

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE



UNIVERSITE SAAD DAHLAB DE BLIDA 1
FACULTE DE TECHNOLOGIE
DEPARTEMENT DE MECANIQUE

Laboratoire de Traitement de Surface & Matériaux

Projet de Fin d'Etudes
Pour l'obtention du diplôme de Master en
Ingénierie de Matériaux de Surface
Génie mécanique

Titre :

L'assemblage dissemblable de l'aluminium et l'acier par soudage
par résistance par points

Proposé et encadré par :
Pr. Bacha Nacer- Eddine

Réalisé par :
Messelmi Imen
Semaoune Fatma Zohra

Année universitaire 2018/2019

Dédicaces

Je rend grâce tout d'abord à notre Dieu pour la santé et le courage qu'il m'a donnés pour terminer ce modeste travail. Je dédie ce travail :

A mes très chers parents symbole de
tendresse, d'amour et de patience pour
leurs sacrifices inestimables.

A mes sœurs.

A mon frère

A toute la famille.

A toutes mes amies et mes meilleurs amis (Meriem ,Ibtessame,Fairouz
,Samira ,Fadia, dalila).

A toute ma promotion de master 2

«juin 2019»

a tous ce que J'aime.

Imene.

Dédicaces

Je dédie ce mémoire À:
Mes très chers parents qui ont toujours été là pour moi,
et qui m'ont donné un
Magnifique modèle de labeur et de persévérance. J'espère
qu'ils trouveront dans ce Travail
toute ma reconnaissance et tout mon amour.

A mes frère

A mes sœurs

A Tous La Famille

À tous mes collègues du Département de Génie
Mécanique.

FATMA ZOHRA.

Remerciements

Nous remercions tout puissant <ALLAH> de nous avoir permis et aider accomplir ce travail en nous assurant l'attente de notre objectif et arriver à notre but.

Nous de ce mémoire , Monsieur BACHA NACER-EDDINE , notre promoteur pour ses conseils , son assistance , son suivi et son soutien pour mener à tenir nos différents travaux de notre mémoire de fin d'étude.

Nous témoignons de notre gratitude à l'ensemble des enseignants de Laboratoire De Traitement De Surface Et Matériaux Mlle .TAHAR CHAOUCH KARIMA et Monsieur Djeghjough MOHAMED.

Tous nos remerciements vont à messieurs les membres du jury qui nous ont honorés par leur présence et leur sens du savoir.

Messelmi imene/ semaoune fatma zohra

RESUME

La nécessité de réduction de la consommation énergétique dans les transports impose aux constructeurs la recherche de nouveaux modes de conception pour alléger les véhicules. Parmi les solutions envisagées, le concept de multi matériau, qui consiste à remplacer certains éléments de structure traditionnellement en acier par des alliages légers, d'aluminium ou de magnésium, est souvent avancé, notamment dans le domaine automobile. La réalisation de structures multi matériaux nécessite toutefois de revoir les techniques d'assemblage, en particulier par soudage, où des problèmes spécifiques sont rencontrés lors de l'assemblage de matériaux de nature différente. Parmi les couples de matériaux envisagés, les structures acier-aluminium sont les plus étudiées. Cependant, l'assemblage acier-aluminium par les procédés de soudage impliquant la fusion n'est pas maîtrisé actuellement, du fait des grandes différences de propriétés physiques (température de fusion, coefficient de dilatation thermique ...) entre les deux matériaux, mais surtout à cause de la solubilité quasi-nulle du fer dans l'aluminium, qui conduit à la formation de composés intermétalliques très fragiles.

Notre approche était de prospector plusieurs solutions qui pourraient influence la résistance de contact à l'interface acier/aluminium tout en essayant de minimiser ou au moins éviter la formation d'intermétalliques fragiles. Nous avons testé des revêtements de différentes compositions en faisant varier leur épaisseur par déposition par projection thermique. Nous avons aussi testé des revêtements de zinc produits en laboratoire et de façon industrielle. Enfin, nous avons interposé un troisième matériau comme l'aluminium ou l'étain pour vérifier la formation d'un noyau de soudage homogène.

Les résultats ont montré que est pour le couple acier/aluminium avec un revêtement interposé, l'épaisseur du revêtement important dans la formation du noyau. En général, plus l'épaisseur est importante plus le soudage par point devient difficile. Il est carrément impossible avec une poudre à faible conductivité thermique comme la céramique.

La présence de zinc déposé électrolytiquement sur une très faible épaisseur suffit à modifier les surfaces de contact électrode-tôle et tôle-tôle. Ces surfaces de contact jouent un rôle prépondérant sur la cinétique du développement du noyau .

L'épaisseur du poudre ou feuille sont à contrôler et semble un paramètre important dans la formation du noyau.

L'interposition d'une feuille d'aluminium n'a pas apporté des résultats significatifs pour ce que cette solution soit retenue.

ABSTRACT

The need to reduce energy consumption in transport requires manufacturers to look for new design methods to lighten vehicles. Among the solutions envisaged, the concept of multi-material, which consists of replacing certain elements of structure traditionally made of steel with light alloys of aluminum or magnesium, is often advanced, particularly in the automotive field. The realization of multi-material structures requires, however, to review the assembly techniques, in particular by welding, where specific problems are encountered when assembling materials of different types. Among the couples of materials envisaged, steel-aluminum structures are the most studied. However, the steel-aluminum assembly by welding processes involving melting is not currently controlled because of the large differences in physical properties (melting temperature, coefficient of thermal expansion, etc.) between the two materials, but above all at because of the virtually zero solubility of iron in aluminum, which leads to the formation of very fragile intermetallic compounds.

Our approach was to prospect several solutions that could influence the contact resistance at the steel / aluminum interface while trying to minimize or at least avoid the formation of brittle intermetallics. We tested coatings of different compositions by varying their thickness by thermal spray deposition. We also tested zinc coatings produced in the laboratory and industrially. Finally, we have interposed a third material such as aluminum or tin to verify the formation of a homogeneous welding core.

