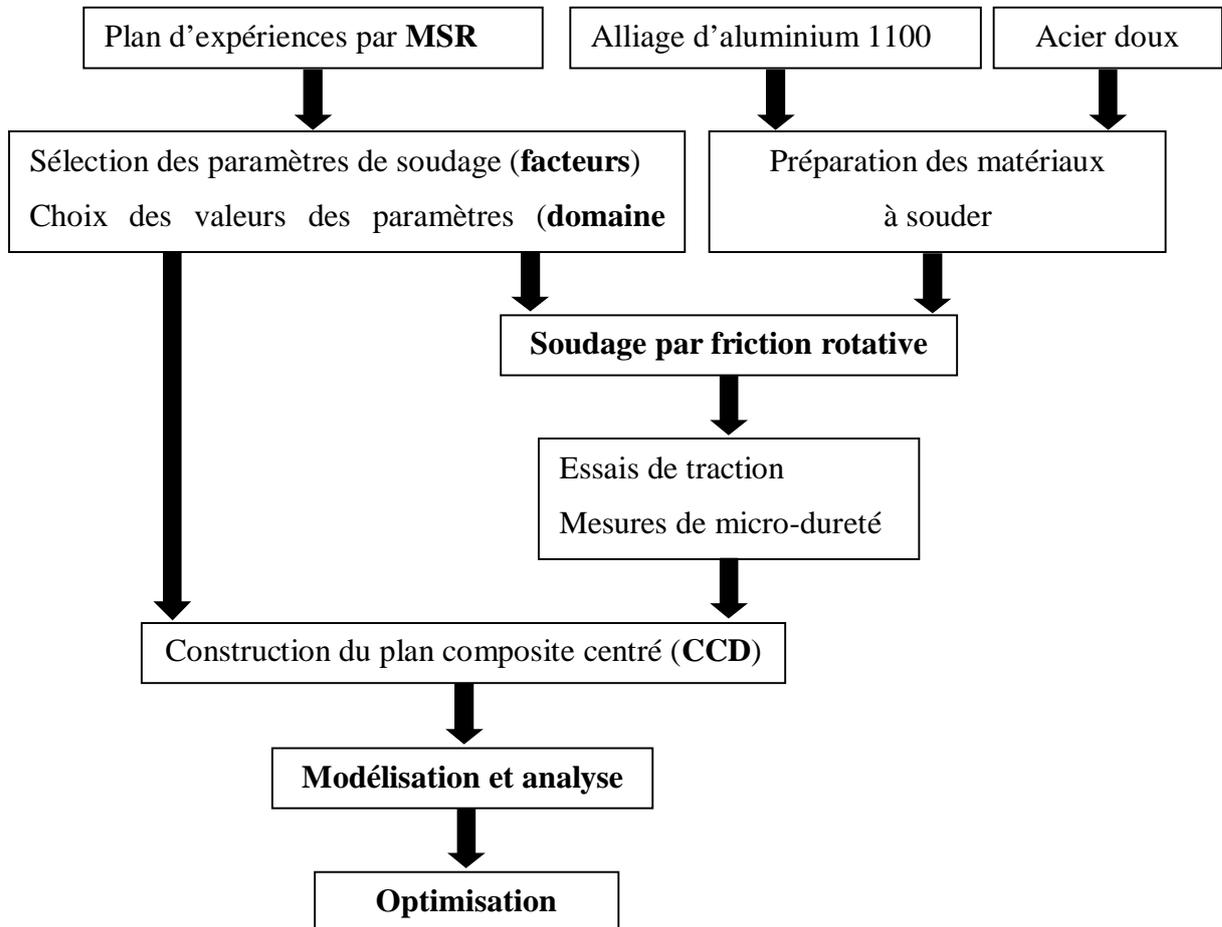


Figure IV.3. Organigramme des différentes phases du soudage acier doux/aluminium 1100.

Tableau IV.4. Paramètres de soudage par friction acier doux/aluminium 1100.

Facteurs	Notation	Unité	Niveaux				
			-1.414	-1	0	+1	+1.414
Pression de friction/temps	A	MPa/s	3,62	4,08	5,20	6,31	6,77
Pression de forgeage/temps	B	MPa/s	16,79	21,54	33,01	44,47	49,22
Vitesse de rotation	C	tr/min	900	930	1000	1070	1100

Tableau IV.5. Paramètres de soudage par friction acier doux/aluminium 1100.

Paramètres de soudage	Unité	Facteurs									
		Pression de friction/temps (A)					Pression de forgeage/temps (B)				
		3,62	4,08	5,20	6,31	6,77	16,79	21,54	33,01	44,47	49,22
Pression de friction	MPa	18,11	19,68	19,68	19,68	33,85	-	-	-	-	-
Temps de Friction	sec	5	5	4	3	5	-	-	-	-	-
Pression de forgeage	MPa	-	-	-	-	-	98,41	133,84	133,84	133,84	149,58
Temps de Forgeage	sec	-	-	-	-	-	6	6	4	3	3

Pour les rapports pression/temps (facteurs 1 et 2), ils sont calculés comme suit :

$$\text{Pression de friction /temps} = \frac{\text{Pression de friction}}{\text{Temps de friction}}$$

$$\text{Pression de forgeage/temps} = \frac{\text{Pression de forgeage}}{\text{Temps de forgeage}}$$

2.a.2 Les réponses du plan d'expériences

Les caractéristiques de qualité choisis comme réponses dans notre étude sont :

Réponse 1 : La résistance à la traction du joint acier doux/aluminium 1100, symbolisé par **R_T**.

Réponse 2 : La micro-dureté à l'interface du joint acier doux/aluminium 1100, symbolisé par **MD**

Le tableau IV.6 représente le plan d'expérience, du plan CCD de petite taille, conçu pour notre étude. Le nombre total des expériences à réaliser est 15 et les expériences pour points centraux sont répétées 5 fois, donc nous devons faire au moins 11 expériences.

La construction de notre plan d'expériences est effectuée par le logiciel **Design-Expert**

7.0.

Tableau IV.6. Plan composite centré (CCD) de petite taille conçu pour le soudage acier doux/aluminium 1100.

Expérience N°	Valeurs actuelles			Valeurs codées		
	A	B	C	A	B	C
01	6,31	44,47	930	+1	+1	-1
02	6,31	21,54	1070	+1	-1	+1
03	4,08	44,47	1070	-1	+1	+1
04	4,08	21,54	930	-1	-1	-1
05	3,62	33,01	1000	-1,414	0	0
06	6,77	33,01	1000	+1,414	0	0
07	5,20	16,79	1000	0	-1,414	0
08	5,20	49,22	1000	0	+1,414	0
09	5,20	33,01	900	0	0	-1,414
10	5,20	33,01	1100	0	0	+1,414
11	5,20	33,01	1000	0	0	0
12	5,20	33,01	1000	0	0	0
13	5,20	33,01	1000	0	0	0
14	5,20	33,01	1000	0	0	0
15	5,20	33,01	1000	0	0	0

2.a.3 Processus de soudage par friction rotative acier doux/aluminium 1100

Le montage opérationnel du processus de soudage par friction rotative acier doux/aluminium 1100 est illustré à la figure IV.4 Le matériau le plus dur (l'acier doux) est mis en rotation et le plus ductile (aluminium 1100) est monté sur le mandrin fixe.

Les expériences sont menées conformément au plan d'expériences du tableau IV.6. Pour chaque expérience, quatre (04) échantillons identiques ont été préparés :

- Trois (03) échantillons désignés pour effectuer les essais de traction, afin de trouver la valeur moyenne.
- Un (01) échantillon pour l'analyse microstructurale et les mesures de micro-dureté.

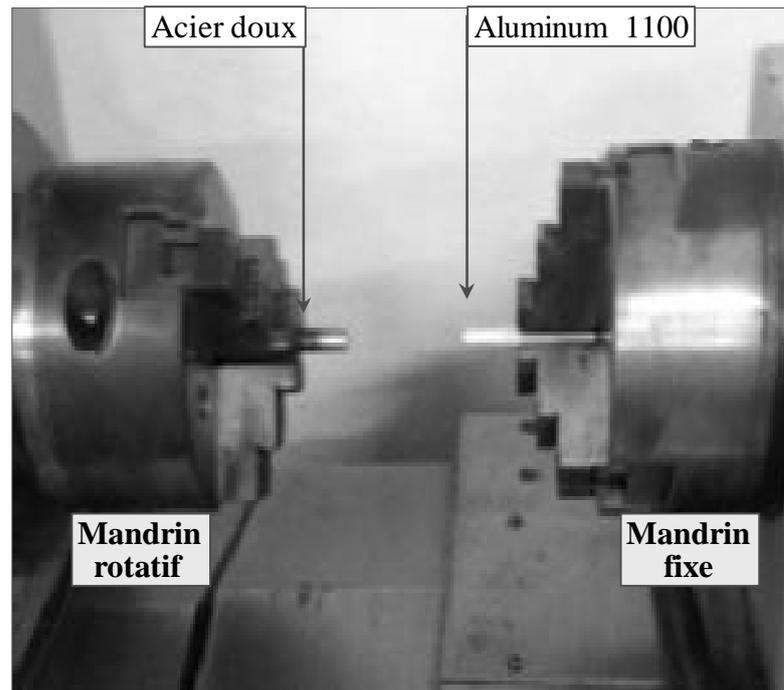


Figure IV.4. Processus de soudage par friction rotative acier doux/aluminium 1100.

Partie B : Soudage par friction rotative acier doux/alumine

La deuxième partie de notre travail, est réalisée en deux étapes principales :

- 1^{ère} étape : La préparation de la couche intermédiaire en aluminium 1100 ;
- 2^{ème} étape : Le soudage par friction de la tige d'alumine à la tige d'acier doux ;
- 3^{ème} étape : La caractérisation des joints acier doux/alumine, pour évaluer l'effet des paramètres de soudage sur les caractéristiques structurales et mécaniques des joints.

L'organigramme de la figure IV.5 montre les différentes étapes de la deuxième partie.

2.b.1 Préparation de la couche intermédiaire en aluminium 1100

Dans le but de former une couche intermédiaire en aluminium fortement liée à l'extrémité de la tige d'acier, nous avons appliqué les paramètres de soudage optimaux (résultats de la partie A) pour développer des joints acier/aluminium présentant des bonnes propriétés mécaniques. La préparation de la couche intermédiaire passe par les étapes suivantes :

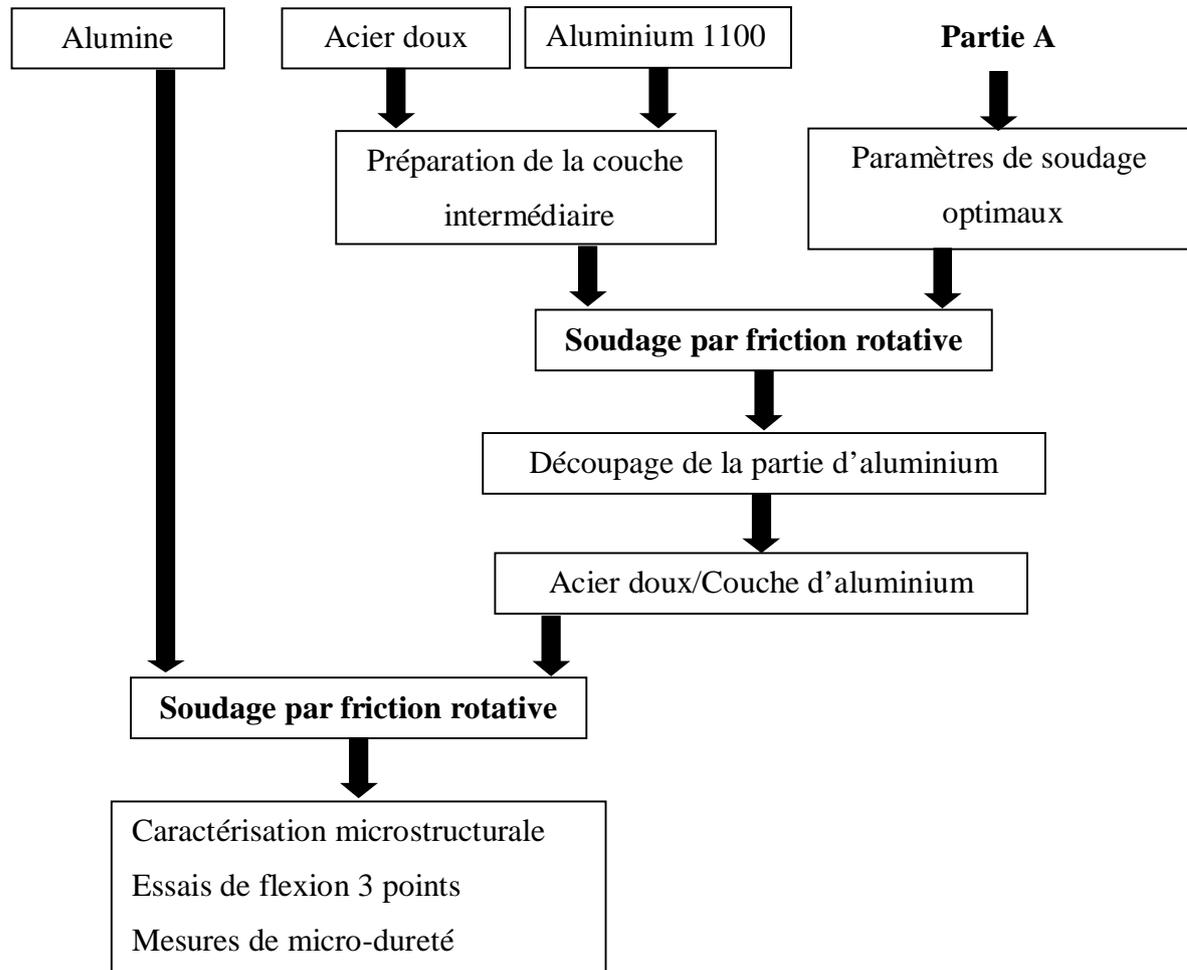
Partie B : Soudage par friction rotative acier doux/alumine

Figure IV.5. Organigramme des différentes étapes de soudage acier doux/alumine.

- ✓ Préparation des tiges d'acier doux et d'aluminium 1100 par découpage à une longueur de 70 mm, puis nettoyage et polissage de leurs extrémités.
- ✓ Le soudage par friction rotative, avec l'application des paramètres de soudage optimaux.
- ✓ Découpage de la partie d'aluminium des échantillons soudés à une épaisseur de 3 mm (figure IV.6)

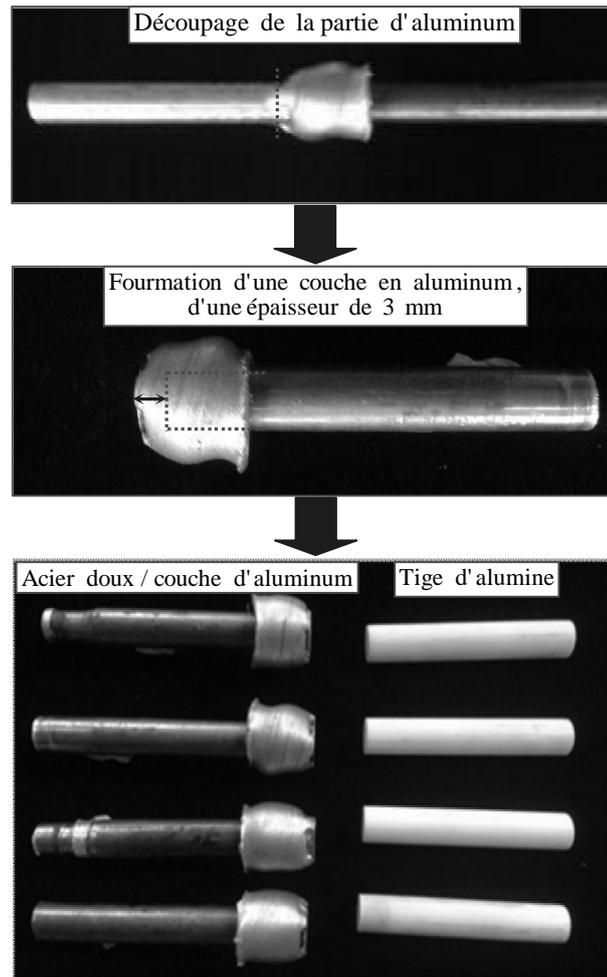


Figure IV.6. Préparation de la couche intermédiaire en aluminium 1100.

2.b.2 Processus de soudage par friction rotative acier doux/alumine

La figure IV.7 montre le montage opérationnel du processus de soudage par friction rotative acier doux/alumine. La céramique, en tant que matériau le plus dur, est montée sur le mandrin rotatif. Tandis que la tige d'acier est fixée sur le mandrin fixe. Le soudage acier/alumine est réalisé en mettant en contact la tige d'alumine avec la couche d'aluminium soudée à l'extrémité de la tige d'acier.

Lors des premiers essais de soudage, nous avons observé l'écrasement soudain de la tige d'alumine. Ceci est dû à la fragilité de la céramique et à son intolérance à la pression des mors du mandrin. Pour éviter cela, nous avons placé la tige d'alumine dans un système de fixation spécial, comme indiqué sur la figure IV.8.

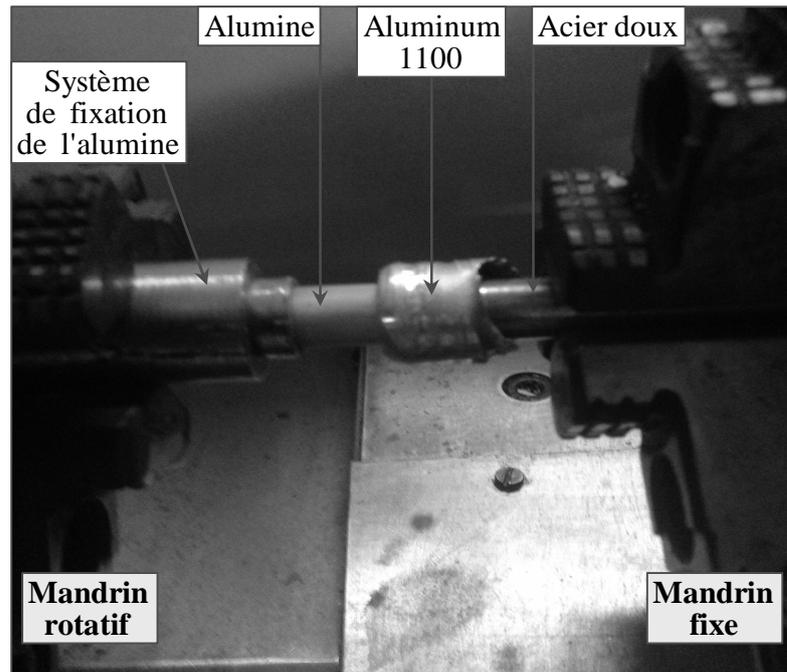


Figure IV.7. Processus de soudage par friction rotative acier doux/alumine.