The results showed that for the steel / aluminum pair with an interposed coating, the thickness of the coating important in the formation of the core. In general, the greater the thickness, the more difficult the spot welding becomes. It is absolutely impossible with a low thermal conductivity powder like ceramics.

The presence of electrolytically deposited zinc on a very small thickness is sufficient to modify the contact surfaces electrode-sheet and sheet-metal. These contact surfaces play a major role in the kinetics of the welded spot.

The thickness of the zinc is to be controlled and seems an important parameter in the formation of the nucleus.

The interposition of an aluminum foil did not bring significant results for this solution to be retained.

LISTE DES FIGURES

Chapitre I :

Figure I-1: soudage par bossage[41].....	5
Figure I- 2 : Soudage à la molette[41].....	6
Figure I-3 : soudage en bout [41].....	6
Figure I- 4 : Principe du soudage par point.[18].....	8
Figure I- 5: Exemples d'applications du soudage par point[16]	9

Chapitre II :

Figure II- 1 : Schéma des soudures par résistance à la résistance dissemblable sur la macrostructure entre l'aluminium et l'acier, avec les détails de l'interface et zone de réaction.....	12
---	----

Chapitre III :

Figure III 1 : les torches de projection thermique.....	20
Figure III 2 : la guillotine.....	21
Figure III 3: La grenailleuse	22
Figure III 4: Galvanisation des éprouvettes d'acier au labo LTSM.....	22
Figure III 5 : le four de fusion	23
Figure III 6:Machine de soudage par résistance par point	24
Figure 7 : la polisseuse Metasinex.....	25
Figure III 8: attaque chimique au Nital.....	25
Figure III 9 : Microscope optique.	26

Chapitre IV :

Figure IV 1: soudage acier /acier / poudre de CuSn	29
Figure IV 2: soudage acier /acier / poudre NiAlMo	29
Figure IV 3 : soudage acier /acier / poudre NiCrAlSi.....	30
Figure IV 4 : Zone fondue du soudage par point de acier/acier /CuSn interposé (100 X).	30
Figure IV 5 : Zones fondues de acier/acier/poudre à base de Ni.....	31

Figure IV 6 :soudage Aluminium/Aluminium.....	32
Figure IV 7 : soudage acier /aluminium.....	33
Figure 8: soudage acier /aluminium par poudre de NiCrAlSi.....	34
Figure 9 : soudage acier /aluminium par poudre NiAlMo.....	34
Figure IV 10 : soudage acier /aluminium par poudre de Tungtec.....	35
Figure IV 11 : Soudage acier / aluminium / revêtement MetaCeram interposé.....	35
Figure IV 12 : soudage acier /aluminium par revêtement [NiAlMo].....	37
Figure IV 13 : soudage acier /aluminium par revêtement [NiCrSiAl].....	37
Figure IV 14: Circuit électrique série représentatif de l'assemblage électrodes et tôles [19].....	38
Figure IV 15: Courbe type de résistance électrique dynamique globale d'un acier non revêtu.....	39
Figure IV 16: Courbe type de la résistance électrique dynamique globale d'un acier revêtu de zinc. [40].....	39
Figure IV 17 : Soudage acier/aluminium/revêtement de zinc [100 X].....	40
Figure IV 18 : Soudage par point acier galvanisée industriellement/aluminium (200 X).....	41
Figure IV 19 : Soudage par point acier/feuille d'aluminium/aluminium.....	42
Figure IV 20: Soudage par point acier /feuille d'aluminium/aluminium (200 X).....	43
Figure IV 21: Soudage par point acier galvanisé/feuille d'aluminium/aluminium.....	43
Figure IV 22: Coupe transversale d'un soudage par point d'un acier galvanisé/feuille d'aluminium/aluminium (200 µm).....	44

LISTE DES TABLEAUX

Chapitre III

Tableau III 1 : propriété physique des matériaux utilisée	19
Tableau III 2 :paramètres de la machine	23

NOTATION UTILISEE

W : Effet de joule (joule)

R : Résistance (Ω)

I : Intensité (ampère)

t : Temps de soudage –cycle- (seconde)

ρ : Résistivité

L : Longueur de matériau

S : Section de matériau

T : Température

RDYNG : Résistance Electrique Dynamique Globale.

l : Longueur du tube de courant.

LISTE DES ABREVIATIONS

MML :multi matériaux legers.

IMC :composites intermétalliques

MFDC :courant continue moyenne fréquence

AC :courant alternatif

ts: temps de soudage

RSW : Soudage par résistance par point

FSSW :soudage par point par friction-malaxage

SDM : laboratoire science des matériaux

LTSM : Laboratoire de Traitement de Surface & Matériaux

Sommaire

INTRODUCTION.....	2
Chapitre I :.....	4
Généralités Sur Soudage Par Résistance Par Point	4
I- le soudage par résistance	5
I-1 Introduction.....	5
I-2 Procédé de soudage par résistance	5
I-2-2 Le soudage à la molette	5
I -2-3- Soudage en bout.....	6
I-2-4- Le Soudage par point	7
CHAPITRE II.....	10
Etat De L'art Du Soudage Par Point De Al/Acier	10
II- Etat De L'art Du Soudage Par Point D'Al/Acier	11
II-1 Introduction	11
II-2 Différents types de soudage de l'aluminium	11
II-2.1 Défis métallurgiques en Al / acier soudage par points par résistance	11
II-2.2 Approches pour améliorer les propriétés des joints Contrôler l'apport de chaleur de soudage:.....	14
II-2.3 Plaque de recouvrement: un moyen de contrôler la température d'interface L / S :.....	14
II-2.4 Revêtement de zinc: améliorer le mouillage par action fluide :.....	15
II-2.5 Le silicium: élément miracle pour le soudage Al / acier	16
II-2.6 Perspectives de recherche	17
Chapitre III.....	18
Méthodologie Expérimentale.....	18
III- Partie expérimentale	19
III- 1 Introduction	19
III-2 -1 Matériaux utilisés.....	19
III -2-2 Préparation de l'échantillon	20
III -2-3 La machine de soudage	23
III -3 Polissage des échantillons	24
III -3-1 Attaque chimique.....	25

III -4 Observation microscopique :	25
Chapitre IV	27
Partie résultats et discussion	27
IV- résultats et discussion	28
IV-1 Introduction	28
IV-2 Approche utilisée	28
IV-3 Soudage de matériaux identiques avec 3eme corps interposé	28
IV -3-1 Soudage acier / acier par poudre interposée	28
IV-4 Soudage de matériaux dissemblables avec 3eme corps interposé	31
IV-4-1 Soudage acier /aluminium	32
IV-4-2-Soudage acier/aluminium par poudre interposé :	32
IV-5 Soudage acier galvanisée /aluminium	39
IV-6 Soudage acier galvanisée industriellement /aluminium	41
IV-7 Soudage acier aluminisé/aluminium	42
IV-8 Soudage acier galvanisé/feuille d'aluminium/aluminium	43
IV-9 Conclusion générale	46

INTRODUCTION

L'assemblage dissemblable de l'aluminium et de l'acier, en particulier en utilisant le soudage par résistance en tant que procédé dans la fabrication de véhicules, constitue un défi majeur pour la stratégie de conception légère multi-matériaux. Le contrôle de la formation et de la croissance du composé intermétallique Al_5Fe_2 est l'enjeu majeur en ce qui concerne la production de soudures par points à résistance élevée, résistantes à la collision, Al / acier. Cette évaluation critique met en lumière la sous-estimation actuelle concernant les facteurs affectant les propriétés d'assemblage et les approches permettant de contrôler la réaction interfaciale. Enfin, les défis scientifiques non résolus sont discutés dans le but de faire la lumière sur la voie à suivre pour produire une liaison métallurgique fiable entre l'aluminium et les aciers pour l'application automobile. [1]

Étant donné que l'assemblage est une technologie de fabrication essentielle, la jonction dissemblable d'aciers et d'alliages de faible densité (c'est-à-dire les alliages Al et Mg) est un domaine de recherche important [2, 3–6]. Les alliages d'aluminium étant actuellement les matériaux légers les plus prometteurs, la combinaison dissemblable de l'aluminium et de l'acier constitue la combinaison de matériaux clé dans le contexte de la conception MML (multi-materials lightweight ou multi matériaux légers).

Les principaux défis métallurgiques du soudage, de matériaux dissemblables comme l'aluminium et de l'acier, comprennent les différences de propriétés thermiques (par exemple, le point de fusion, le coefficient de dilatation thermique, la conductivité thermique, la résistance électrique), la formation d'oxyde d'aluminium et de composés intermétalliques (IMC) à l'interface Fe/Al [7–10]. En raison de la solubilité mutuelle limitée de Fe et d'Al, la formation de composés intermétalliques à l'interface du joint est inévitable. La formation de l'IMC est essentielle pour établir une liaison métallurgique à l'échelle atomique forte à l'interface Al / Fe. Cependant, la fragilité des IMC, conjuguée à la présence de contraintes internes créées pendant le processus de jonction thermique en raison de grandes différences entre leurs propriétés thermiques, rend le joint dissemblable Al / acier très sensible aux fissures et aux ruptures en service [8, 9]. Il est intéressant de noter que les IMC riches en Al, Al_5Fe_2 et $Al_{13}Fe_4$, qui ont une structure cristalline à faible symétrie [16], sont plus fragiles que ceux riches en Fe (par exemple, Fe_3Al). De plus, la diffusivité de Al dans le Fe est beaucoup plus élevée que l'inverse [8]; la formation de IMC riches en Al à l'interface Al / acier est favorisée par rapport aux riches en Fe. Les recherches expérimentales ont montré que la phase η (Al_5Fe_2), qui est une phase IMC orthorhombique riche en Al avec une dureté très élevée (environ 1000-1150 HV [8, 9, 11, 12]) et une faible ténacité à la rupture (environ 2 –5 MPa [13, 14]) est l'élément prédominant dans les joints dissemblables Al / acier.

Par conséquent, le contrôle de l'épaisseur de la couche IMC est la clé du succès pour produire des joints fiables, en particulier dans les composants résistant aux chocs. L'objectif de notre travail, est d'essayer, par les moyens dont nous disposons, d'assembler des plaques en

aluminium et des plaques en acier au carbone par soudage par point. Nous ferons le point sur les difficultés rencontrées, l'issue des solutions proposées et les perspectives futures sur lesquelles il faudra approfondir.

Notre travail sera divisé en plusieurs chapitres:

Le premier chapitre est consacré à la présentation des procédés de soudage par résistance et spécialement soudage par point.

Le deuxième chapitre introduit les notions générales relatives au soudage par point de l'aluminium et l'acier .

Par la suite, Le troisième chapitre présente une synthèse bibliographique sur le soudage par point utilisé dans notre partie expérimental.

Enfin, le chapitre 4 est consacré à la présentation des résultats obtenus. Une discussion sur les effets des paramètres de soudage par points étudiés est menée afin de comprendre globalement la tenue mécanique des assemblages soudés par points pour l'acier/aluminium. Le mémoire est finalisé par une conclusion générale et des perspectives.

Chapitre I :
Généralités Sur Soudage Par Résistance
Par Point

I- le soudage par résistance

I-1 Introduction

Le soudage par résistance est un procédé simple et rapide, qui produit la chaleur grâce à la résistance électrique à l'interface en appliquant un effort de serrage, et une forte intensité électrique. C'est un procédé de soudage sans atmosphère protectrice. Les pièces à souder sont superposées et sont serrées localement entre deux électrodes en alliage de cuivre l'ensemble, pièces électrodes, est traversé par un courant de soudage, sous une faible tension, qui provoque une forte élévation de la température par effet de joule. Dans le cas de surfaces planes, un noyau de matière en fusion est créé à la jointure des pièces. [16]

I-2 Procédé de soudage par résistance

Il existe de nombreux procédés de soudage par résistance sont les suivants :