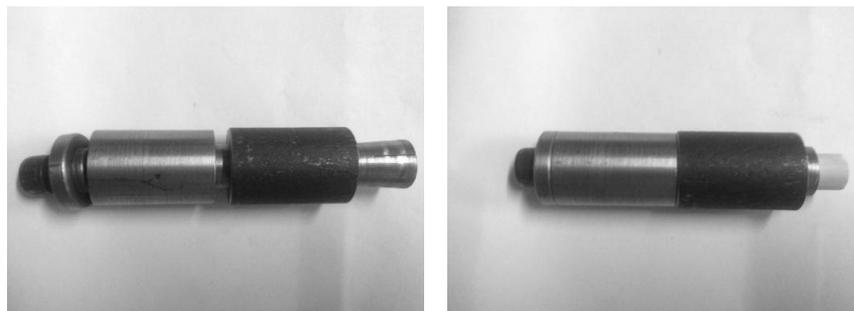


Figure IV.8. Système de fixation de la tige d'alumine au mandrin de la machine.

2.b.3 Les paramètres de soudage par friction acier doux/alumine

Le tableau IV.7 montre les paramètres de soudage choisis pour réaliser le processus de soudage acier doux/alumine. Afin d'étudier l'effet des changements de paramètres, en particulier le temps de friction, sur les propriétés des joints résultants, nous avons varié le temps de friction pour quatre durées différentes (6, 7, 8 et 9 sec) tout en fixant le reste des paramètres.

Pour chaque temps de friction, quatre (04) échantillons identiques ont été préparés :

- Trois (03) échantillons désignés pour effectuer les essais de flexion 3 points.
- Une (01) échantillon pour l'analyse microstructurale et les mesures de micro-dureté.

Tableau IV.7. Paramètres de soudage par friction rotative acier doux/alumine.

Paramètres de soudage	Unité	Série N°			
		01	02	03	04
Pression de friction	MPa	34	34	34	34
Temps de Friction	sec	6	7	8	9
Pression de forgeage	MPa	45	45	45	45
Temps de Forgeage	sec	5	5	5	5
Vitesse de rotation	tr/min	1100	1100	1100	1100

Partie 3. Techniques de caractérisations

3.1. Caractérisation microstructurale des joints soudés

3.1.1 Préparation des échantillons soudés pour l'observation macrographique et micrographique

Une fois le processus de soudage terminé, les échantillons soudés désignés pour l'analyse microstructurale, et plus tard aux mesures de micro-dureté, sont sectionnés à certaine taille comprenant l'interface de soudure et les matériaux de base. Les parties résultantes sont divisées longitudinalement, puis les sections sont enrobées dans une résine spéciale, puis polis en utilisant différents types des papiers abrasifs et pâte diamanté (taille 1 μm).

Pour l'analyse microstructurale, l'utilisation d'une solution d'attaque chimique est nécessaire pour bien révéler les structures métallurgiques. Les sections longitudinales des échantillons soudés sont attaquées chimiquement par des réactifs comme le Keller (pour l'aluminium) et le Nital (pour l'acier).

3.1.2 Observations par microscopie optique

Les observations par microscopie optique permettent d'examiner l'état de l'interface du joint. Pour nos études, les observations sont réalisées à l'aide d'un microscope optique de type MEIJI (Modèle : MIL7100) (figure IV.9).

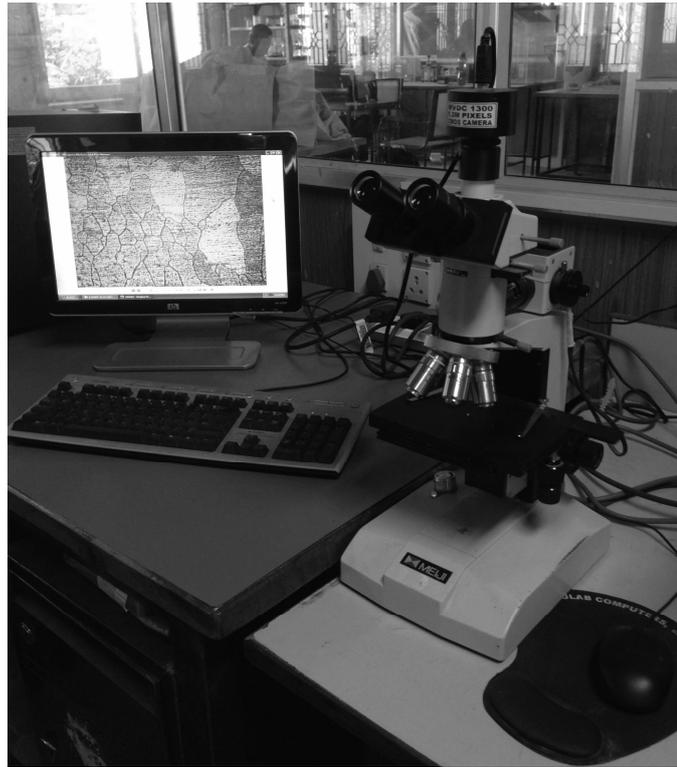


Figure IV. 9. Microscope optique de type MEIJI (Modèle : MIL7100).

3.1.3 Observations par microscope électronique à balayage (MEB) et analyse par spectroscopie à rayons X à dispersion d'énergie (EDS)

Le MEB utilisé pour la première partie de notre travail est de type JEOL : JSM-6610LV, et pour la deuxième partie un JSM-7001F (figure IV.10). Les microscopes sont couplés à une spectroscopie de rayons X à dispersion d'énergie (EDS).

3.2. Caractérisation mécanique des joints soudés

Pour évaluer la résistance des joints soudés par friction rotative, des essais mécaniques ont été réalisés.

3.2.1 Essai de traction

L'essai de traction est l'un des essais les plus courants pour déterminer la résistance des joints soudés par friction. Les essais de traction ont pour objectif d'examiner l'effet des paramètres de soudage sur la résistance des joints soudés.

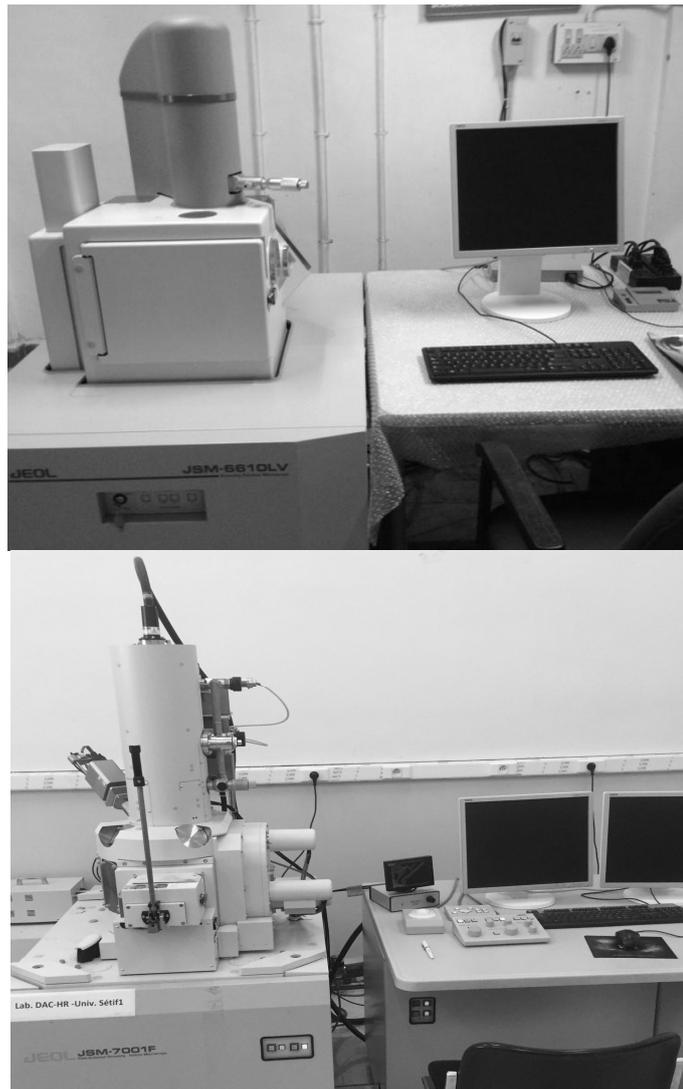


Figure IV. 10. Microscopes électroniques à balayage de type JEOL.

Pour la première partie de notre travail, la résistance à la traction des joints acier /aluminium est déterminée à l'aide d'une machine d'essais universelle asservie de type FIE–Bluestar (Modèle : UNITEK 94100) (figure IV.11). La machine est d'une charge maximale de 100 KN, et la vitesse de traction appliquée pendant les essais est de 0.5 mm/min.

Préparation des éprouvettes d'essai de traction

Pour préparer une éprouvette d'essai de traction, le bourrelet de soudure doit être retiré par usinage sur un tour. Le bourrelet (ou flash) est formé par le refoulement de la matière lors du processus de soudage par friction. Les détails des éprouvettes d'essai de traction sont montrés sur la figure IV.12.



Figure IV. 11. Machine d'essai de traction, universelle asservie de type FIE–Bluestar (Modèle : UNITEK 94100).

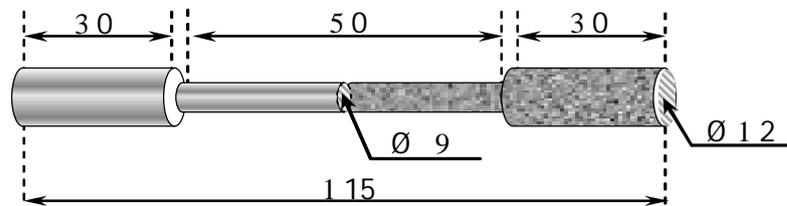


Figure IV. 12. Détails d'éprouvette d'essais de traction (Unité: mm).

3.2.2 Essai de flexion 3 points

Pour la deuxième partie de notre travail, nous ne pouvons pas utiliser l'essai de traction pour déterminer la résistance des joints acier/alumine, car c'est très difficile d'usiner les éprouvettes de traction. Pour cette raison, nous avons utilisé un test de flexion.

Le test de flexion est une méthode simple et très utile pour évaluer la résistance à la flexion des joints soudés par friction. La figure IV.13 montre le principe d'un test de flexion 3 points.

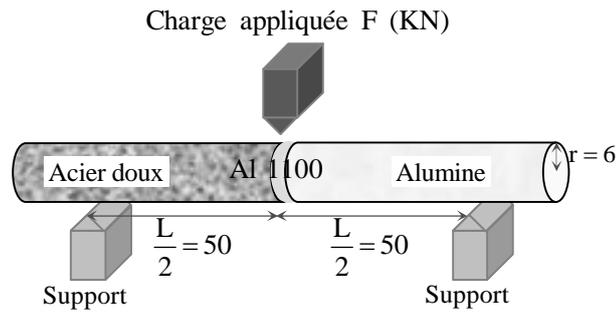


Figure IV.13. Principe d'un essai de flexion 3 points.

Les essais de flexion 3 points sont menés sur des éprouvettes cylindriques de diamètre 12 mm et de longueur 120 mm. L'éprouvette est soumise à l'action d'une charge verticale appliquée au milieu. La charge augmente progressivement jusqu'à l'écrasement de l'éprouvette.

La résistance à la flexion 3 points est donnée par la formule :

$$\sigma_F = \left(\frac{F_{\max} \cdot L}{\pi \cdot r^3} \right) \cdot 1000 \quad ; \quad \text{Avec :} \quad \begin{array}{l} - F_{\max} : \text{La charge maximale (10}^3 \text{ N)} \\ - L : \text{La distance entre les supports (mm)} \\ - r : \text{Le rayon de l'éprouvette (mm)} \end{array}$$

Les essais de flexion 3 points sont réalisés par une machine d'essais universelle asservie de type FIE–Bluestar (Modèle : UNITEK 94100) (figure IV.11).

3.2.3 Mesures de micro-dureté Vickers

Après l'enrobage et le polissage, les sections longitudinales des échantillons soudés sont placés sur la table d'un micro-duromètre de type Shimadzu (Modèle: HMV-2T) (figure IV.14).

Les mesures de micro-dureté Vickers ont été prises sous une charge de 50 g pour l'aluminium, 200 g pour l'acier et 1000 g pour l'alumine.



Figure IV. 14. Micro-duromètre Vickers de type Shimadzu (Modèle: HMV-2T).

CHAPITRE V

Résultats

&

Discussions

Introduction

Ce chapitre présente les résultats de notre travail, ainsi que leurs interprétations et discussion. Il se divise en deux parties. La première partie est consacrée au soudage par friction rotative acier doux/aluminium 1100, dans laquelle nous allons présenter les résultats du plan d'expériences par méthode des surfaces de réponses, avec les résultats de caractérisation par le microscope électronique à balayage (MEB) et par la spectroscopie de rayons X à dispersion d'énergie (EDS). La deuxième partie est consacrée aux résultats des expériences de soudage par friction rotative acier/céramique. On commence par l'observation macrographique et micrographique des joints, puis nous présentons les résultats de caractérisation par différents essais et techniques de caractérisation.

Partie 1 : Soudage par friction rotative acier doux/aluminium 1100

La figure V.1 montre des échantillons soudés acier doux/aluminium 11000 juste après le soudage par friction rotative. Il est clair que le bourrelet de soudure a une forme asymétrique, du fait que l'aluminium est plus malléable que l'acier.

Les sections longitudinales des 11 échantillons soudés sont montées sur la figure V.2. On remarque que le bourrelet est uniquement formé d'aluminium, ce qui indique que la partie d'acier n'a pas été consommée ou raccourcie. On note aussi que la forme du bourrelet change d'un échantillon à un autre.

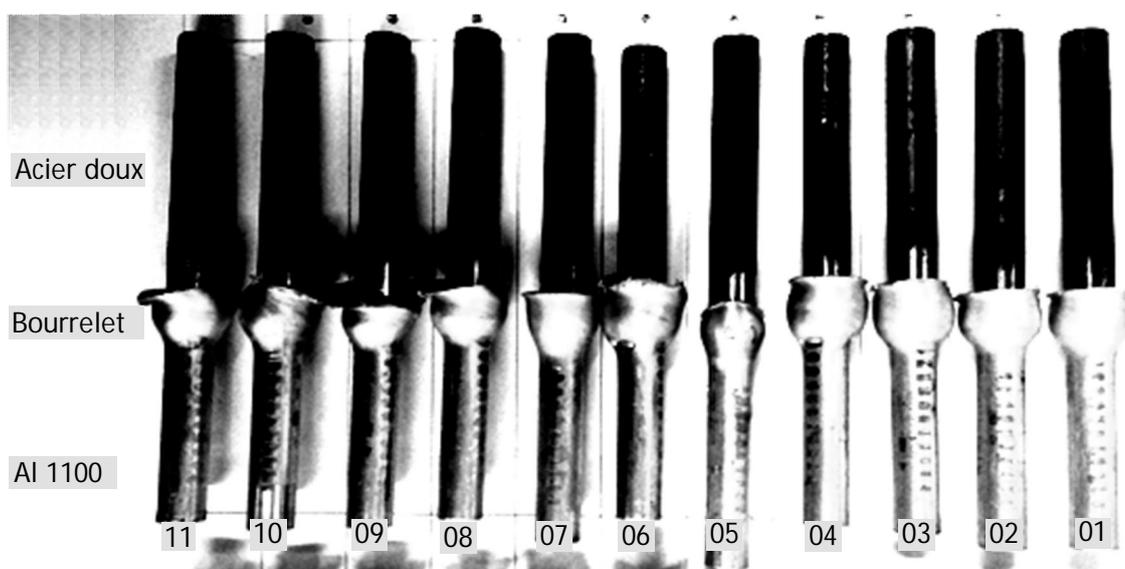


Figure V.1. Echantillons acier doux/aluminium 1100 soudés par friction rotative.