I-2-1 Le soudage par bossage

Le procédé de soudage par bossage est une méthode d'assemblage directement dérivée du procédé classique de soudage par résistance par points. Dans le cas du soudage par bossage, l'effort de compression et l'endroit du passage du courant sont localisés à un ou des points déterminés par des bossages préexistants sur une des deux pièces à assembler. En effet, les bossages, grâce à leur effet de concentration délimitent parfaitement la surface de passage du courant de soudage. Ils assurent une bonne régularité des conditions de contact des pièces et favorisent ainsi la régularité de la quantité d'énergie dégagée à l'endroit du joint à réaliser. [17]

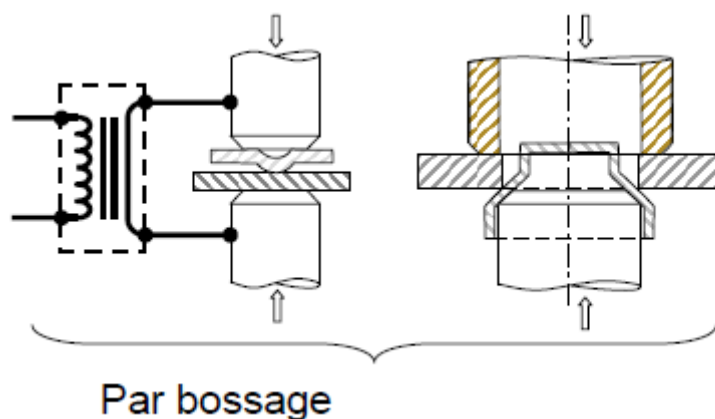


Figure I-1: soudage par bossage[41]

I-2-2 Le soudage à la molette

Dans le cas du soudage à la molette, les électrodes sont constituées par deux disques mobiles (galets) permettant le déplacement des pièces pendant le soudage. Les points soudés sont réalisés sans relâcher la pression de serrage. Chaque point résulte d'une impulsion de courant qui a lieu pendant la rotation des galets, c'est-à-dire, pendant l'avance des pièces à souder. Si

les points sont jointifs ou se recouvrent, l'assemblage est étanche. Si les points sont espacés, on réalise simplement une jonction mécanique par un cordon de soudage discontinu.[17]

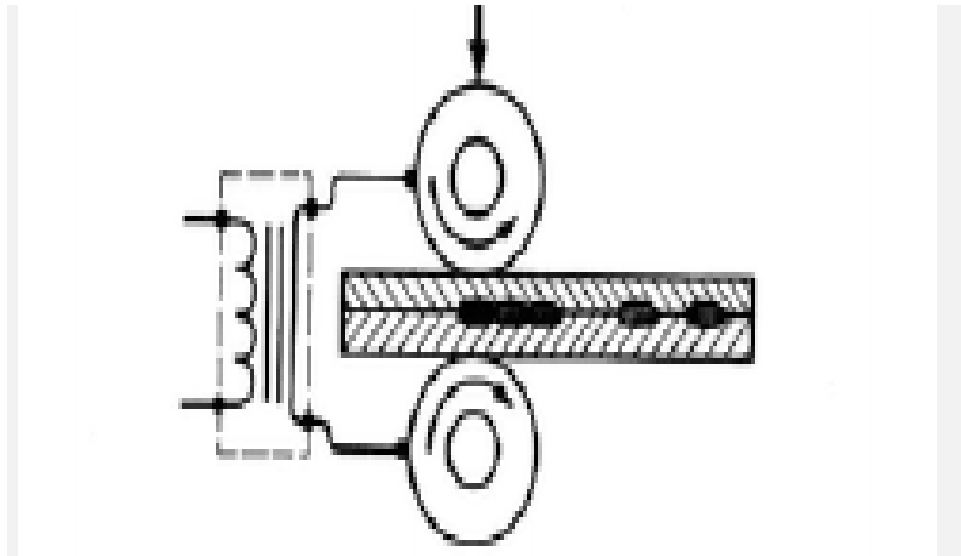


Figure I- 2 : Soudage à la molette[41]

I -2-3- Soudage en bout

On distingue le soudage en bout par résistance pure et par étincelage. Dans le cas du soudage en bout par résistance pure, les deux pièces à souder sont maintenues dans des mâchoires reliées électriquement à chacune des bornes du secondaire du transformateur de soudage. Un jeu de mâchoires est solidaire de la table fixe tandis que l'autre est fixé sur une table mobile. Ces mâchoires mobiles transmettent aux pièces un mouvement relatif de translation l'une vers l'autre et exercent un effort de compression sur les faces à souder. Les extrémités des pièces à souder sont amenées en contact sous pression assez forte avant de provoquer un passage de courant dans les pièces. Les pièces à souder offrant une résistance largement supérieure à tous les autres éléments du circuit deviennent le siège d'un échauffement important par effet joule. Le soudage par résistance pure n'est généralement appliqué qu'au soudage de faibles sections de forme massive, comme par exemple des ronds en acier ou en alliages d'aluminium.[17]

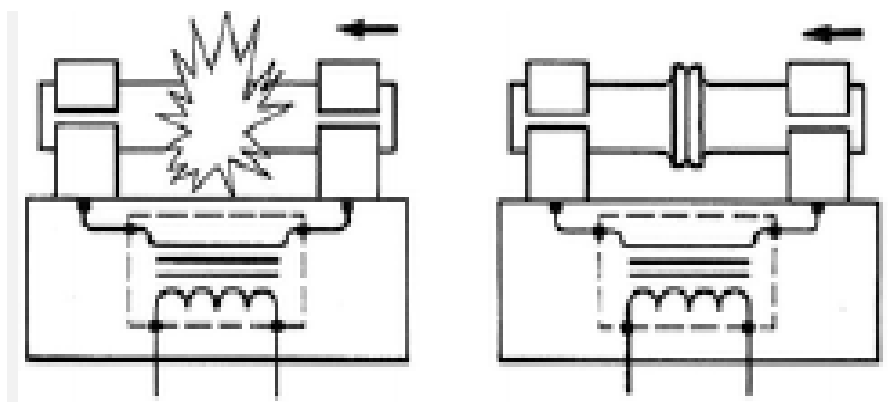


Figure I-3 : soudage en bout [41]