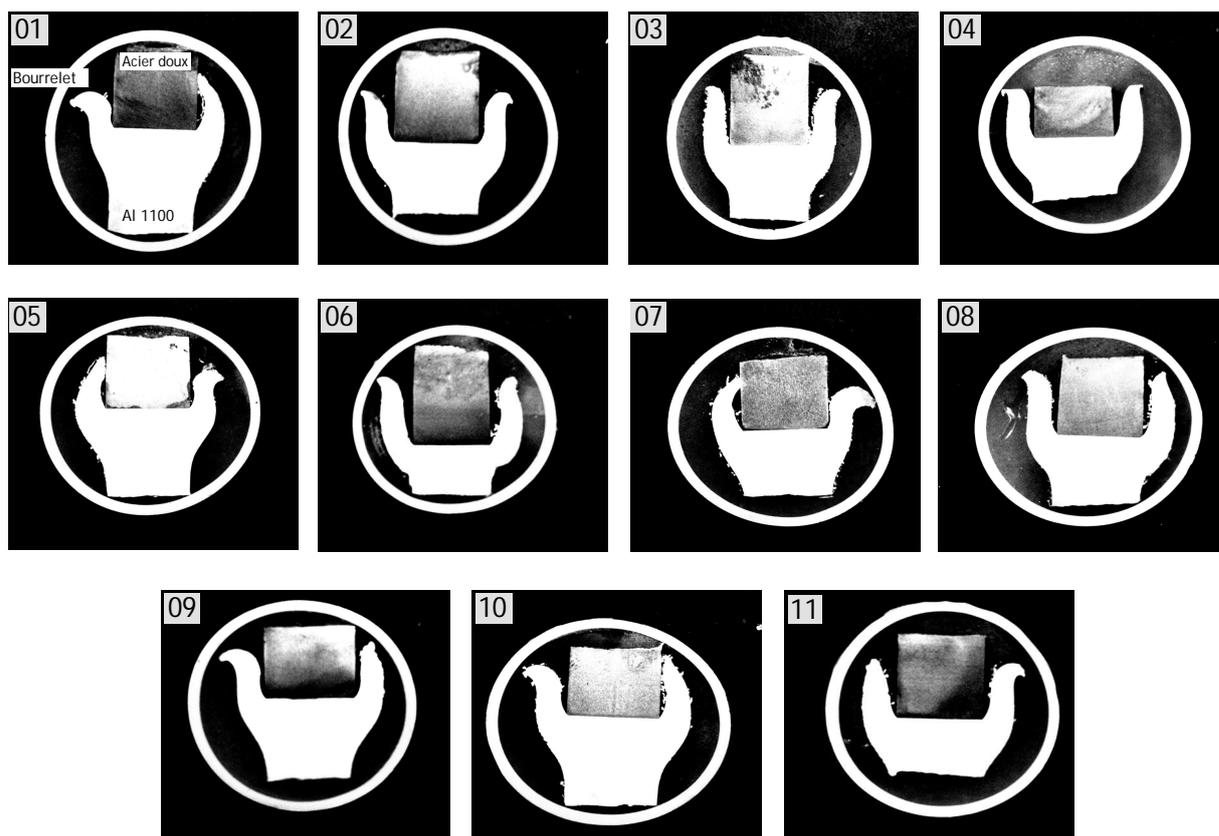


Figure V.2. Sections longitudinales des échantillons soudés acier doux/aluminium 1100.

La taille considérable du bourrelet est principalement due aux caractéristiques d'aluminium utilisé. L'aluminium Al 1100 ou l'aluminium pur se caractérise par une conductivité thermique et une malléabilité élevées par rapport aux autres types d'aluminium.

Le raccourcissement (en anglais, the burn-off), qui égale à la différence entre la somme des longueurs des deux pièces à souder et la longueur de l'échantillon résultant, a été mesuré pour tous les échantillons soudés. La figure V.3 montre les variations du raccourcissement des joints acier doux/aluminium 1100. Bien que le raccourcissement n'est pas un critère pour évaluer la qualité de la soudure ou l'influence des paramètres de soudage, mais c'est une bonne estimation de l'apport de chaleur pendant le soudage. Plus il y a de chaleur générée, plus la déformation plastique est considérable. Il est évident sur la figure V.3 que les variations des paramètres de soudage affectent directement la quantité de chaleur générée lors du soudage et par conséquent les propriétés des joints.

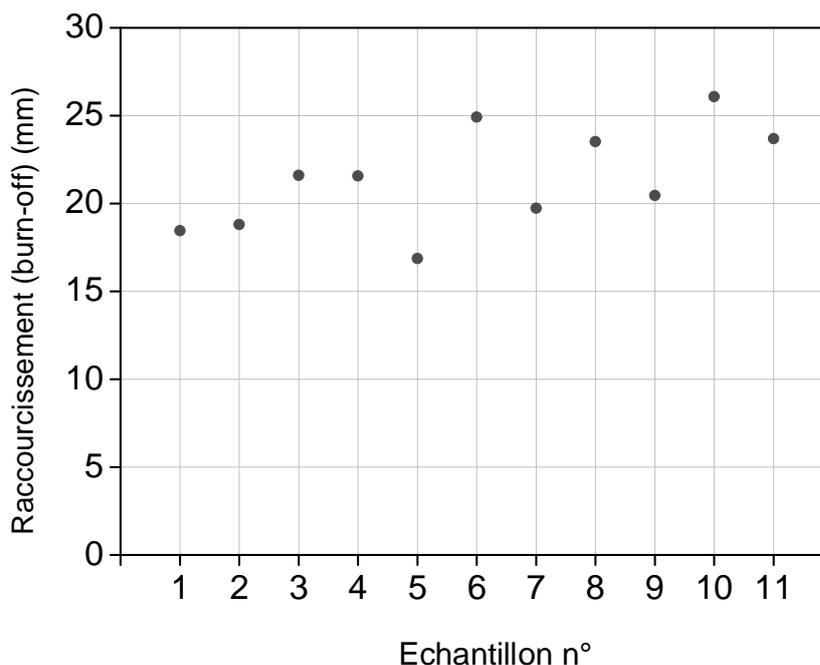


Figure V.3. Variations du raccourcissement des joints acier doux/aluminium 1100.

1.1. Caractérisation mécanique des joints acier doux/aluminium 1100

1.1.1 Essai de traction

La figure V.4 montre les échantillons soudés après les tests de traction. Tous les échantillons soudés, sous différents paramètres, étaient fracturés dans l'aluminium avec une forme rétreinte (necking shape), sauf un seul qui été fracturé à l'interface du joint.

La figure V.5 montre une fractographie par MEB de l'échantillon 8 et l'échantillon 7. Après le test de traction, les faciès de rupture de l'échantillon 8, qu'a été fracturé à l'interface du joint, montre l'aspect brillant caractéristique d'une rupture fragile, alors que l'analyse de l'échantillon 7, et par conséquent le reste des échantillons soudés, montre une rupture ductile (aspect mat).

Les résultats de l'essai de traction sont indiqués dans le tableau V.1. La résistance à la traction de l'échantillon 8 (fracturé à l'interface du joint) est 178,46 MPa, et c'est la valeur maximale enregistrée. Cet échantillon a été préparé à une vitesse de rotation et une pression de friction/temps aux niveaux moyens (1000 tr/min et 5.20 MPa/s), alors que sa pression de forgeage/temps est au niveau maximum (49,22 MPa /s).

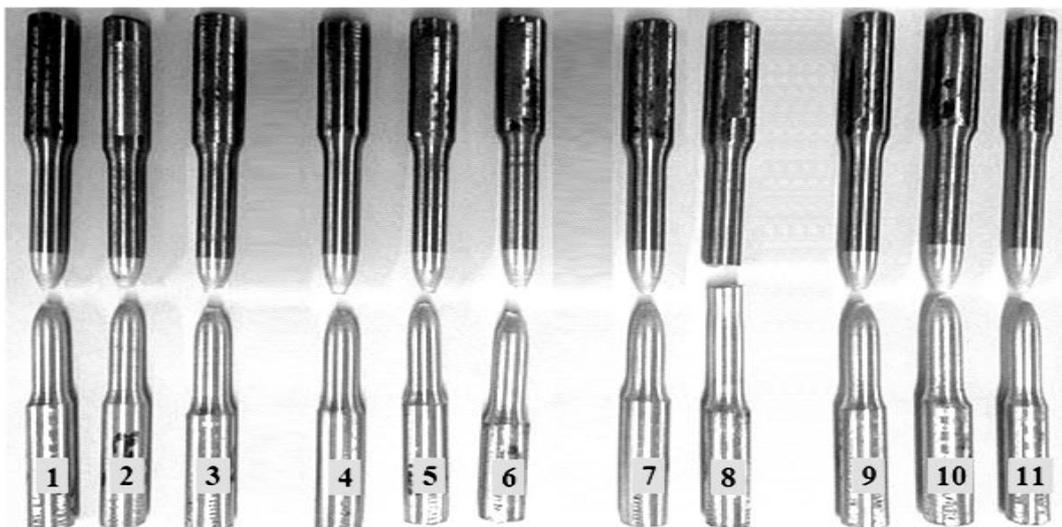


Figure V.4. Joints soudés acier doux/aluminium 1100 après les tests de traction.

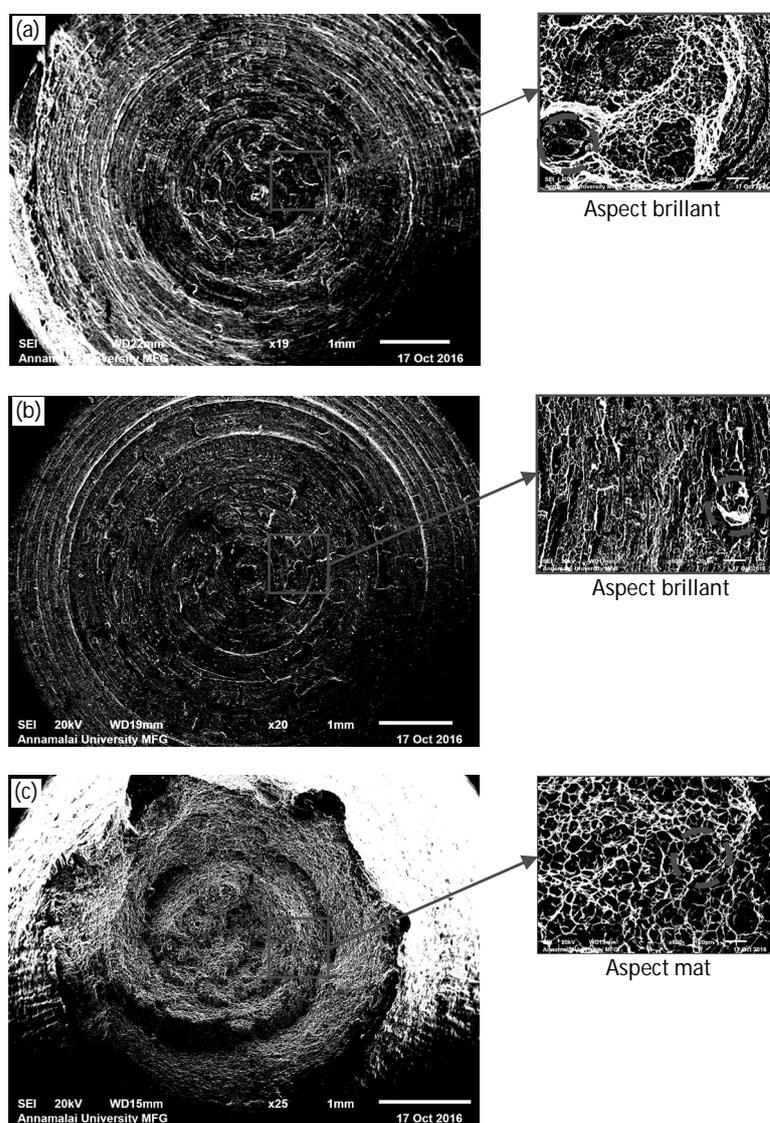


Figure V.5. Fractographie par MEB : (a) l'échantillon 8 – coté Aluminium, (b) l'échantillon 8 – coté Acier et (c) l'échantillon 7.

Tableau V.1. Matrice du plan composite centré (CCD) de petite taille.

Expérience N°	Facteurs			Réponses	
	A [MPa/s]	B [MPa/s]	C [tr/min]	R _T [MPa]	MD [Hv]
01	6,31	44,47	930	167,44	290,5
02	6,31	21,54	1070	151,26	299
03	4,08	44,47	1070	161,56	346,33
04	4,08	21,54	930	161,03	310,67
05	3,62	33,01	1000	156,01	350,5
06	6,77	33,01	1000	171,67	266,5
07	5,20	16,79	1000	156,01	253,5
08	5,20	49,22	1000	178,46	324
09	5,20	33,01	900	167,29	332
10	5,20	33,01	1100	152,62	286
11	5,20	33,01	1000	174,13	288,67
12	5,20	33,01	1000	174,13	288,67
13	5,20	33,01	1000	174,13	288,67
14	5,20	33,01	1000	174,13	288,67
15	5,20	33,01	1000	174,13	288,67

1.1.2 Mesures de la microdureté Vickers

Les résultats des mesures de la microdureté Vickers sont enregistrés dans le tableau V.1. Les valeurs de la microdureté des joints acier doux/aluminium 1100 semblent varier entre une valeur maximale de 350.5 Hv et une valeur minimale de 266,5 Hv. La valeur maximale est celle de l'échantillon 5. Cet échantillon été préparé à une vitesse de rotation et une pression de forgeage/temps aux niveaux moyens (1000 tr/min et 33,01 MPa/s), et sous une pression de friction/temps au niveau minimum (3,62 MPa /s). Tandis que, la valeur minimale de la microdureté est celle de l'échantillon 6. Cet échantillon été préparé à la même vitesse de rotation et sous la même pression de forgeage/temps que l'échantillon 5, mais avec une pression de friction/temps au niveau maximum (6,77 MPa/s).

1.2. Analyse des effets des paramètres de soudage par la méthode MSR

Après la construction d'un plan composite centré (CCD) suivant le tableau V.1, nous avons utilisé Design-Expert (un logiciel) pour calculer les coefficients des modèles empiriques, ainsi que pour effectuer une analyse de la variance (ANOVA) et ensuite tracer les surfaces de réponses.

1.2.1 Les modèles empiriques développés par MSR

Les modèles (ou les relations) de second degré développés par MSR sont exprimés comme suit:

Modèle de la résistance à la traction (R_T):

$$R_T = -751,91 - 0,45A - 5,33B + 2,05C - 0,1AB + 0,05AC + 8,03 \times 10^{-3} BC - 3,76A^2 - 0,02B^2 - 1,32 \times 10^{-3} C^2 \quad \dots\dots\dots(\text{Eq. V.1})$$

Modèle de la microdureté à l'interface (MD):

$$MD = 3310,9 - 275,6A + 28,71B - 5,26C - 2,14AB + 0,23AC - 0,02BC + 8,59A^2 + 5,89 \times 10^{-3} B^2 + 2,18 \times 10^{-3} C^2 \quad \dots\dots\dots(\text{Eq. V.2})$$

- Avec :
- La variable A correspond à la pression de friction/temps
 - La variable B correspond à la pression de forgeage/temps
 - La variable C correspond à la vitesse de rotation

Selon ces modèles, la résistance à la traction et la dureté des joints acier doux/aluminium 1100 peuvent être prévues. La figure V.6 présente une comparaison entre les valeurs réelles (ou expérimentales) des réponses et leurs valeurs prévues obtenues par les modèles précédents. Les graphes indiquent un degré élevé d'accord entre les valeurs prévues et les valeurs réelles, ce qui signifie que les modèles ci-dessus sont significatifs.

1.2.2 Test de signification du modèle et ordre de contribution

Pour vérifier la signification des coefficients des modèles précédents, une ANOVA est réalisée. Le tableau V.2 donne l'ANOVA pour la résistance à la traction et la microdureté des joints soudés.

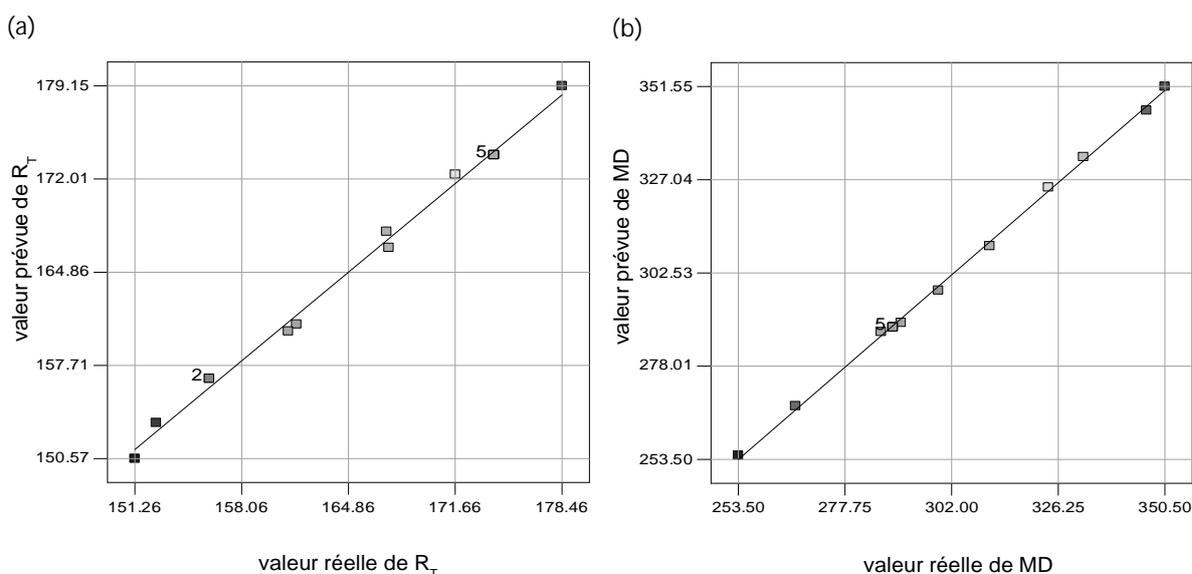


Figure V.6. Graphes de corrélation pour la réponse: (a) résistance à la traction (R_T) et (b) microdureté (MD).

Tableau V.2. Analyse de variances (ANOVA) pour la résistance à la traction et la microdureté des joints aciers doux/aluminium 1100.

	Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F – Value	P – Value Prob> F	
Résistance à la traction (RT)	Model	1155,67	9	128,41	123,60	< 0.0001	significant
	A	122,62	1	122,62	118,03	0.0001	
	B	252,00	1	252,00	242,57	< 0.0001	
	C	107,60	1	107,60	103,58	0.0002	
	Residual	5,19	5	1,04			
	Lack of Fit	5,19	1	5,19			
	Pure Error	0	4	0			
	Std. Deviation	1,02		R^2	0,9955		
	Mean	166,27		Adj. R^2	0,9875		
	CV (%)	0,61		Pred. R^2	0,5162		
PRESS	561,58		Adeq. precision	34,350			
Micro dureté (MD)	Model	10611,89	9	1179,10	495,13	< 0.0001	significant
	A	3528,00	1	3528,00	1481,48	< 0.0001	
	B	2485,13	1	2485,13	1043,56	< 0.0001	
	C	1058,00	1	1058,00	444,28	< 0.0001	
	Residual	11,91	5	2,38			
	Lack of Fit	11,91	1	11,91			
	Pure Error	0	4	0			
	Std. Deviation	1,54		R^2	0,9989		
	Mean	300,16		Adj. R^2	0,9969		
	CV (%)	0,51		Pred. R^2	0,8788		
PRESS	1287,28		Adeq. precision	76,984			

La probabilité de signification de chaque coefficient est exprimée par la valeur-P «P-value ou Prob> F». Pour notre étude, le niveau de confiance ou de signification est à 5 %, donc si les valeurs-P sont inférieures à 0,05, cela indique que les coefficients du modèle développé sont significatifs. D'après le tableau V.2, nous avons des valeurs-P < 0.0001 (une probabilité fortement significative), ce qui indique que nos modèles sont adéquates pour prédire la résistance à la traction et la dureté des joints aciers doux/aluminium 1100 soudés par friction rotative.

L'ordre de contribution, ou d'influence, de chaque paramètre de soudage sur la résistance à la traction ou la dureté peut être déterminé à partir de la «valeur-F» correspondante. Les données du tableau V.2, nous permettent de conclure que la pression de forgeage/temps (facteur B) est le paramètre le plus influant sur la résistance à la traction des joints soudés, suivi par la pression de friction/temps (facteur A), puis la vitesse de rotation (facteur C). En revanche, l'ANOVA indique que pour la microdureté, la pression de friction/temps est le plus influant, suivi par pression de forgeage/temps ensuite la vitesse de rotation.

1.2.3 Courbes des surfaces de réponses

Pour déterminer l'interaction entre les différents paramètres de soudages et leurs effets sur les propriétés mécaniques des joints soudés, le Design-Expert nous trace des courbes des surfaces de réponse (graphes en 3D) ou courbes isoréponses (graphes en 2D). Ces courbes montrent l'interaction de chaque deux paramètres, alors que le troisième paramètre est égale à son niveau moyen (ou niveau centre).

Effet des paramètres de soudage sur la résistance à la traction (R_T)

En analysant les graphes de la figure V.7, la résistance à la traction des joints soudés augmente avec l'augmentation de la pression de forgeage/temps et de la pression de friction/temps. Alors que la vitesse de rotation a un effet négatif sur la résistance des joints soudés, de sorte que son augmentation entraîne la diminution de la résistance à la traction.

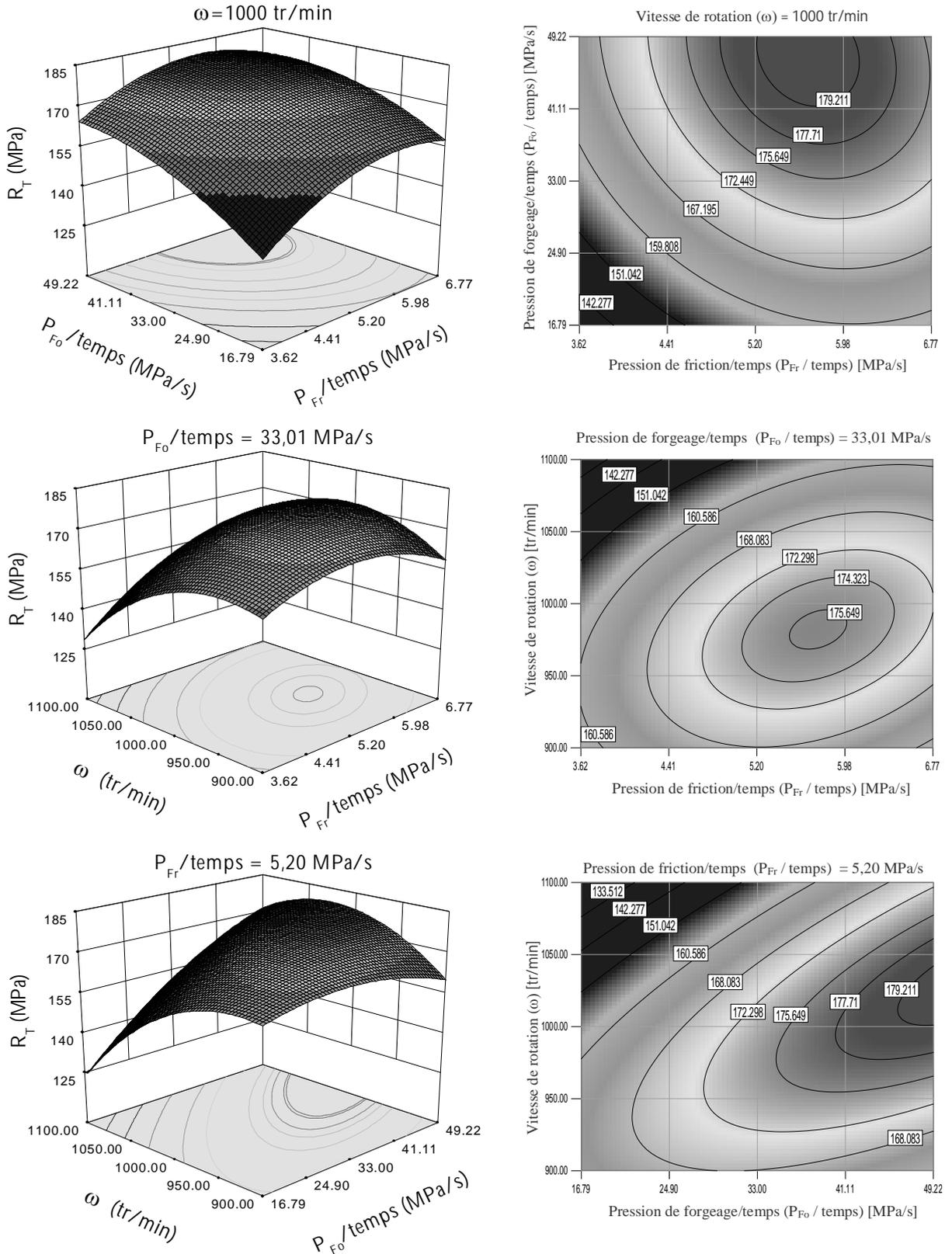


Figure V.7. Courbes des surfaces de réponse et courbes isoréponses de la résistance à la traction (R_T).

Effet des paramètres de soudage sur la microdureté (MD)

La figure V.8 montre que la dureté des joints soudés diminue avec l'augmentation de la pression de friction/ temps et de la vitesse de rotation. Mais l'augmentation de la pression de forgeage/temps provoque une augmentation de la dureté.

1.3 Optimisation des paramètres de soudage

Le but de cette phase de notre travail est de trouver les paramètres de soudage optimaux afin de maximiser à la fois la résistance et la dureté des joints acier doux/aluminium 1100 soudés par friction. La méthode des surfaces de réponses est une méthode idéale pour déterminer les paramètres optimaux. Les critères d'optimisation sont définis comme ils sont présentés dans le tableau V.3, par contre les solutions optimales (ou les paramètres optimaux) sont présentées dans le tableau V.4.

Tableau V.3. Critères d'optimisation des paramètres de soudage acier doux/aluminium 1100.

Facteurs	Unité	Notation	Critère	Limites	
				Inférieure	Supérieure
Pression de friction/temps	MPa/s	A	Maximiser	3.62	6.77
Pression de forgeage/temps	MPa/s	B	Maximiser	16.79	49.22
Vitesse de rotation	Tr/min	C	Dans la gamme	900	1100
Résistance à la traction	MPa	R _T	Maximiser	170	180
Micro dureté	Hv	MD	Maximiser	250	300

Tableau V.4. Solutions optimales du soudage acier doux/aluminium 1100.

Solution	Paramètres optimaux			Valeurs prévues des réponses		Désirabilité
	A	B	C	R _T [MPa]	MD [Hv]	
01	5,62	49,14	1001,25	180.00	300.00	0.8920
02	5,56	49,22	1009,70	180.48	300.00	0.8861
03	5,84	49,22	992,55	179.02	291.50	0.8527

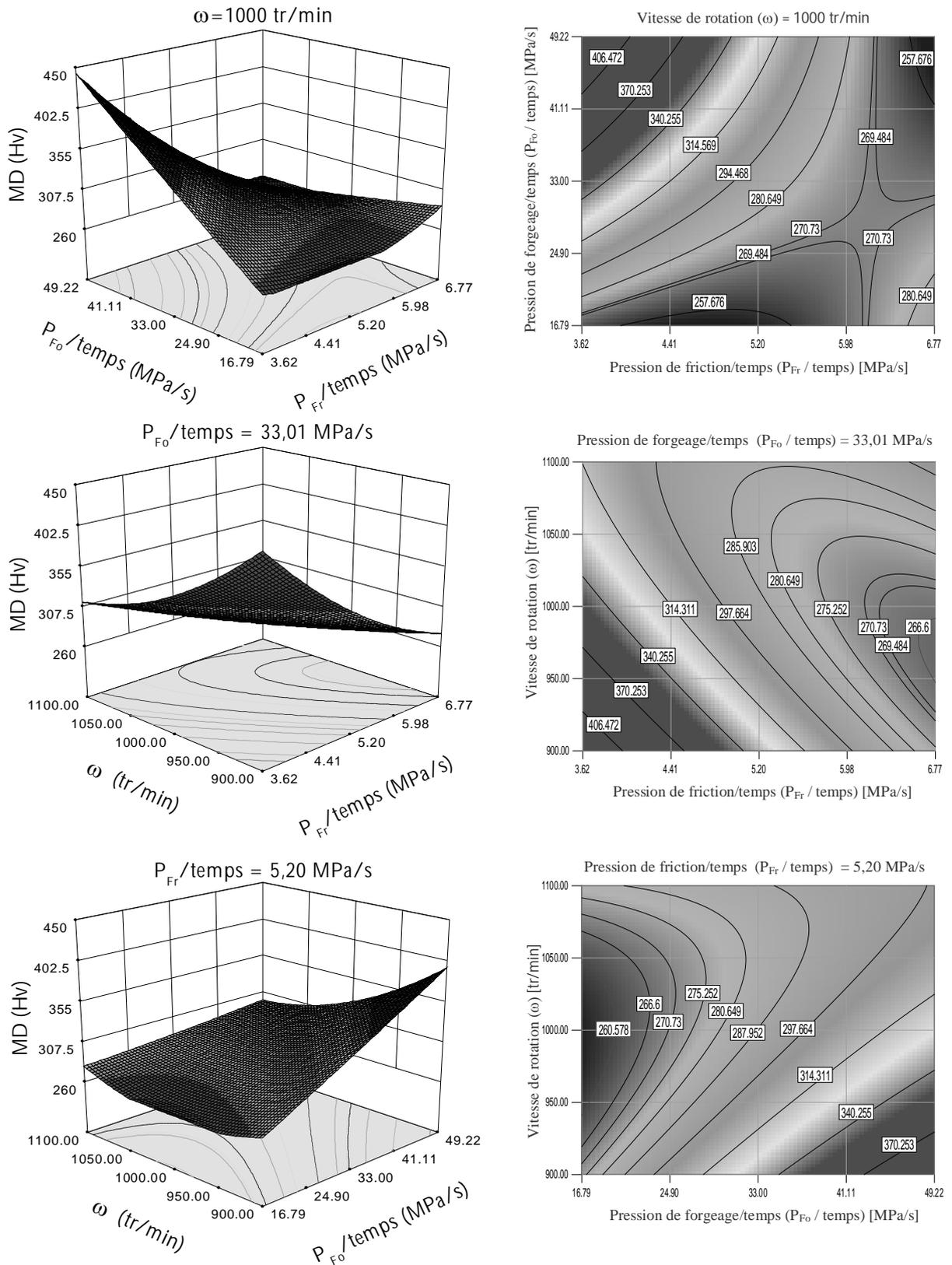


Figure V.8. Courbes des surfaces de réponse et courbes isoréponses de la micro dureté (MD).

1.4. Validation de solutions optimales

Afin de valider les solutions optimales données par la méthode MSR, trois processus de soudages par friction acier doux/aluminium 1100 sont effectués selon les paramètres recommandés. Le tableau V.5 indique les paramètres de soudage optimaux, les valeurs mesurées (Exp.) et celles prévues (Prév.) de la résistance à la traction et de la microdureté, ainsi que le pourcentage d'erreur (PE%).

Tableau V.5. Comparaison entre les valeurs prévues et les valeurs expérimentales.

Expérience N°	Solution N°	Paramètres recommandés					Résistance à la traction (MPa)			Micro dureté (Hv)		
		Pression de friction [MPa]	Temps de friction [s]	Pression de forgeage [MPa]	Temps de forgeage [MPa]	Vitesse de rotation [tr/min]	Exp.	Prév.	PE (%)	Exp.	Prév.	PE (%)
I	1	33,85	6	149,58	3	1000	178,36	180	0,91	312,5	300	4,17
II	2	19,68	4	149,58	3	1010	170,28	180,48	5,65	289	300	3,67
III	3	18,11	3	149,58	3	990	171,57	179,02	4,16	305	291,5	4,63

On peut conclure qu'il y'a une convergence inégale entre les valeurs mesurées et les valeurs prévues. Alors que le processus de soudage selon les paramètres recommandés en solution optimale n° 1 a produit des échantillons avec une résistance à la traction proche de celle prévue (PE < 1%), les autres échantillons préparés selon les solutions n°2 et n°3 ont un pourcentage d'erreur considérable. Donc, nous pouvons adopter les paramètres de soudage recommandés par la solution n°1 comme des paramètres optimaux en soudage par friction rotative acier doux/aluminium 1100.

Préparation de la couche intermédiaire du soudage acier doux/alumine

Les résultats d'optimisation par MSR sont utilisés pour préparer une couche d'aluminium bien soudée à l'extrémité de la tige d'acier. Les paramètres de soudage appliqués sont ceux recommandés dans la solution n° 1.

1.5. Effet de la pression de forgeage/temps sur la microstructure des joints

Afin d'analyser l'effet du paramètre : pression de forgeage/temps, sur la microstructure des joints soudés, des observations par MEB sont effectuées sur les interfaces des joints des échantillons 7, 11 et 8. Le choix de ces trois échantillons est principalement dû à l'objectif de cette analyse, comme le soudage de ces échantillons s'est effectué avec la même vitesse de rotation, la même pression de friction /temps, mais sous une pression de forgeage/temps différente (Tableau V.6).

Tableau V.6. Paramètres de soudage par friction rotative des échantillons : 7, 11 et 8.

Expérience N°	Facteurs			Paramètres de soudage				
	A	B	C	Pression de friction [MPa]	Temps de friction [s]	Pression de forgeage [MPa]	Temps de forgeage [MPa]	Vitesse de Rotation [tr/min]
07	5,20	16,79	1000	19,68	4	98,41	6	1000
11	5,20	33,01	1000	19,68	4	133,8	4	1000
08	5,20	49,22	1000	19,68	4	149,58	3	1000

La figure V.9 représente les images du MEB des échantillons 7, 11 et 8. L'image de l'échantillon 7 (grossissement $\times 4500$) montre la formation d'une couche mince (épaisseur ≈ 900 nm) de composés intermétalliques (CIM) à l'interface acier/aluminium. Cet échantillon a été préparé sous la pression de forgeage/temps la plus faible (16,79 MPa/s). Tandis que, cette couche CIM n'apparaissait pas sur les images des échantillons 11 et 8 (grossissement $\times 10000$), ce qui signifie qu'elle peut être très mince ou n'a pas été formée. Sachant que ces derniers sont préparés sous une pression de forgeage/temps moyenne (33,01 MPa/s pour l'échantillon 11) et maximale (49,22 MPa/s pour l'échantillon 8). Cela peut montrer l'influence de la pression de forgeage/temps sur l'épaisseur de la couche CIM formée à l'interface. L'augmentation de la pression de forgeage/temps conduit à la formation des couches CIM très minces.

Afin d'étudier plus profondément la microstructure à l'interface de soudage, une analyse EDS est réalisée sur un échantillon sélectionné contenant une couche IMC (échantillon 7). La figure V.10 montre les résultats d'analyse EDS de trois régions S, I et A correspondant respectivement au côté de l'acier doux, à la région d'interface et au côté de l'aluminium. On peut remarquer la différence dans la composition des trois régions avec la

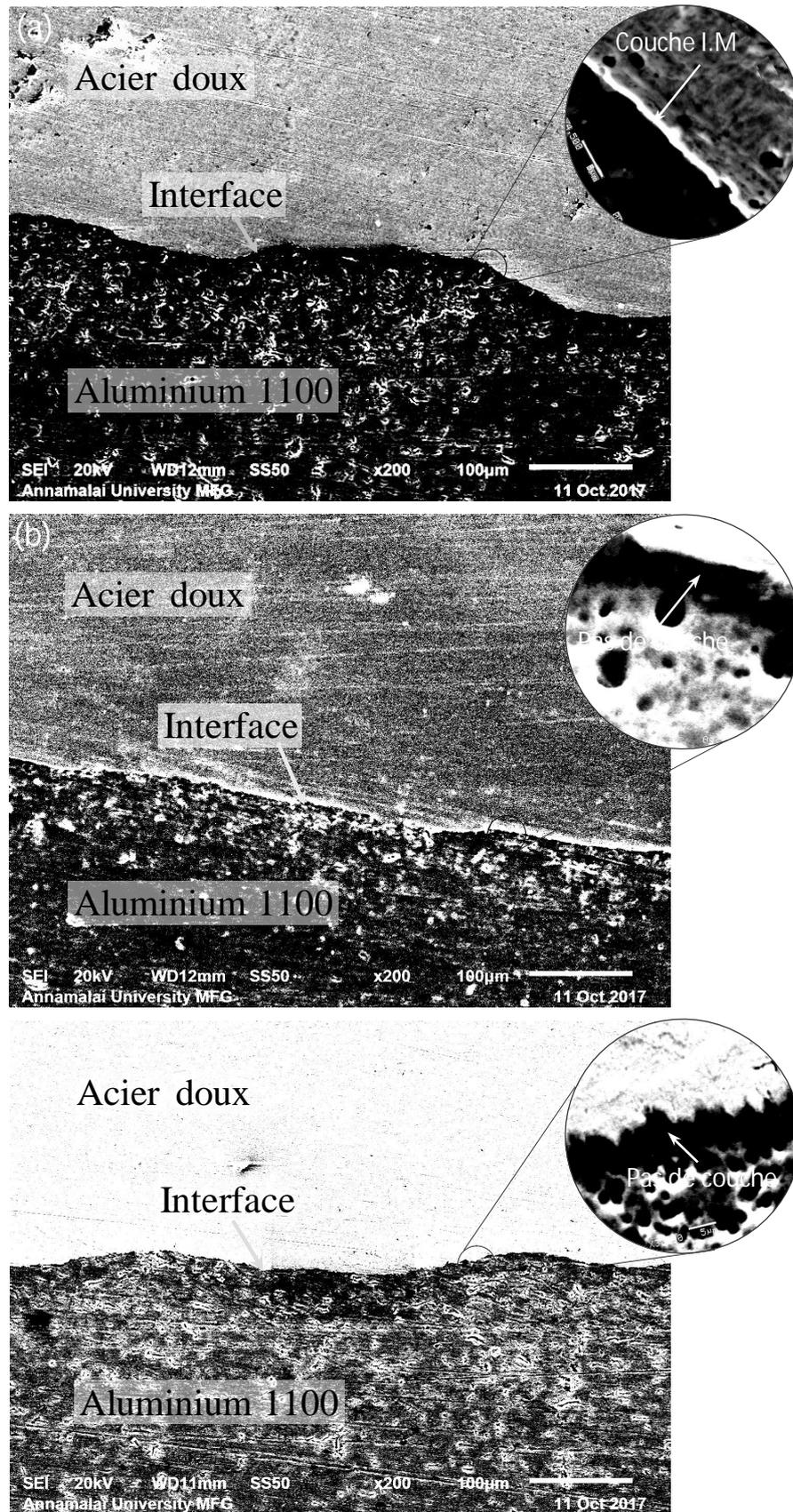


Figure V.9. Micrographies par MEB de l'interface du joint de : (a) l'échantillon 7, (b) l'échantillon 11 et (c) l'échantillon 8.

richesse de la région I en aluminium (Al). La présence de l'élément Al à cette région, conduit inévitablement à la formation des composés intermétalliques à base Fe-Al. La formation de cette couche CIM à l'interface de soudure de l'échantillon 7 peut être la raison la plus probable de la faiblesse de son joint, alors que la disparition de cette couche augmente la résistance du joint (échantillons 11 et 8).