I-2-4- Le Soudage par point

I-2-4-1- Introduction

Le soudage par résistance par points a été inventé en 1877 par Elihu Thomson. et continue aujourd'hui à être largement employé dans l'industrie automobile pour assembler des tôles minces en acier. Le cycle de soudage, d'une période de 1 à 2s, avec une durée de passage de courant limitée à quelques dixièmes de secondes, est répété un grand nombre de fois en différents points de l'assemblage à une cadence élevée via l'utilisation de robots de soudage. Le rôle des électrodes, qui sont refroidies par une circulation d'eau interne pour éviter leur surchauffe, est primordial dans ce procédé puisqu'elles doivent à la fois transmettre l'effort, conduire le courant vers les tôles et participer à l'évacuation du surplus de chaleur de la zone soudée. Le matériau les constituant doit donc posséder une conductivité électrique et thermique élevée ainsi qu'une résistance à la déformation à chaud suffisante. Les électrodes de soudage sont ainsi typiquement fabriquées en alliage de cuivre à durcissement structural (Cu-Cr, Cu-Zr ou Cu-Cr-Zr) [18]

I-2-4-2- Le mécanisme de formation de la soudure

La chaleur servant à faire fondre l'acier au niveau du contact tôle-tôle est créée par effet Joule durant le passage du courant dans les conducteurs. La quantité de chaleur dégagée pendant la durée t en fonction de l'intensité du courant et de la résistance électrique traversée est donnée par la relation :

Loi de joule : Lorsqu'un courant électrique parcourt un conducteur, la quantité de chaleur dégagée est proportionnelle au carré de l'intensité du courant et au temps.

$$W = R \times I^2 \times t$$

W : (joule), R : (Ohm), I : (ampère), t : (seconde).

La résistivité(ρ) : c'est la caractérisation d'un matériau donné à s'opposer au passage du courant électrique. Sa formule est la suivante:

$$R = \rho (L / S) \quad [16]$$

avec R: (Ohm), ρ : (A/m), L: (m), S: (m²) [16]

I-2-4-3- Principe du soudage par point

Le soudage par points s'applique généralement à des assemblages de deux tôles de faibles épaisseurs (0.1 à quelques millimètres mm) que l'on cherche à joindre par un point de soudure. Les tôles, mises en contact et soumises à un effort de pression par l'intermédiaire de deux électrodes reliées aux bornes du secondaire d'un transformateur, sont ainsi traversées par un courant alternatif de forte intensité sous une faible tension. [19] L'opération de soudage peut être décomposée en trois phases principales schématisées dans la Figure (5)

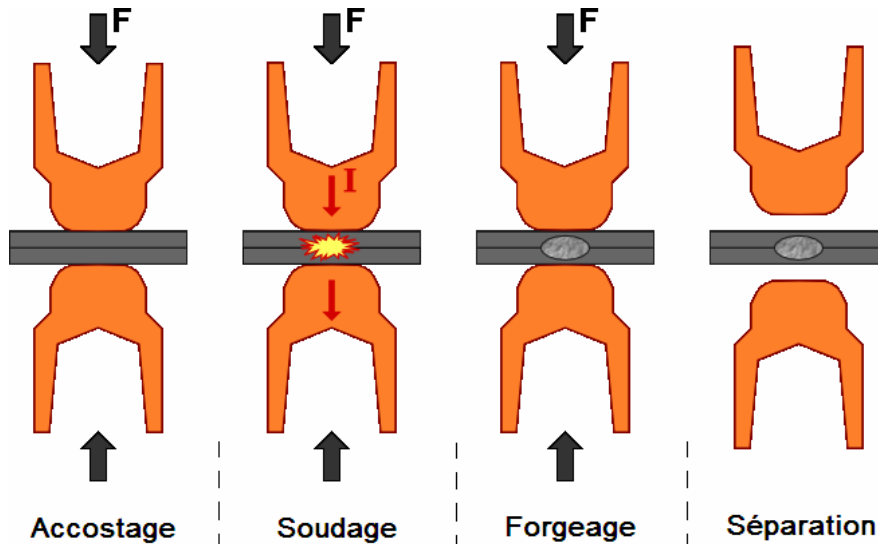


Figure I- 4 : Principe du soudage par point.[18]

1-la phase d'accostage :

Le rôle de cette phase est principalement mécanique. Elle consiste à assurer le contact parfait entre les surfaces à assembler et atteindre le niveau d'effort nécessaire,

2-la phase de soudage :

Cette phase constitue la phase la plus importante. En effet, un courant électrique (quelques milliers à quelques dizaines de milliers d'Ampère) est établi dans le circuit et passe par les tôles à assembler, d'où la naissance d'un effet Joule au niveau de la surface de contact,

3-la phase de forgeage :

Au cours de cette phase l'effort de pression des électrodes sur les tôles est maintenu. Cependant, le courant électrique n'est plus appliqué. Les électrodes assurent également le refroidissement dès que l'effet Joule est interrompu. La chaleur s'évacue vers le circuit de refroidissement par l'eau dans deux électrodes. Le maintien de l'effort lors du refroidissement assure une bonne solidification et la formation d'un noyau homogène, et par conséquent une bonne tenue mécanique de l'assemblage. La qualité des phases métallurgiques résiduelles et le comportement mécanique du point dépendent directement de la durée de cette phase. [20]

I-2-4-4- Paramètres de soudage par point

Dans ce paragraphe, nous présenterons l'influence qualitative de toutes les variables du procédé de Soudage. Les paramètres sont adaptés en fonction des caractéristiques des tôles à souder. Les paramètres principaux décrits dans l'ordre de chronologie du procédé sont :

- 1-l'effort de soudage,
- 2-l'intensité,
- 3-le temps de soudage
- 4-le temps de maintien

1-Effort de soudage

L'effort d'applique dès la phase d'accostage et la valeur à appliquer dépend essentiellement des caractéristiques mécaniques et de l'épaisseur des tôles à souder. Dans la pratique l'incrément de l'effort pendant la phase d'accostage n'est pas linéaire, mais dépend des systèmes de mise en charge de la soudeuse.

2-Intensité de soudage

L'intensité de soudage est considérée comme un paramètre important pour engendrer l'énergie dissipée. Car elle gouverne la génération de chaleur par effet Joule. L'intensité utilisée soit en courant alternatif monophasé, (AC-50Hz), ou soit courant continu moyenne fréquence, (MFDC-1000Hz).