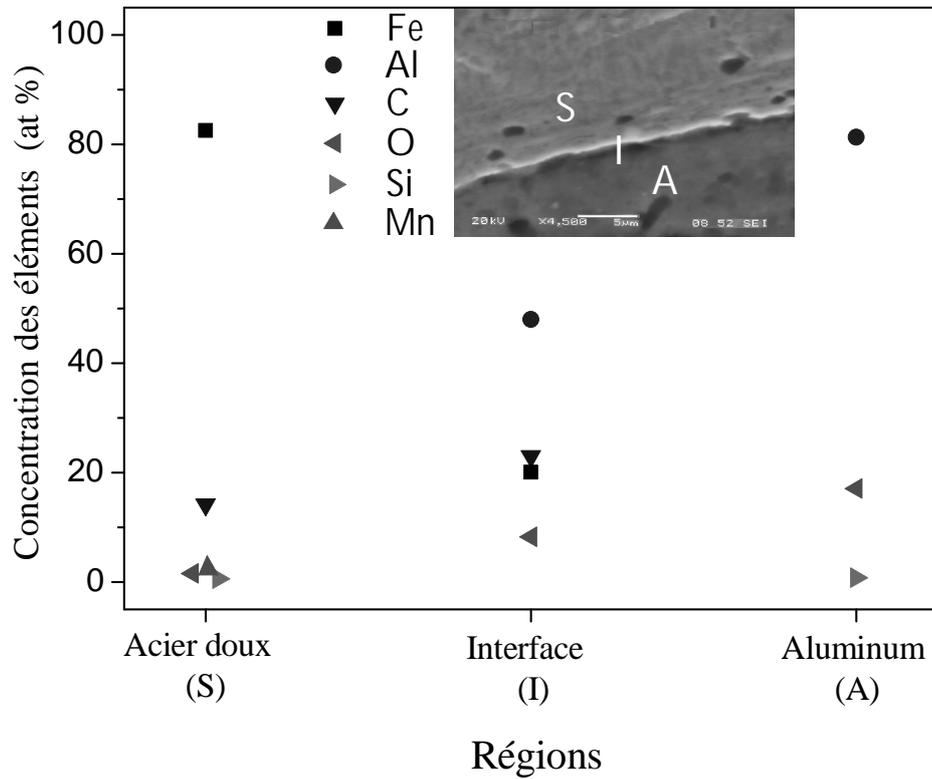


Figure V.10. Résultats de l'analyse par EDS de l'échantillon (7).

Partie 2 : Soudage par friction rotative acier doux/alumine

Le soudage par friction rotative acier doux/alumine est réalisé selon les étapes décrits dans le chapitre précédent. La figure V.11 montre les échantillons soudés avec succès par le procédé de soudage par friction rotative

L'observation directe du procédé de soudage acier doux/alumine, nous a permis de conclure que le processus s'effectue en trois phases selon l'état de la couche intermédiaire d'aluminium :

La déformation plastique de la couche intermédiaire : Lors de la phase de friction, la pression appliquée et la rotation conduisent à la déformation de la couche d'aluminium.

L'écoulement plastique de l'aluminium : La chaleur générée pendant la phase de friction entraîne un écoulement plastique de l'aluminium entre les surfaces des pièces à souder. Ensuite, avec l'application de la pression de forgeage, une partie de l'aluminium intermédiaire est expulsée vers l'extérieur du joint.

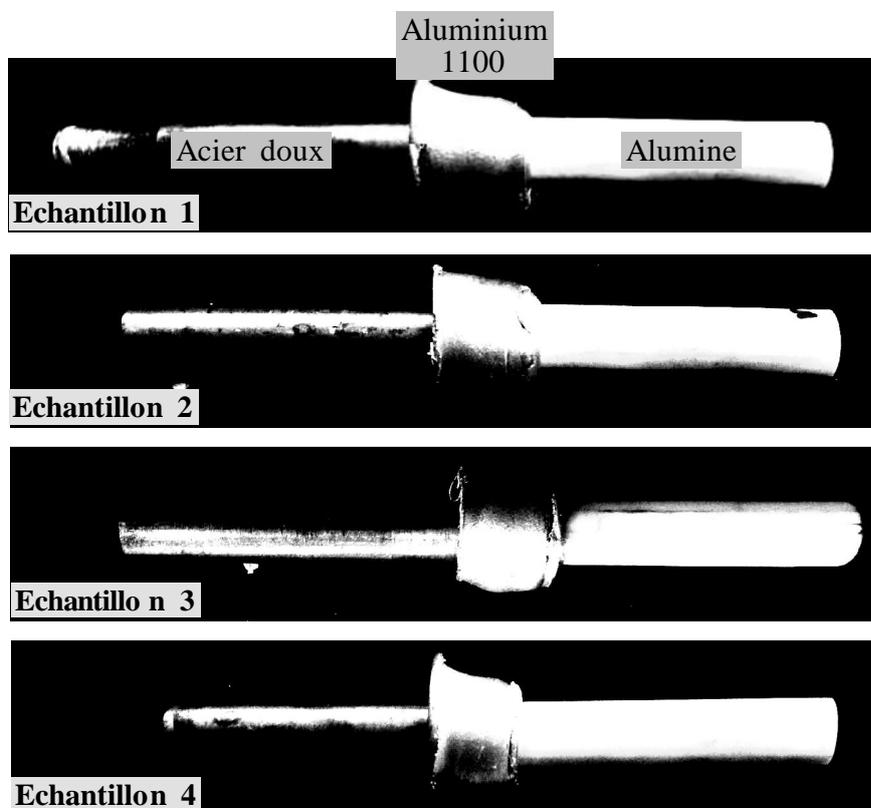


Figure V.11. Joints acier doux/alumine soudés par friction rotative, avec l'utilisation d'une couche intermédiaire en aluminium.

La solidification : La baisse de la température à l'extérieur du joint, conduit à la solidification de l'aluminium et la formation d'un bourrelet sous forme d'un anneau autour de l'interface du joint.

Après le soudage, les joints acier doux/alumine (figure V.11) sont enrobés dans une résine, puis sectionnés longitudinalement. Une autre série des joints soudés est usinée sur machine de tour afin de retirer le bourrelet de soudure.

La figure V.12 montre les échantillons soudés, après avoir retiré le bourrelet, ainsi que les sections longitudinales des joints acier doux/alumine.

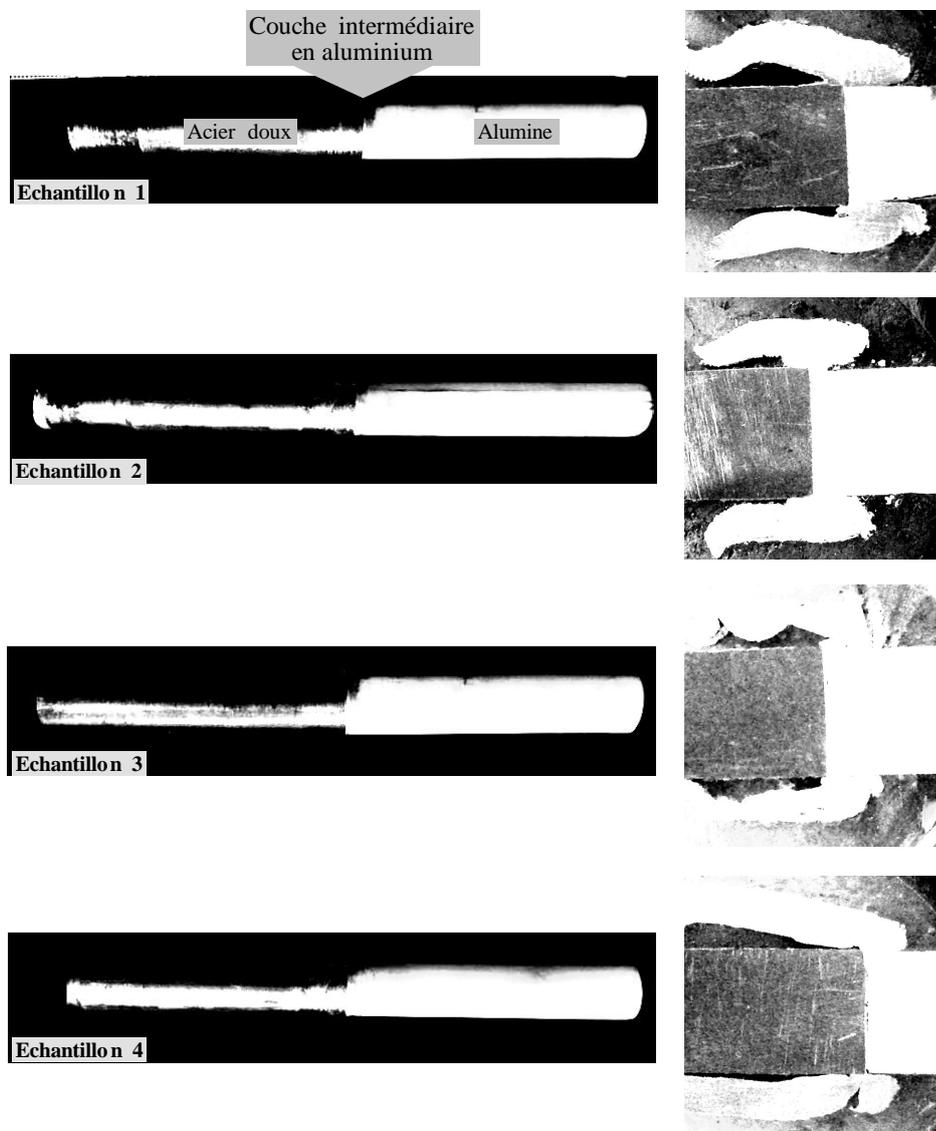


Figure V.12. Echantillons acier doux/alumine soudés par friction rotative, avec une couche intermédiaire en aluminium.

2.1. Caractérisation microstructurale des joints acier doux/alumine :

2.1.1. Observations par microscope optique

La figure V.13 montre les images microscopiques, des joints acier doux/alumine, obtenues par microscope optique.

La consommation de la couche intermédiaire lors du soudage, mène à l'apparition d'une couche résiduelle plus mince que la couche initiale (3 mm). La couche d'aluminium semble bien adhérer à la tige d'acier, ce qui indique que les joints acier/aluminium ne sont pas dessoudés lors du processus de soudage. L'aspect général des interfaces aluminium/alumine varie d'un échantillon à l'autre, avec l'appariation des zones non soudées.

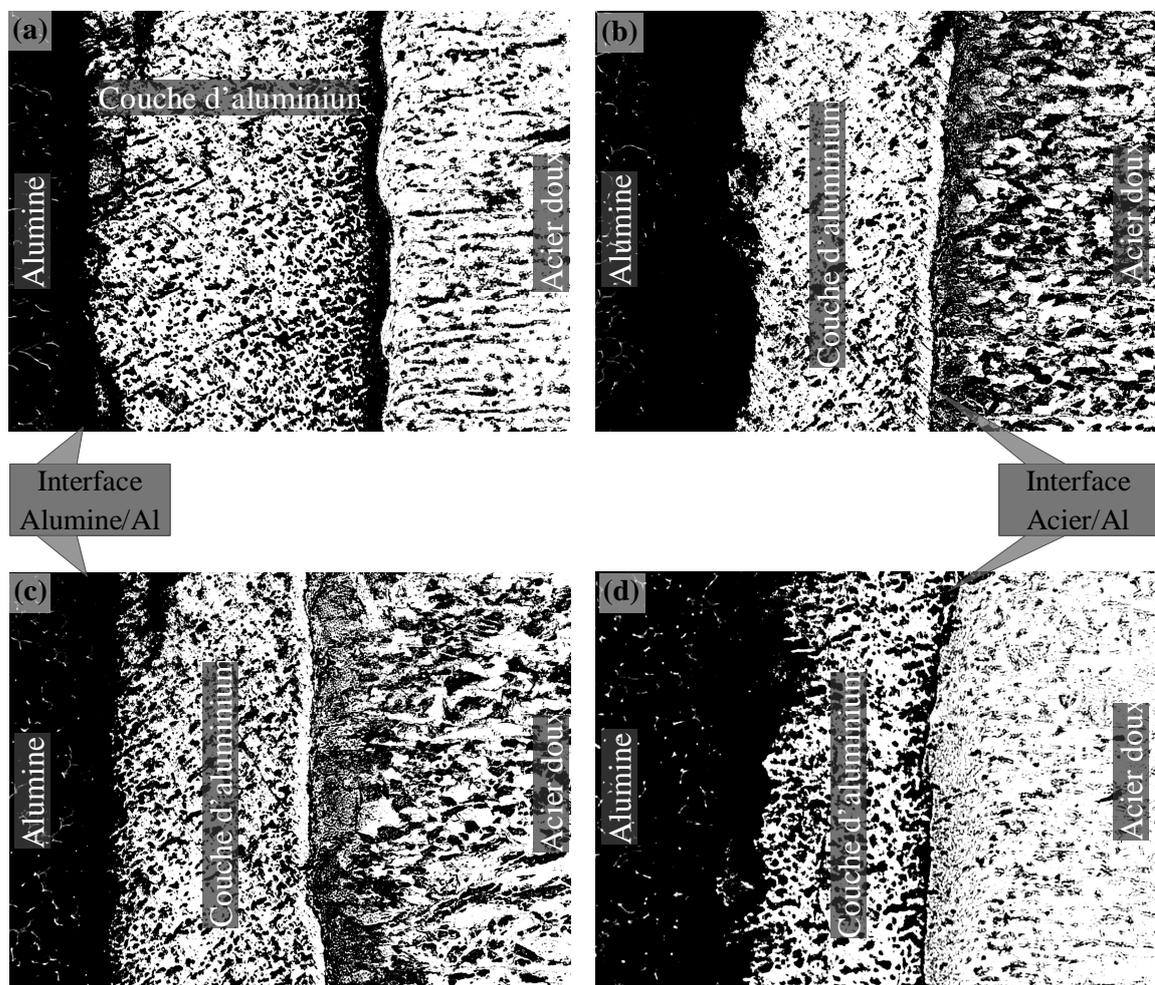


Figure V.13. Micrographies par microscope optique des joints acier doux/alumine soudés par friction rotative (grossissement $\times 100$) : (a) échantillon 1, (b) échantillon 2, (c) échantillon 3 et (d) échantillon 4.

2.1.2. Observations par microscope électronique à balayage

L'observation par MEB a révélé certains faits importants comme il est montré dans les figures V.14 et V.15. Tout d'abord, les micrographies de la figure V.14 nous permis d'estimer l'épaisseur moyenne de la couche résiduelle.

A partir les mesures de l'épaisseur de la couche résiduelle, nous avons remarqué que l'épaisseur de la couche résiduelle varie d'un échantillon à l'autre et donc elle est influencée par le temps de friction. L'épaisseur moyenne de la couche résiduelle dans l'échantillon 1, qu'été préparée pendant une courte période de friction (par rapport aux autres échantillons soudés) est de 355 μm et qui représente un taux de 11.8 % de l'épaisseur initiale. Avec l'augmentation du temps de friction (échantillons 2, 3 et 4), l'épaisseur de la couche résiduelle diminue jusqu'à un taux de 8.1 %.

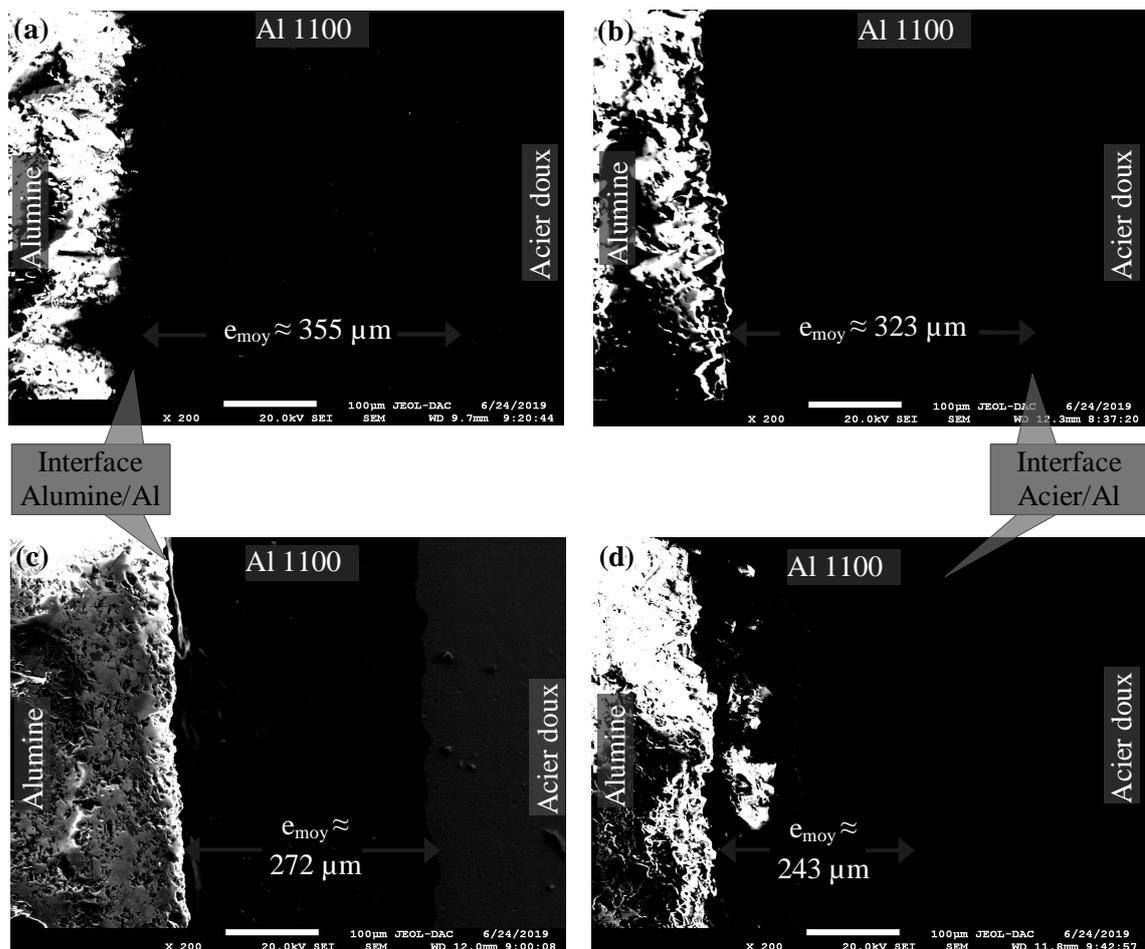


Figure V.14. Micrographies par MEB des joints acier doux/alumine soudés par friction rotative (grossissement $\times 200$) : (a) échantillon 1, (b) échantillon 2, (c) échantillon 3 et (d) échantillon 4.

. La figure V.15 montre une analyse par MEB des deux interfaces alumine/aluminium et aluminium/acier. Pour l'interface aluminium/acier, elle ne semble pas différente de celles de la figure V.9, ce qui indique que elle n'été pas affectée par le processus de soudage.

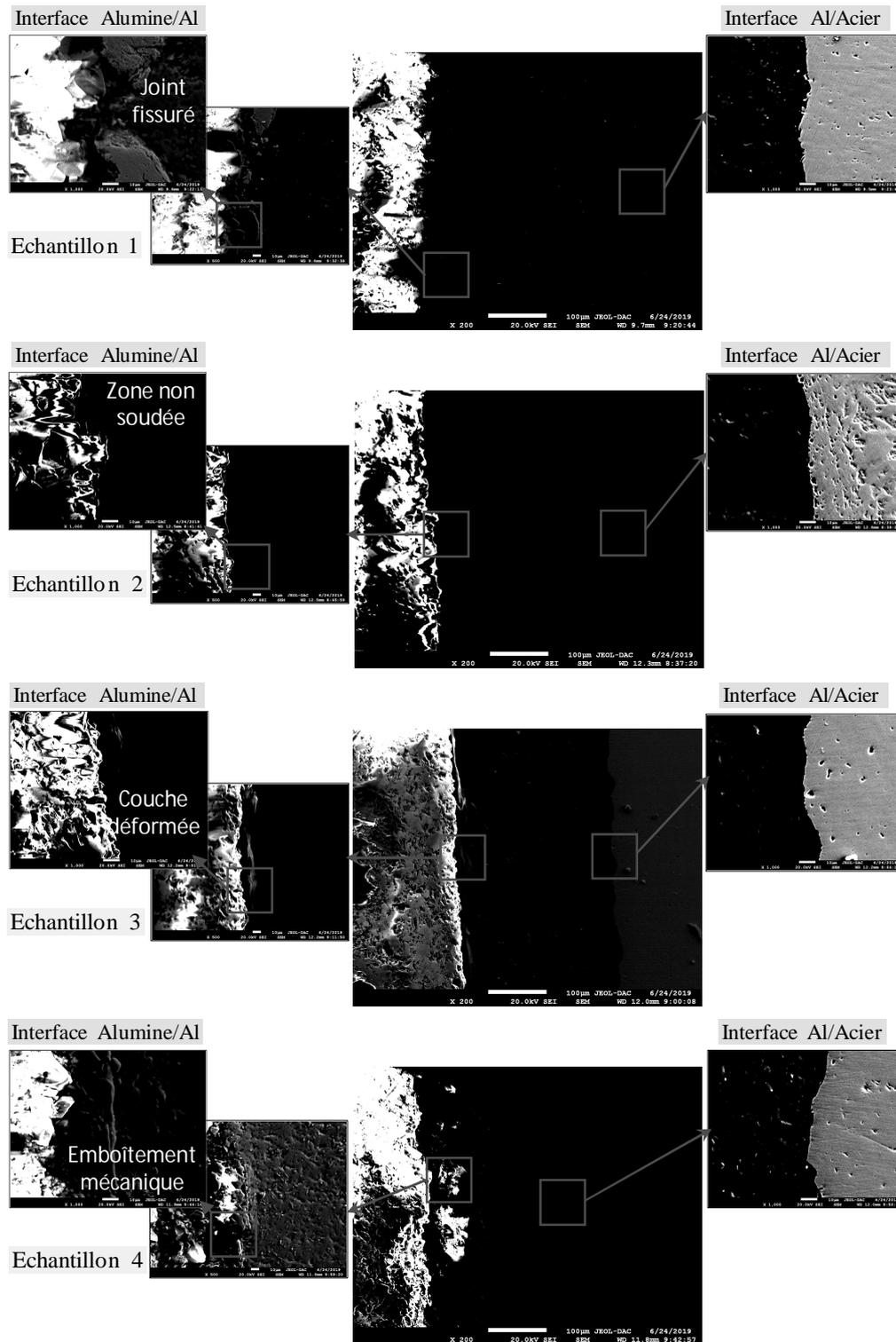


Figure V.15. Analyse par MEB des interfaces alumine/aluminium 1100 et aluminium 1100/acier doux.

Cependant, nous avons remarqué différents aspects à l'interface alumine/aluminium. Tout d'abord, les images de l'interface de l'échantillon (1) (avec différents grossissements) montrent l'apparition d'une fissure le long de l'interface du joint, avec des changements en structure granulaire des zones adjacentes à l'interface. Ces changements déterminent les zones affectées thermiquement (ZAT) des deux côtés du joint. Dans l'interface de l'échantillon (2), on remarque la présence des zones non soudées (soudage incomplet). A l'interface de l'échantillon (3), nous remarquons une déformation de la ZAT d'aluminium le long de l'interface du joint. Alors que l'interface de l'échantillon (4) montre un phénomène dit emboîtement mécanique (en anglais : *mechanical interlocking*) entre l'aluminium et l'alumine, où l'aluminium diffuse dans la ZAT d'alumine et occupe les pores entre les grains de la céramique.

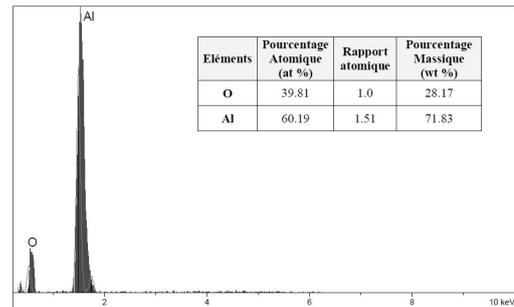
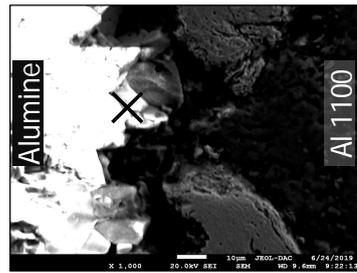
Cette différence entre les interfaces alumine/aluminium est principalement due aux variations du temps de friction d'un échantillon à l'autre. En général, le temps de friction a un effet direct sur la quantité de chaleur générée pendant le processus de soudage, de sorte qu'avec un temps de friction plus long, une quantité de chaleur plus élevée est générée. Donc, si le temps de friction augmente, la quantité de chaleur générée est suffisante pour la diffusion de l'aluminium dans la ZAT de l'alumine et par conséquent l'emboîtement mécanique à l'interface alumine/aluminium. Alors que si le temps de friction est court, la chaleur générée est insuffisante pour que l'aluminium diffuse dans la ZAT.

2.1.3 Analyse par EDS des joints acier doux/alumine

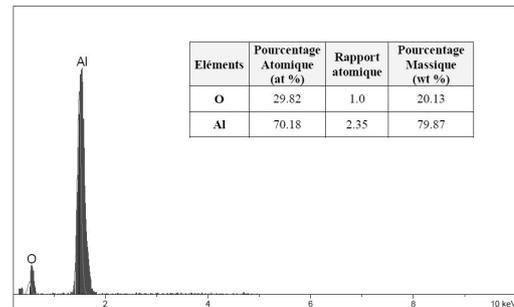
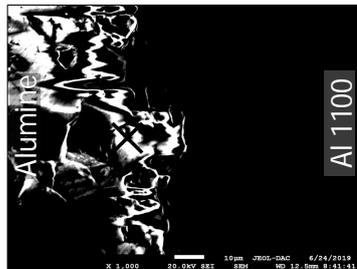
La figure V.16 montre les spectres d'analyse par EDS des joints acier doux/alumine soudés par friction rotative. Dans le but d'évaluer la diffusion de l'aluminium dans la ZAT de l'alumine, l'analyse par EDS est effectuée sur une zone très proche de l'interface alumine/aluminium. La comparaison des spectres de l'analyse de l'alumine (matériau de base) et de l'aluminium (couche intermédiaire) avec ceux des interfaces alumine/aluminium, nous donne les remarques suivantes :

- La richesse de l'interface alumine/aluminium en Al, ce qui indique la diffusion de l'aluminium dans la ZAT de l'alumine.
- A l'interface alumine/aluminium, le rapport atomique entre l'Al (aluminium) et l'O (oxygène) varie d'un échantillon à l'autre, ce qui indique que le temps de friction a un effet sur la diffusion de l'aluminium.

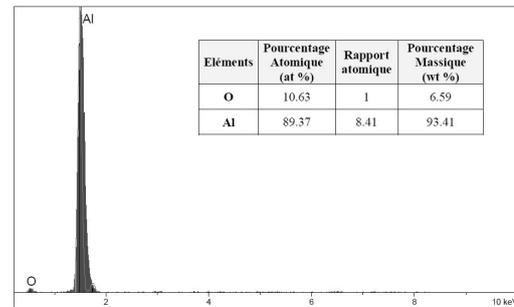
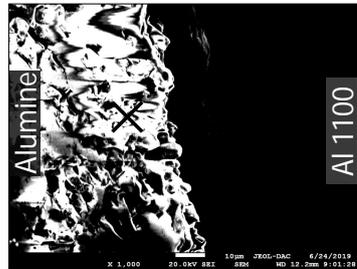
Echantillon 1



Echantillon 2



Echantillon 3



Echantillon 4

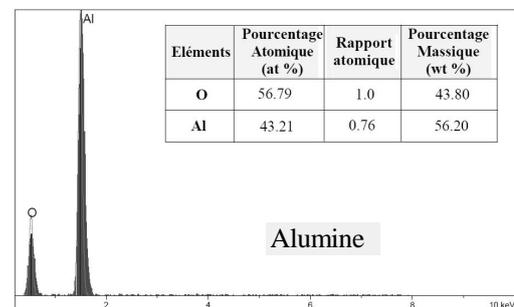
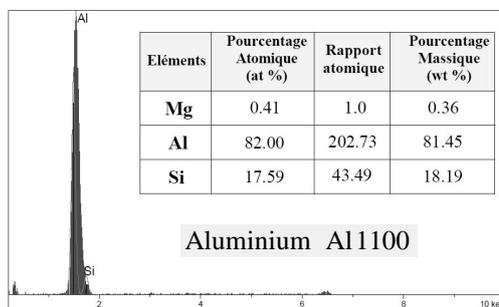
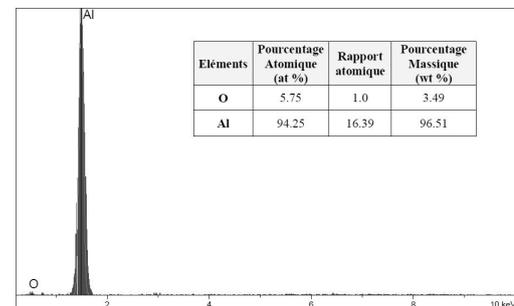
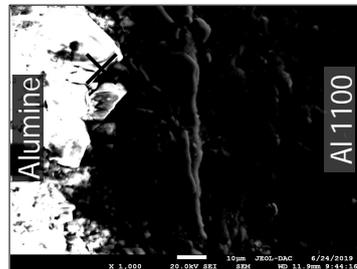


Figure V.16. Analyse par EDS des joints acier doux/aluminium 1100 soudés par friction rotative.

- Par rapport à l'analyse de l'alumine (matériau de base), le rapport atomique Al/O augmente avec l'augmentation du temps de friction.

En principe, la diffusion de l'aluminium dans la ZAT de l'alumine est liée à la chaleur générée pendant la phase de friction, de sorte que si la quantité de chaleur générée augmente, la diffusion de l'aluminium dans la ZAT d'alumine augmente aussi. Et comme la quantité de chaleur générée dépend du temps de friction, donc plus que le temps de friction est long plus que la diffusion est important.

2.2. Caractérisation mécanique des joints acier doux/alumine :

2.2.1. L'effet du temps de friction sur la résistance à la flexion :

La figure V.17 montre les variations de la résistance à la flexion et l'épaisseur de la couche résiduelle en fonction du temps de friction.

Il est clair que la résistance des joints acier doux/alumine dépend du temps de friction et de l'épaisseur de la couche résiduelle, puisque elle augmente avec l'augmentation du temps de friction et la diminution de l'épaisseur de la couche résiduelle. Une valeur maximale de 101,23 MPa peut être obtenue avec un temps de friction de 9 s, tandis qu'avec ce temps, l'épaisseur de la couche résiduelle d'aluminium est au minimum (243 μm).

Les variations observées dans la figure V.17 peuvent être liées aux résultats de l'analyse microstructurale. En effet, l'épaisseur de la couche résiduelle dépend du taux de diffusion de l'aluminium dans la ZAT d'alumine, tandis que la résistance dépend de la cohésion de l'interface alumine/aluminium. Et comme le temps de friction a un effet sur la diffusion de l'aluminium et la cohésion de l'interface par emboîtement mécanique), si le temps de friction augmente, la diffusion de l'aluminium est important et par conséquent la diminution de l'épaisseur de la couche résiduelle avec l'augmentation de la résistance des joint à cause de l'emboîtement à l'interface. Tandis que si le temps de friction diminue, la diffusion de l'aluminium est faible, ce qui conduit à une couche résiduelle plus épaisse et un joint moins résistant.

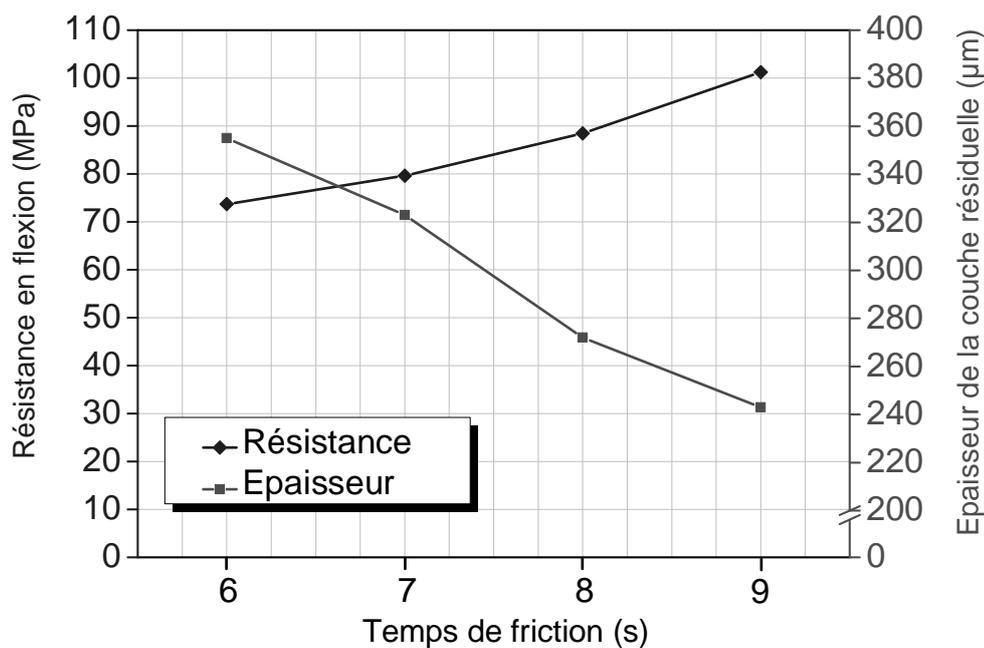


Figure V.17. Variations de la résistance à la flexion et de l'épaisseur de la couche résiduelle d'Al en fonction du temps de friction.

2.2.2. L'effet du temps de friction sur les profils de la microdureté :

Les figures V.18 et V.19 montrent les variations de la microdureté le long des joints acier doux/alumine. Les profils de la microdureté dans la partie d'acier doux (figure V.18) ne montrent aucun changement significatif. La microdureté le long de la tige d'acier reste presque constante, d'une valeur de 220 Hv.