3-Temps de soudage

Il intervient pendant la phase de chauffage. L'ordre de grandeur typique est de quelques dixièmes de secondes. Selon la norme, le temps de soudage dépend de la nuance d'acier et son épaisseur. Dans certains cas de soudage de tôle épaisse, et haute résistance mécanique, le courant pulsé est souvent à appliquer afin de stabiliser le développement du noyau. Cette pulsation comporte le temps, de chaud séparé par le temps de maintien ou le temps de froid. Le nombre de cycles supplémentaires pour le post traitement thermique est souvent adapté à l'assemblage de tôles hautes résistances.

4-Temps de maintien

Le temps de maintien est nécessaire à la solidification par l'évacuation de la chaleur de l'assemblage vers le circuit d'eau de refroidissement. [21]

I-2-4-5- Domaine d'application

Les assemblages par résistances sont très répandus dans différentes industries et vu l'évolution industrielle, le besoin de ce type d'assemblage est nécessaire. Les applications du procédé par résistance sont très vastes dans l'industrie automobile, l'électronique, l'industrie ménagère (radiateur, armoire métallique, grille, etc.). A titre d'exemple on trouve plus de 3000 points de soudure (soudage par point) dans un véhicule [16]. La figure 7 monte quelques exemples industriels.



Figure I- 5: Exemples d'applications du soudage par point[16]

CHAPITRE II

Etat De L'art Du Soudage Par Point De Al/Acier

II- Etat De L'art Du Soudage Par Point D'Al/Acier

II-1 Introduction

Aujourd'hui, l'aluminium est le métal le plus utilisé après le fer, sous sa forme pure ou dans des alliages, il se trouve principalement dans les secteurs des transports, de l'emballage, de l'électrotechnique, de la construction et dans de nombreux biens de consommation. Face aux normes environnementales de plus en plus rigoureuses, beaucoup d'industries réfléchissent à une utilisation plus importante de l'aluminium, afin de répondre à des exigences de poids et de recyclage. Mais cette évolution est généralement freinée par la difficulté et le coût d'assemblage de l'aluminium par rapport à l'acier. Pour résoudre ces contraintes et répondre aux besoins de l'industrie il y a beaucoup de nouvelles technologies qui ouvrent la voie à des solutions économiques et efficaces en soudage par résistance de l'aluminium.[22] Le soudage par points par résistance est un procédé de soudage important et largement utilisé dans les domaines de la fabrication automobile. Cependant, quelques études ont été rapportées sur le soudage par points par résistance entre l'acier doux et les alliages d'aluminium. Les composés non métalliques formés à l'interface de soudage des alliages acier / aluminium peuvent endommager les propriétés mécaniques du joint [2-4]. Ainsi, la compréhension des caractéristiques d'interconnexion de l'alliage acier / aluminium est nécessaire pour améliorer la relation entre la propriété et le traitement afin d'obtenir un lien fort. Des études antérieures ont révélé que les types et la morphologie des produits de réaction formés à l'interface de soudage sont liés au mélange de matériaux ou aux méthodes de soudage utilisés.

II-2 Différents types de soudage de l'aluminium

II-2.1 Défis métallurgiques en Al / acier soudage par points par résistance

La figure 1 montre une représentation schématique de la macrographie d'un joint dissemblable Al / acier soudé à l'aide de RSW (**Resistance spot welding**). Au cours du soudage par résistance (RSW) dissemblable de Al / acier, les phénomènes métallurgiques suivants se produisent:

(i) Phénomènes de fusion dans les tôles de base et formation d'une interface liquide / solide: La résistance relative à la masse et la conductivité thermique de l'Al et de l'acier jouent un rôle important dans le mécanisme de formation de la liaison. La génération de chaleur dans les soudures est dominée par le chauffage Joule dans la tôle d'acier. En raison de la présence d'un gradient thermique entre l'acier et l'aluminium, associée à la conductivité thermique élevée de la tôle d'aluminium, la chaleur en joule générée dans l'acier s'est introduite dans la tôle d'aluminium. Ce facteur, associé au bas point de fusion des alliages d'aluminium, conduit à la formation de pépites ou poches liquides dans les tôles d'aluminium. En fonction de la quantité de chaleur générée / perte de chaleur dans la tôle d'acier, une pépite ou poche isolée dans une tôle d'acier peut être formée [42,43]. L'interface Al / acier est une interface liquide / solide, ce qui suggère que la liaison métallurgique Al / acier à l'aide de RSW est réalisée par un mécanisme de brasage(réf [31–32].)