Le long de la couche d'aluminium 1100, les valeurs de la microdureté sont plus faibles que celles de l'acier. La microdureté de la couche d'aluminium ne dépasse pas 60 Hv. Cette valeur augmente légèrement à l'interface acier/aluminium pour atteindre 140 Hv (figure V.18).

A l'autre côté des joints soudés, l'alumine a une dureté très élevée par rapport à celle de l'aluminium (figure V.19). Les valeurs de la microdureté de l'alumine sont dispersées autour d'une ligne moyenne de 1200 Hv. Cette dispersion est due à la porosité élevée de l'alumine.

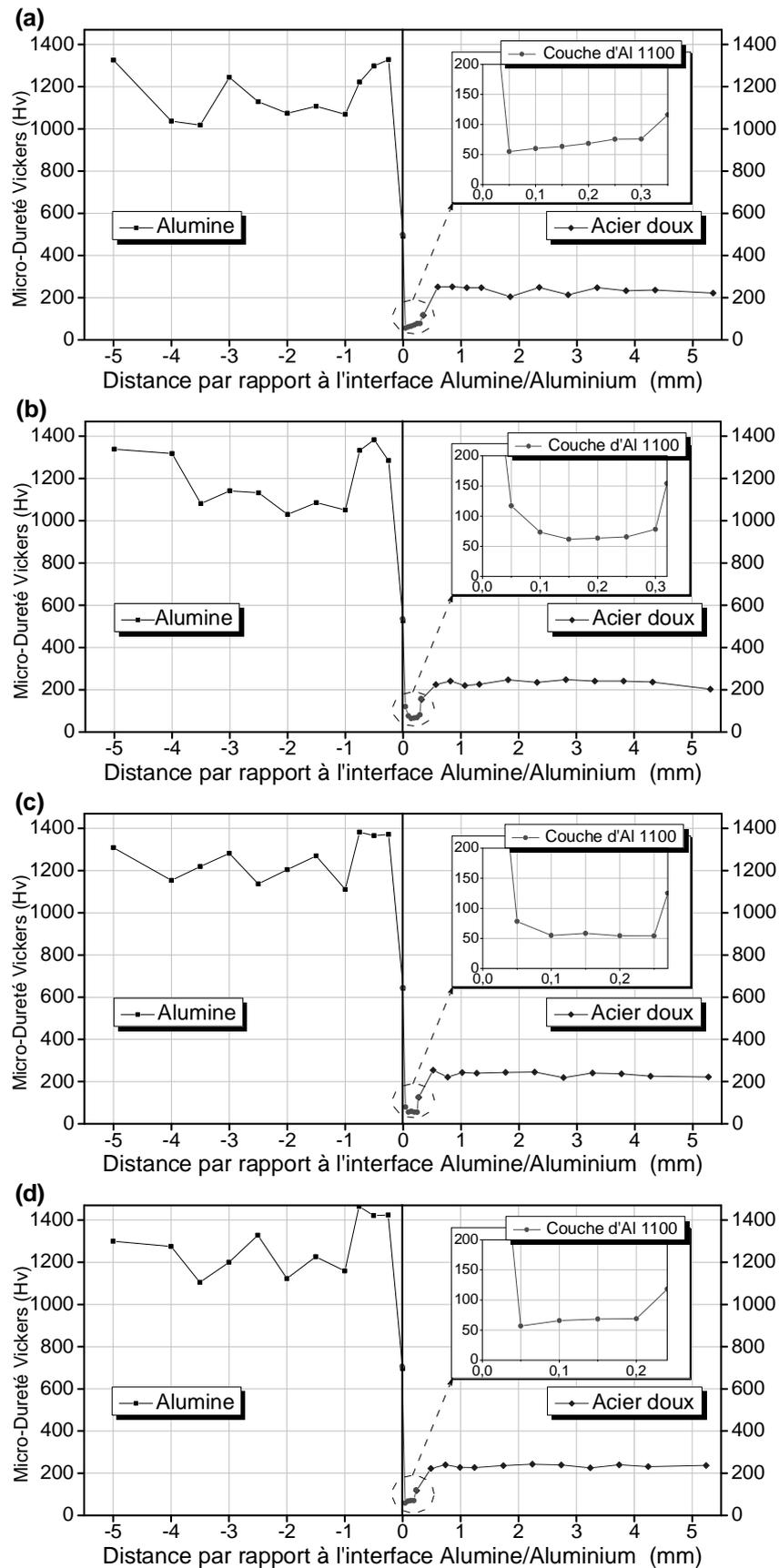


Figure V.18. Variation de la microdureté le long des joints acier doux/alumine : (a) échantillon 1, (b) échantillon 2, (c) échantillon 3 et (d) échantillon 4.

La ZAT de l'alumine est caractérisée par une dureté plus élevée, et qui peut atteindre une valeur maximale de 1420 Hv. A l'interface alumine/aluminium, la microdureté diminue à des valeurs variables d'un échantillon à l'autre. La microdureté à l'interface alumine/aluminium augmente avec l'augmentation du temps de friction. Le durcissement de l'interface est dû au degré élevé de la déformation plastique en raison de la grande quantité de chaleur générée.

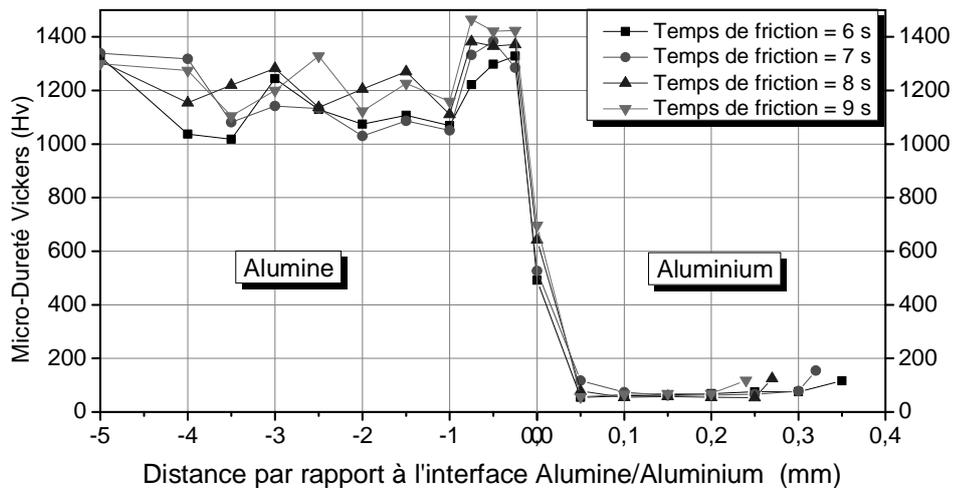


Figure V.19. Variation de la microdureté à l'interface alumine/aluminium des joints acier doux/alumine.

CONCLUSION

GENERALE

Conclusion générale

Le but de ce travail était le soudage par friction d'un acier doux à une céramique (alumine) avec l'insertion d'une couche intermédiaire en aluminium 1100. L'étude réalisée était divisée en deux parties, une partie est consacrée à l'optimisation des paramètres de soudage par friction rotative acier/aluminium 1100, en utilisant la méthode des surfaces de réponses (MSR). L'autre partie est portée sur l'étude de l'effet du temps de friction sur les caractéristiques des joints acier/alumine soudés par friction rotative.

Les principaux résultats de ce travail sont résumés comme suivant :

Dans la première partie :

- Le développement des relations empiriques liants les paramètres de soudage à la résistance à la traction et la dureté des joints acier doux/aluminium 1100. Ces relations peuvent être utilisées à fin de prédire les paramètres optimaux pour obtenir une bonne qualité des joints.
- La résistance à la traction des joints acier doux/aluminium 1100 est plus sensible au paramètre *pression de forgeage/temps* que d'autres paramètres de soudage. Les joints obtenus en appliquant une *pression de forgeage/temps* élevée (49.22 MPa/s) ont une résistance maximale (178.46 MPa).
- Le paramètre *pression de friction/temps* est le paramètre de soudage le plus influant sur la dureté à l'interface des joints acier doux/aluminium 1100. L'application d'une faible *pression de friction/temps* (3.62 MPa/s) produit des joints avec une dureté maximale (350.5 Hv) à l'interface.
- Les observations au MEB de certains joints acier doux/aluminium 1100, ont révélé la formation d'une couche intermétallique de base Fe-Al à l'interface de certains joints. La dégradation de leur résistance est fortement liée à la formation de cette couche.

Dans la deuxième partie :

- Des joints dissimilaires acier doux/alumine peuvent être produits en utilisant le procédé de soudage par friction rotative.

- L'utilisation d'une couche intermédiaire en aluminium 1100 conduit au développement des joints acier doux/alumine solides.
- Les observations microscopiques des joints acier doux/alumine ont révélé une réduction de l'épaisseur de la couche intermédiaire au cours du processus de soudage avec l'apparition des fissures au côté de la céramique.
- L'épaisseur de la couche intermédiaire résiduelle diminue avec l'augmentation du temps de friction.
- La résistance des joints acier doux/alumine dépend du temps de friction et de l'épaisseur de la couche intermédiaire résiduelle. La résistance à la flexion la plus élevée de 101.23 MPa a été obtenue avec un temps de friction de 9 secondes et une épaisseur de la couche résiduelle d'environ 243 μm .

Perspectives

Pour l'avenir, on peut considérer les perspectives suivantes :

- ✓ La contribution à l'étude du comportement thermique des joints acier/alumine soudés par friction, en surveillant la génération de chaleur à l'aide d'une caméra thermique.
- ✓ La diversification des métaux à souder par friction rotative avec l'alumine, par exemple l'aluminium et le cuivre,
- ✓ La diversification des matériaux céramiques, par exemple la zircone, le carbure de silicium et le nitrure de silicium,
- ✓ La diversification des types de la couche intermédiaire, par exemple en nickel,
- ✓ Modélisation du procédé de soudage par friction rotative,
- ✓ La conception et le montage d'une machine de soudage par friction rotative.

ANNEXE

Méthode des surfaces de réponses (MSR)

1. Pan d'expériences

Un plan d'expériences (en anglais, Design of Experiments (DOE)) est une approche statistique permettant d'optimiser un problème à plusieurs paramètres [1]. Il a pour but de minimiser le nombre des essais pour obtenir des résultats fiables qui reflètent la variation réelle du phénomène étudié en fonction de ses diverses caractéristiques. Au début des années 30, la méthode des plans d'expériences est développée et mise en pratique dans les recherches agricoles par le mathématicien **R. A. Fisher** [1].

Après 1945, des statisticiens et des chercheurs en sciences expérimentales comme **E.P. Box**, **G. Taguchi** et autres, enrichissent la méthode des plans d'expériences par le développement des techniques particulières de construction des plans comme la méthode des surfaces de réponses (MSR) (George E. P. Box – 1951) et la méthode Taguchi (G. Taguchi - 1959) [2]. Actuellement, les efforts des statisticiens se poursuivent, avec l'apparition des nouvelles techniques et le développement des logiciels de plus en plus conviviaux destinés à la construction et à l'analyse de plans d'expériences.

2. Méthode des surfaces de réponses

La méthode des surfaces de réponses (MSR) est un ensemble de techniques statistiques et mathématiques utiles au développement, à l'amélioration et à l'optimisation des processus de production. Cette méthode est largement utilisée dans les processus industriels, en particulier dans les cas où plusieurs variables d'entrée influencent potentiellement les mesures de performance ou les caractéristiques de qualité du produit final. Ces mesures de performance ou caractéristiques de qualité sont appelées les **réponses** (y_i), et les variables d'entrée sont appelées les **facteurs** (ξ_i) [3].

Le diagramme représenté en figure A.1 résume de manière plus simple la définition de la méthode des surfaces de réponses.

2.1. Principe de la méthode des surfaces de réponses

Au cours des années 50, les chimistes **George E. P. Box** et **K.B. Wilson** ont développé le concept de surface de réponse en s'appuyant sur les techniques de régression

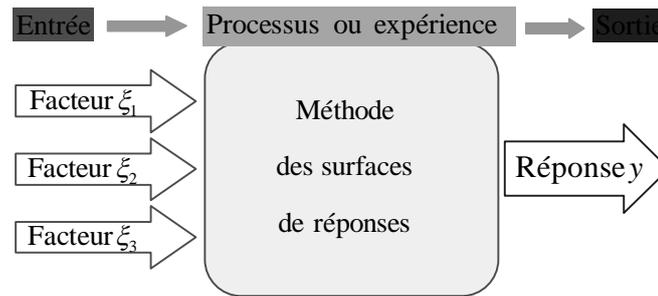


Figure A.1. Diagramme de la méthode des surfaces de réponses.

analytique et la séquence d'expériences. Ils ont suggéré de définir une fonction (un modèle) polynomiale appropriée représentant la relation entre les facteurs ξ_i et la réponse « y » [3].

2.2. Le processus d'optimisation par la méthode des surfaces de réponses

En général, le processus d'optimisation d'une expérience par la méthode MSR se passe par les quatre phases principales :

- Le choix des facteurs influents : Cette étape consiste à déterminer les facteurs qui ont une influence sur la réponse considérée.
- La modélisation : Cette phase mène au développement d'une relation empirique déterminant les variations de la réponse en fonction des facteurs influents.
- L'analyse : Cette étape consiste à analyser les graphes de la réponse, et évaluer l'effet des facteurs choisis sur les variations de la réponse.
- L'optimisation : Dans cette phase, on cherche les conditions expérimentales donnant le meilleur résultat. Cette étape nécessite préalablement une connaissance assez profonde du phénomène étudié.

2.3. Terminologies de la méthode des surfaces de réponses

Facteur continu : est un facteur qui peut être exprimé à l'aide de valeurs numériques, comme la pression, la vitesse, le temps,.. etc [2].

Facteur discret : est un facteur qui ne peut prendre que des valeurs particulières (ne sont pas numériques). Un facteur discret peut représenter par un nom, une lettre ou une propriété [2].

Niveaux du facteur et domaine du facteur : Les variations d'un facteur continu ξ_1 au cours des expériences peuvent être représentées sur un axe gradué et orienté appelé axe du facteur ξ_1 . Chaque valeur donnée à ce facteur pour réaliser une expérience est appelée niveau U . En général, on limite les variations d'un facteur ξ_i entre une borne inférieure (niveau min $U_{\min i}$) et une borne supérieure (niveau max $U_{\max i}$). L'ensemble de toutes les valeurs que peut prendre le facteur ξ_1 entre son niveau bas et son niveau haut, s'appelle le domaine du facteur (figure A.2) [2].

Axe du facteur et espace expérimental : Les variations d'un facteur continu ξ_1 au cours des expériences peuvent être représentées sur un axe gradué et orienté appelé axe du facteur ξ_1 . S'il y a un deuxième facteur ξ_2 , il est représenté, aussi, par son axe gradué et orienté. Ce deuxième axe est disposé orthogonalement au premier, formant un repère cartésien définissant un espace à deux dimensions appelé espace expérimental (figure A.2) [2].

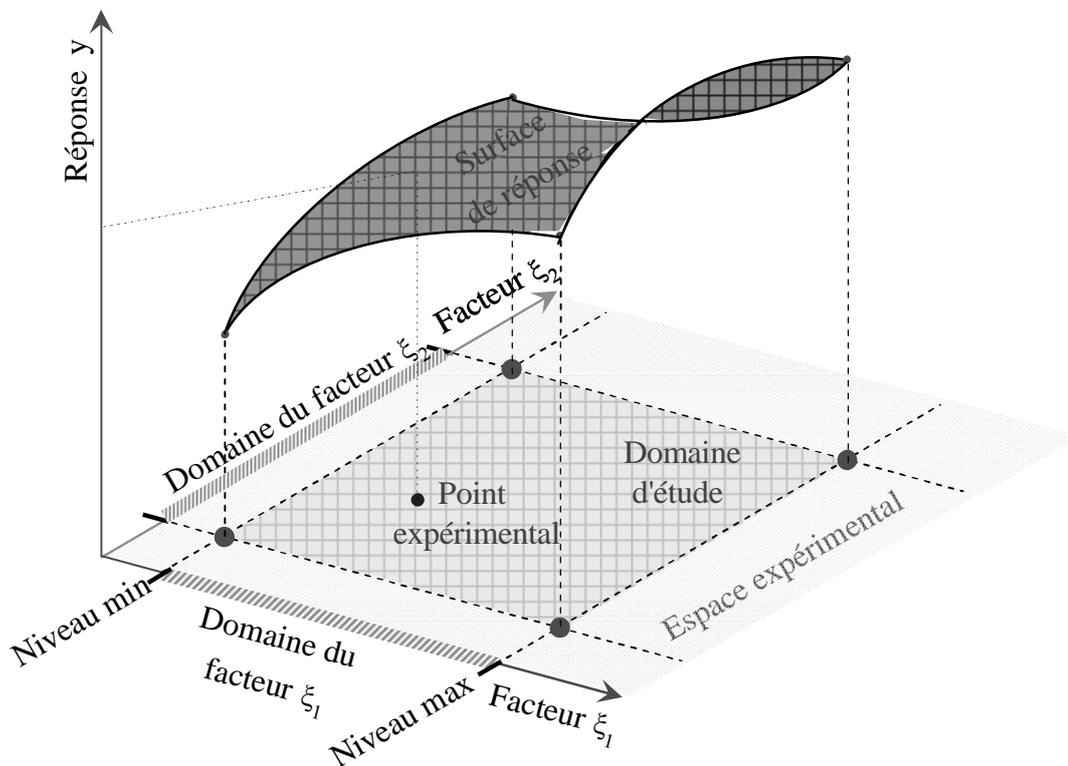


Figure A.2. Représentation géométrique de la surface de réponses [2].

Domaine d'étude et point expérimental : Le regroupement des domaines des facteurs ξ_1 et ξ_2 définit le domaine d'étude (figure A.2). Une étude est l'ensemble de plusieurs expériences bien définies. Chaque expérience est représentée par un point dans l'espace expérimental appelé point expérimental (figure A.2). Les coordonnées de ces points sont les différents niveaux des facteurs ξ_1 et ξ_2 . Chaque point expérimental correspond une réponse « y » [2].