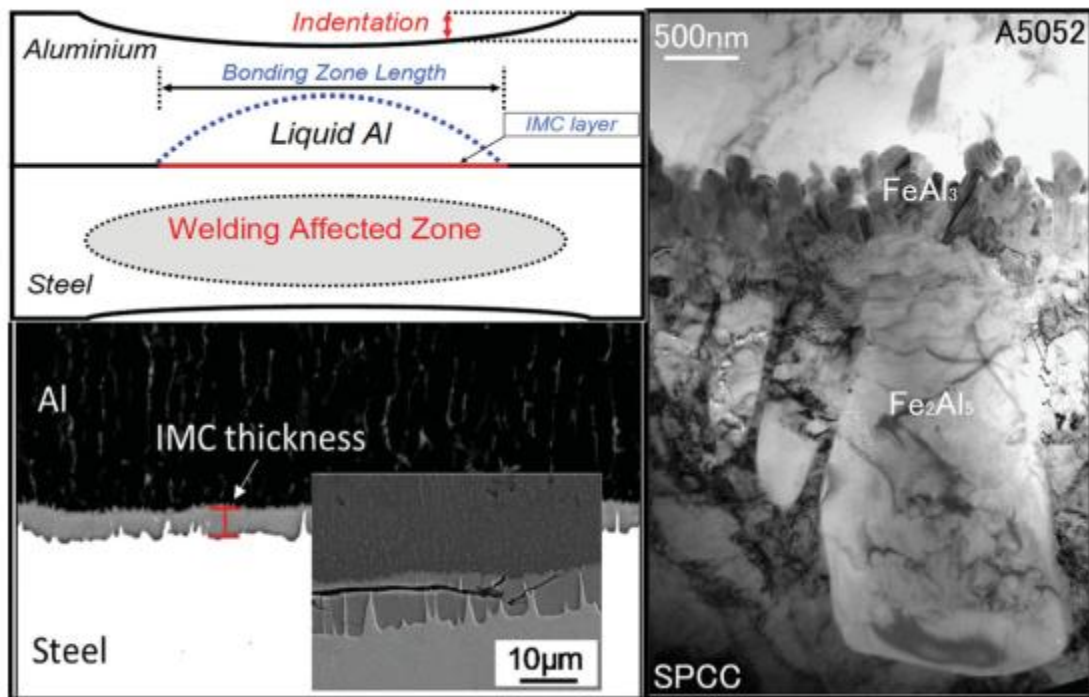


Figure II- 1 : Schéma des soudures par résistance à la résistance dissemblable sur la macrostructure entre l'aluminium et l'acier, avec les détails de l'interface et zone de réaction.

ii) Le mouillage de l'acier solide par de l'aluminium liquide: le mouillage est la condition préalable essentielle à la réaction solide-liquide et à la formation de joints. La présence d'oxyde d'aluminium peut avoir un effet significatif sur la mouillabilité. Pendant le RSW, l'effet combiné de la chaleur et de la force peut aider à rompre la couche d'oxyde. Le mouillage est établi là où la couche d'oxyde est brisée (réf[32,33]).

iii) La dissolution de l'acier dans Al et formation des IMC à l'interface du joint: Pour atteindre l'équilibre à l'interface solide / liquide, la composition solide / liquide est modifiée via la dissolution du métal de base. Ceci se produit par diffusion du fer dans d'Al. Ces processus sursaturent le liquide dans Fe, ce qui conduit finalement à la formation des IMC riches en Al résultant en une liaison métallurgique atome-atome [26].

Les propriétés mécaniques de l'aluminium / acier RSW dépendent de la manière dont les étapes susmentionnées peuvent être contrôlées. Les facteurs contrôlant les propriétés mécaniques peuvent être résumés comme suit (réf[29,33–35]):

- Longueur de la zone de collage: Elle est définie comme la largeur du noyau d'aluminium liquide, fonction du développement thermique à l'interface tôle / tôle du côté Al. Ceci détermine la surface portante.
- Épaisseur de la couche IMC: Ceci est fonction de la cinétique de la réaction d'interface liquide / solide qui est compliquée par le cycle thermique de soudage, la composition des

matériaux de base réactifs et les revêtements. La présence d'IMC épais est la première source pour la production de joints fragiles à l'interface.

- Indentation de l'électrode dans la tôle d'aluminium: la profondeur de l'indentation de l'électrode dans le côté de l'aluminium est un paramètre crucial pour contrôler pendant le soudage (réf[36]) que l'effet de contrainte dans la zone de joint et ainsi influencer sur la résistance mécanique (réf[37]). Ce facteur est fonction de l'apport de chaleur, de la force de l'électrode et de sa géométrie.
- Défauts à l'interface du joint: Les défauts incluent la formation de porosité / vide dans le noyau d'aluminium adjacente à l'interface du joint, principalement due au retrait par solidification de l'Al et à l'expulsion de la masse fondue et à la vaporisation de l'acier, ainsi la couche est discontinue, principalement due à l'élimination irrégulière de l'oxyde d'aluminium (réf[32,33]). Il est à noter que la formation de la porosité de Kirkendall est minimisée pendant le RSW en raison du refroidissement rapide et la présence d'un chargement en compression du joint [28].

Le mode de rupture des points de soudure, en tant que mesure qualitative importante de l'absorption d'énergie des joints en cas de rupture, dépend de plusieurs facteurs, notamment les attributs physiques de la soudure, les caractéristiques métallurgiques de la soudure et les conditions de charge [60–64]. Trois chemins de fracture peuvent être identifiés pour Al / acier RSW:

(i) Rupture interfaciale par propagation de fissure à travers la couche IMC, favorisée lorsque l'épaisseur de l'IMC est supérieure à la valeur critique. Dans cette situation, l'interception de fissure consommant de l'énergie à l'interface irrégulière η / acier devient moins fréquente et la résistance du joint est égale à dictée par la faible ténacité de la couche IMC [28]. Dans ces conditions, l'épaisseur de la couche IMC détermine la résistance du joint.

(ii) défaillance interfaciale par rupture principalement entre les phases intermétalliques et le matériau à base d'Al. Cette défaillance est favorisée lorsque la couche IMC est constituée de régions minces ou non liées et que les pores / vides sont présentés à l'interface commune.

(iii) Échec d'arrachement via le retrait du noyau de la tôle Al. Une grande longueur de zone de liaison associée à un IMC fin et continu est nécessaire pour obtenir le mode de retrait, le mode le plus préféré. Il est à noter que l'obtention du mode d'échec du retrait dû à un amincissement important de la feuille d'aluminium n'est pas préférable. Lorsque l'épaisseur de l'IMC est inférieure à la valeur critique, on peut s'attendre à ce que la longueur de la zone de collage soit le facteur décisif pour déterminer les propriétés du joint.

II-2.2 Approches pour améliorer les propriétés des joints Contrôler l'apport de chaleur de soudage:

la condition préalable impérative L'apport de chaleur de soudage, qui est déterminé principalement par le courant de soudage, le temps de soudage et la force de l'électrode, est crucial pour les propriétés des joints en fonction de plusieurs facteurs, notamment:

- (1) la température d'interface L / S (TS / L) et donc la longueur de la zone de liaison,
- (2) l'épaisseur de la couche IMC qui est sensible à la fois à la fois par TS / L et par un temps de séjour supérieur à la température de réaction effective,
- (3) profondeur d'indentation dans la feuille d'Al,
- (4) formation de vide / porosité à l'interface du joint due à l'expulsion de Al liquide et à la vaporisation de la couche de Zn
- (5) phénomènes d'assouplissement de la ZAT dans la feuille d'Al dus à la formation de grain grossier, à la perte de contrainte / de précipitation effets de durcissement. Pour optimiser les paramètres de soudage, tous ces facteurs doivent être pris en compte. Des temps de soudage courts et des courants de soudage élevés aident à minimiser la croissance de l'IMC.