Axe de réponse et surface de réponse : La réponse « y » est représentée sur un axe gradué, orienté et orthogonal à l'espace expérimental. L'ensemble de tous les points expérimentaux correspond à un ensemble de réponses qui se localisent sur une surface appelée surface de réponse (figure A.2). La représentation géométrique de la surface de réponse nécessite un espace tridimensionnel: une dimension de la réponse, deux dimensions de facteurs ξ_1 et ξ_2 . En général, seules quelques réponses sont connues, celles correspondant aux expériences menées. Les autres points de la surface de réponse sont déterminés par interpolation à l'aide d'un modèle mathématique [2].

3. Plan composite centré

Un plan composite centré (en anglais, Central Composite Design CCD) est largement utilisé pour la construction d'un plan d'expérience par la méthode MSR. Dans le cas d'un plan à deux (02) facteurs, un CCD se compose de quatre points factoriels, de quatre points axiaux (à la même distance du centre du domaine d'étude) et de certains points au centre du domaine d'étude (points centraux) [3].

Dans un plan composite centré, chaque facteur ξ_i possèdent cinq (05) niveaux. Les valeurs (U_i) de ces niveaux sont appelées valeurs actuelles du facteur ξ_i . Il est pratique de convertir les valeurs U_i du facteur ξ_i en valeurs codées X_i , qui sont définies à partir de la relation suivante :

$$X_i = 2 \cdot \frac{[2 \cdot U_i - (U_{\max i} + U_{\min i})]}{(U_{\max i} - U_{\min i})} \dots \dots \dots \text{(Eq. 1) [4, 5]}$$

Avec : – X_i : une valeur codée ;

- $U_{\min i}$: niveau min du facteur ξ_i ;
- $U_{\max i}$: niveau max du facteur ξ_i ;
- U_i : Une valeur actuelle du facteur ξ_i .

Comme les valeurs actuelles U_i sont compris entre $U_{\min i}$ et $U_{\max i}$, les cinq (05) valeurs codées X_i sont limitées de -2 à $+2$, avec une valeur centrale 0 . En générale, l'expérimentateur peut être choisir les niveaux $U_{\min i}$ et $U_{\max i}$ de chaque facteur ξ_i , alors que les valeurs actuelles U_i sont définis par le plan d'expérience.

3.1. Construction d'un plan composite centré

La figure A.3 représente un plan composite centré à deux (02) facteurs. En générale, un CCD est construit par la détermination de ses points expérimentaux comme suivant [3] :

Les points factoriels d'un plan composite centré : Dans le cas d'un plan à deux (02) facteurs,

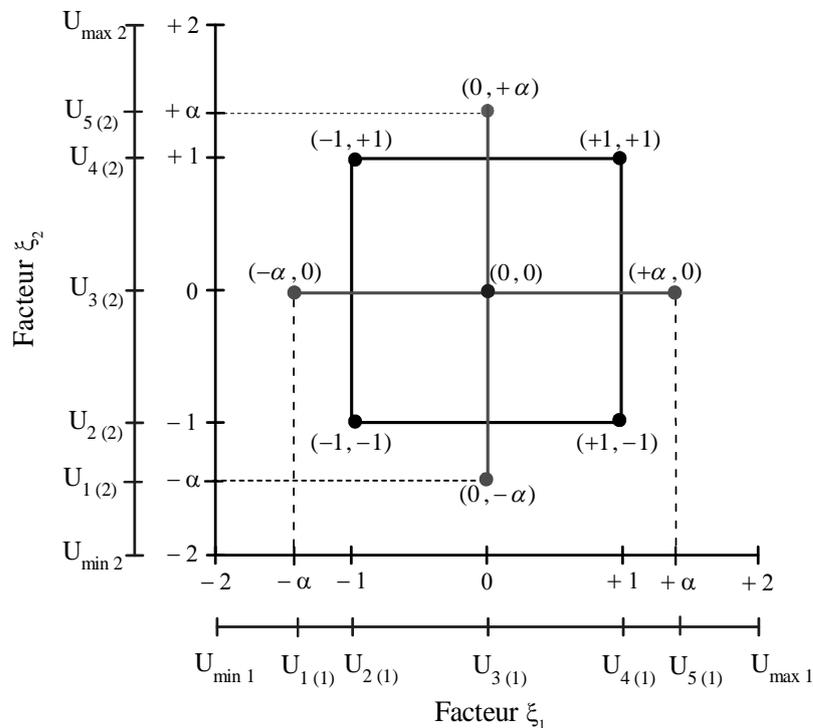


Figure A.3. Plan composite centré à deux (02) facteurs. Les points factoriels sont en noir, les points axiaux sont en rouge et les points centraux sont en bleu [2, 3].

les quatre (04) points factoriels d'un CCD sont des points expérimentaux situés aux sommets d'un carré et possèdent les coordonnées (en valeurs codées) : $(-1, -1)$, $(+1, -1)$, $(-1, +1)$ et $(+1, +1)$.

Les points axiaux d'un plan composite centré : Dans le cas d'un plan à deux (02) facteurs, les points axiaux d'un CCD sont des points expérimentaux situés sur les axes. En valeurs codées, ces points possèdent une coordonnée nulle (0) et une coordonnée égale à $\pm\alpha$. Les points axiaux sont : $(-\alpha, 0)$, $(+\alpha, 0)$, $(0, -\alpha)$ et $(0, +\alpha)$. En générale, l'expérimentateur peut choisir la valeur par défaut de la distance α , qui égale à $\sqrt[4]{N_{Fact}}$ (N_{Fact} est le nombre des points factoriels), ou utiliser une autre valeur comprise entre 1 et 2.

Les points centraux d'un plan composite centré : Les points centraux, comme l'indique le nom, sont des points dont tous les niveaux sont définis sur la valeur codée centrale 0 (le point milieu du domaine d'étude). Les points centraux sont généralement répétés plusieurs fois pour obtenir une bonne estimation de l'erreur expérimentale.

3.2. Plans composite centré de petite taille

La taille d'un plan composite centré à n facteurs ($2 \leq n$) ou le nombre des expériences à réaliser est donnée par la formule :

$$N_{Exp} = N_{Fact} + N_{Axi} + N_{Cent} \dots \dots \dots \text{(Eq. 2)}$$

- Avec :
- N_{Exp} : le nombre des expériences à réaliser ;
 - N_{Fact} : le nombre des points factoriels du CCD, qui égale à : $N_{Fact} = 2^n$;
 - N_{Axi} : le nombre des points axiaux du CCD, qui égale à : $N_{Axi} = 2 \times n$;
 - N_{Cent} : le nombre des points centraux du CCD

Afin de réduire le nombre des expériences à réaliser, Hartley [1959] a proposé un plan composite centré de petite taille avec moins de points factoriels qu'un CCD complet. Le

tableau A.1 présente les tailles de quelques CCD de petite taille en comparaison avec des CCD complets.

Tableau A.1. Taille de quelques plans composites centrés.

Nombre des facteurs (n)	Plan CCD complet			Plan CCD de petite taille		
	N_{Fact}	N_{Axi}	N_{Cent}	N_{Fact}	N_{Axi}	N_{Cent}
02 facteurs	4	4	5	/	/	/
03 facteurs	8	6	6	4	6	5
04 facteurs	16	8	6	8	8	5
05 facteurs	32	10	8	11	10	5
06 facteurs	64	12	10	16	12	5
07 facteurs	128	14	10	22	14	5

4. Modélisation par la méthode des surfaces de réponses

En l'absence de toute information sur la fonction qui lie la réponse « y » aux facteurs ξ_i , on se donne une loi d'évolution dont la formulation la plus générale est la suivante :

$$y = f(\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_n) + \varepsilon \dots \dots \dots \text{(Eq. 3)}$$

Le terme ε est une erreur statistique aléatoire représentant d'autres sources de variabilité non prises en compte dans la fonction f (erreur de mesure sur la réponse « y », ou l'effet d'autres variables inconnues). Comme la forme de la fonction f est inconnue, un modèle (un polynôme) de premier degré ou de second degré est utilisé pour approcher la forme de f [2].

En général, le modèle de premier degré est de la forme :

$$y_{\text{mod}} = a_0 + a_1\xi_1 + a_2\xi_2 + \dots + a_n\xi_n + \varepsilon \dots \dots \dots \text{(Eq. 4) [3]}$$

et la forme du modèle de second degré est :

$$y_{\text{mod}} = a_0 + \sum_{i=1}^n a_i \xi_i + \sum_{i=1}^n a_{ii} \xi_i^2 + \sum_{i < j=2}^n \sum_{j=2}^n a_{ij} \xi_i \xi_j + \varepsilon \dots \dots \dots (\text{Eq. 5}) [3]$$

- Où :
- y_{mod} : la valeur de réponse calculée à partir du modèle ;
 - n : Le nombre des facteurs (variables) ;
 - a_0 : La valeur moyenne ;
 - a_i , a_{ii} et a_{ij} : Les coefficients du modèle mathématique (régressions). Ils ne sont pas connus et doivent être calculés à partir des résultats des expériences.

Le développement d'une relation empirique entre les facteurs ξ_i et la réponse y consiste à déterminer les coefficients du modèle mathématique [2].

5. Analyse des données

Pour analyser les données d'un plan expérimental, nous utilisons une technique statistique appelée ANOVA (en anglais, ANalysis Of Variance). Cette technique a été développée par le mathématicien **R. A. Fisher**, et se base sur la recherche des sources de variation des données expérimentales (réponses) [6].

Terminologies de l'ANOVA

Valeur-P (en anglais, **P-value** ou **Prob>F**) : c'est la probabilité du modèle développé par le plan d'expérience d'obtenir la même valeur de l'expérience.

Niveau de signification du modèle : généralement défini sur 5 % (ou 0,05) [4].

Test de signification du modèle ($P \leq 0,5$) : Si la valeur-p est inférieure ou égale au niveau de signification, le modèle est considéré comme statistiquement significatif [7].

Valeur-F (en anglais, **F-value**) : Le nombre F de Fisher est permis de déterminer l'ordre de contribution de chaque facteur ξ_i sur la réponse « y ». La valeur-F plus élevée implique que le facteur respectif a plus d'influence sur la réponse « y » [8].

6. Logiciels de plans d'expériences

La construction d'un plan d'expériences nécessite l'usage d'un logiciel qui effectue non seulement le calcul des coefficients du modèle, mais aussi tous les calculs statistiques permettant d'évaluer la qualité du modèle mathématique (ANOVA). Ce logiciel est aussi programmé pour calculer les réponses dans tout le domaine d'étude, pour tracer les surfaces de réponses et pour déterminer les zones d'intérêt. Cet ensemble de possibilités permet d'extraire rapidement toutes les informations présentées dans les résultats d'un plan d'expériences [2]. Les principaux logiciels de plans d'expériences sont :

- JMP
- Design-Expert
- AZURAD
- MINITAB
- STATISTICA
- Excel

7. Références bibliographiques

1. Lauro, C. H., Pereira, R. B. D., Brandao, L.C., Davim, J.P., *Design of experiments– statistical and artificial intelligence analysis for the improvement of machining processes: A review*, in *Design of Experiments in Production Engineering*, Springer, Cham, 2016 : p. 89.
2. Goupy, J., Creighton, L., *Introduction aux plans d'expériences*, Dunod, Paris, 2006. p. 9.
3. Myers, R. H., Montgomery, D. C., Anderson-Cook, C. M., *Response Surface Methodology – Process and Product Optimization using Designed Experiment*, 4th ed. John Wiley & Sons, New Jersey, 2016: p.6.
4. Paventhan, R., Lakshminarayanan, R., Balasubramanian, V., *Prediction and Optimization of Friction Welding Parameters for Joining Aluminum Alloy and Stainless Steel. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2011. 21: p. 1480-1485.*
5. Dinaharan, I., Murugan, N., Thangarasu, A., *Development of Empirical Relationships for Prediction of Mechanical and Wear Properties of AA6082 Aluminum Matrix Composites Produced using Friction Stir Processing. Engineering Science and Technology, an International Journal, 2016. 19 : p. 1132-1144.*
6. Benoist, D., Tourbier, Y., Germain-Tourbier, S, *Plans d'expériences : construction et analyse* , Technique & documentation – Lavoisier, Paris, 1994: p.112.
7. Rajakumar, S., Balasubramanian, V., *Microstructure and Mechanical Properties of Electrical Resistance Spot Welded Interstitial Free Steel Joints. Journal of Advanced Microscopy Research, 2015. 10 : p. 146-154.*
8. Lakshminarayanan, A. K., Balasubramanian, V., *Comparison of RSM with ANN in Predicting Tensile Strength of Friction Stir Welded AA7039 Aluminum Alloy Joints. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2009. 19 : p. 9-18.*

Résumé :

Le but de ce travail est d'obtenir des joints dissimilaires acier/céramique en utilisant le soudage par friction rotative. Dans cette étude, le soudage par friction des tiges en acier doux avec des tiges en alumine (Al_2O_3) a été réalisé en utilisant un alliage d'aluminium 1100 comme une couche intermédiaire d'épaisseur de 3 mm. Le processus de soudage a été effectué en deux phases. Tout d'abord, les tiges d'acier et les tiges d'aluminium ont été soudées par friction, et les joints résultants ont été usinés pour former la couche intermédiaire. Ensuite, ces joints ont été soudés par friction aux tiges d'alumine. Dans la première phase, les paramètres de soudage par friction acier doux/aluminium 1100 ont été optimisés à l'aide de la méthode des surfaces de réponse (MSR) pour atteindre une résistance maximale des joints. Selon cette approche, des joints acier doux/aluminium AA1100 et acier doux / alumine ont été développés avec succès par un procédé de soudage par friction rotative et ont été évalués par des essais mécaniques, tel que l'essai de traction, l'essai de flexion à trois points et les mesures de microdureté Vickers. La microstructure des joints résultants a été observée par microscopie optique (MO) et microscopie électronique à balayage (MEB), en particulier à la zone d'interface. Les joints ont également été examinés par spectroscopie par dispersion d'énergie (EDS). Sur la base des résultats du MSR, une relation empirique a été établie pour prédire les propriétés mécaniques des joints acier doux/aluminium 1100 soudés par friction. Les résultats expérimentaux ont montré que la résistance et la microstructure des joints acier doux/aluminium 1100 et acier doux/alumine dépendent largement des paramètres du procédé de soudage par friction.

Mots clés : Soudage par friction rotative, acier doux, alumine, alliage d'aluminium 1100, Optimisation, méthodologie des surfaces de réponses, propriétés mécaniques.

Abstract :

The goal of this work is to obtain steel/ceramic dissimilar joints by rotary friction welding process. In this study, friction welding of mild steel rods with alumina (Al_2O_3) rods was conducted using AA1100 aluminum alloy as interlayer of 3 mm thickness. The welding process was performed in two stages. First, the steel rods and aluminum rods were friction welded, and the resulting joints were machined to form the interlayer. Then, those joints were welded to the alumina rods in a second friction welding process. In the first stage, the parameters of friction welding mild steel/aluminum AA1100 have been optimized using Response Surface Methodology (RSM) to attain the maximum strength of the joints. According to this approach, a mild steel/aluminum AA1100 and mild steel/alumina joints were successfully developed by rotary friction welding process, and were evaluated by mechanical tests, such as tensile test, three-point bending test and Vickers microhardness measurements. The microstructure of the resulting joints was observed by optical microscopy (OM) and scanning electron microscopy (SEM), particularly at the interface area. The joints were also examined by energy dispersive spectroscopy (EDS). Based on RSM results, an empirical relationship was established to predict the mechanical properties of friction welded mild steel/aluminum AA1100 joints. The experimental results showed that the strength and microstructure of mild steel/aluminum AA1100 and mild steel/alumina joints are much dependent on the parameters of the friction welding process.

Keywords: Rotary friction welding, mild steel, alumina, aluminum alloy AA1100, optimization, Response Surface methodology, mechanical properties.

ملخص:

الهدف من هذا العمل هو الحصول على وصلات غير متجانسة فولاذ/سيراميك باستخدام تقنية اللحام الاحتكاكي الدوراني. في هذه الدراسة، أُجري لحام احتكاكي لقضبان فولاذ طري مع قضبان ألومينا (Al_2O_3) باستخدام سبيكة ألومنيوم 1100 كطبقة بينية بسُمك 3 مم. تمت عملية اللحام على مرحلتين. أولاً، لحام احتكاكي لقضبان الفولاذ وقضبان الألومنيوم، ثم تقطيع الوصلات الناتجة من أجل تشكيل الطبقة البينية. بعد ذلك، تلحيم الجزء المتبقي بقضبان الألومينا خلال عملية لحام احتكاكي ثانية. في المرحلة الأولى، تم إستمثال معايير اللحام الاحتكاكي فولاذ طري/ألومنيوم 1100 باستخدام منهجية سطح الاستجابة (م.س.إ) للوصول إلى أقصى قوة للوصلات. وفق هذه المقاربة، تم تطوير كل من الوصلات فولاذ طري/ألومنيوم 1100 وفولاذ طري/ألومينا بنجاح من خلال عملية لحام احتكاكي دوراني، وتم تقييمها عن طريق الاختبارات الميكانيكية، مثل اختبار الشد، اختبار الثني ثلاثي النقاط، وقياسات الصلادة المجهرية فيكرز. لوحظت البنية المجهرية للوصلات الناتجة عن طريق الفحص بالمجهر الضوئي والمجهر الإلكتروني الماسح، خاصة عند واجهة الوصلات. تم فحص المفاصل أيضاً باستخدام مطيافية تشتت الأشعة السينية. بناءً على نتائج م.س.إ، تم تأسيس علاقة تجريبية للتنبؤ بالخواص الميكانيكية لوصلات الفولاذ الطري/الألمنيوم 1100. وأظهر التقييم التجريبي بأن القوة والبنية المجهرية لوصلات الفولاذ الطري/الألمنيوم 1100 ووصلات الفولاذ الطري/ألومينا تعتمد إلى حد كبير على معايير عملية اللحام الاحتكاكي.

كلمات مفتاحية : اللحام الاحتكاكي الدوراني، الفولاذ الطري، الألومينا، سبائك الألومنيوم 1100، إستمثال، منهجية سطح الاستجابة، الخواص الميكانيكية.