II-2.3 Plaque de recouvrement: un moyen de contrôler la température d'interface L / S :

Comme mentionné ci-dessus, la longueur de la zone de collage est l'un des facteurs déterminants de la résistance mécanique Al / acier RSW. Pour agrandir la zone de collage, la température d'interface L / S (TS / L) doit être augmentée. En raison de la faible génération de chaleur dans Al et de la conductivité thermique élevée de Al, pendant le RSW conventionnel, le TL / S accru peut être atteint simplement en utilisant un courant de soudage extrêmement élevé qui accélère le processus de dégradation des électrodes et augmente l'indentation. Une autre approche consiste à utiliser la technique de la plaque de recouvrement [41,65–67].

La plaque de recouvrement est un matériau à haute résistance électrique et à faible conductivité thermique (tel que l'acier) qui est placé sur la feuille d'aluminium. Lorsque le courant électrique passe dans la plaque de recouvrement / Al / acier, la chaleur produite par effet Joule dans la plaque de recouvrement est efficacement dirigée vers l'interface Al / acier, ce qui entraîne une augmentation du TS / L (200–300 ° C plus élevée que lors du soudage sans utiliser de plaque de recouvrement, selon la simulation par éléments finis) et donc une zone de collage élargie [41,65–67]. Le principal avantage de cette technique est d'améliorer les propriétés mécaniques des joints, causées par l'élargissement de la zone de collage, sous des courants de soudage relativement faibles. Ceci est accompagné d'une faible indentation des électrodes et d'une usure des électrodes. Il est à noter que cette technique n'a pas d'impact significatif sur la croissance des IMC. L'efficacité de cette approche dépend des propriétés thermiques / électriques et de l'épaisseur de la plaque de recouvrement.

II-2.4 Revêtement de zinc: améliorer le mouillage par action fluide :

L'un des principaux obstacles pour obtenir une forte liaison Al / acier RSW est la présence de régions non mouillées / non liées (c'est-à-dire l'absence de couche de réaction) en raison de la présence d'oxyde d'Al. Le retrait de la couche d'oxyde nécessite un fort apport de chaleur, entraînant la formation d'une couche épaisse de Fe – Al IMC à l'interface du joint, rendant impossible l'obtention d'une résistance satisfaisante du joint (réf[32,33]). La présence de zinc, en tant que couche protectrice sur la surface de l'acier, peut être considérée comme bénéfique en raison de deux caractéristiques distinctes:

(i) Comportement en flux: Le revêtement de Zn est rapidement dissous par le liquide Al à basse température, facilité par une réaction eutectique Al – Zn à basse température, laissant une surface d'acier «propre» sans aucune contamination telle que des oxydes, assurant ainsi un bon mouillage et ainsi croissance plus uniforme des couches réactionnelles [37, 46, 47, 57,68–70]. La clé de la réussite de la coulée pendant le temps de lavage résiduel consiste à extraire la masse fondue contenant l'oxydation jusqu'à la périphérie de la pépite par la pression des électrodes [46,47]. C'est ici que la forme et la géométrie de l'électrode peuvent jouer un rôle (réf[33]). Cet effet bénéfique induit par le Zn peut être diminué en cas d'apport élevé de chaleur de soudage dû à la vaporisation de Zn [57,68].

(ii) Réduction de la croissance des IMC: De manière générale, il a été démontré que la présence de Zn en phase liquide induisait un effet d'accélération sur la croissance des IMC [23]. Cependant, dans le cas de RSW, la présence de Zncoating diminue la résistance de contact et abaisse la température TS / L (réf[35]). Ceci, couplé au fait que la fusion du revêtement de zinc a réduit l'apport de chaleur efficace disponible pour la réaction d'interface, a entraîné la formation de IMC plus minces mais plus réguliers à l'interface du joint (réf[23,35]). Il convient de mentionner que la composition et la microstructure du revêtement peuvent affecter son comportement à l'écoulement et sa croissance. Il semble que le comportement fluide du revêtement soit contrôlé par sa température de fusion, tandis que l'épaisseur de la couche IMC est influencée par la résistivité électrique du revêtement ainsi que par le chemin de réaction. Par exemple, l'action de nettoyage du Zn était plus prononcée pour le revêtement galvanisé au Zn – 5Al – 2Mg en raison de son point de fusion inférieur [71]. Le RSW dissemblable de l'acier Al / galvannealé (Zn – 10Fe) représentait un flux moins induit par le Zn, en raison du point de fusion plus élevé du revêtement, avec une couche réactionnelle plus épaisse, du fait de sa résistivité électrique plus élevée et de son chemin de réaction différent (réf[33]). En optimisant les paramètres de soudage et la géométrie des électrodes, il est possible de réaliser un joint avec une résistance à la traction croisée élevée dans du RSW en acier revêtu Al / Zn. Il convient de noter que les problèmes associés au revêtement de Zn, à la formation de porosité induite par la vaporisation de Zn (réf[35]) et à la fissuration par rupture à la surface induite par la fragilisation du métal liquide, doivent être pris en compte lors du processus d'optimisation du soudage.

II-2.5 Le silicium: élément miracle pour le soudage Al / acier

Il est bien connu que des additions en Si peuvent être utilisées pour réduire le taux de croissance de la couche de Al_2Fe_5 lorsque l'alliage Al – Si est liquide [28,36]. L'anatomie de la zone de réaction dans l'interface Al – Si (L) / acier (S) est en alliage d'aluminium / Al_8Fe_2Si (τ_5) / $Al_{13}Fe_4$ (θ) / Al_5Fe_2 (η) / acier [36]. Bien que le mécanisme de l'effet sur l'inhibition de la croissance de la couche de réaction ne soit pas clair, il a été suggéré qu'il pourrait être attribué aux atomes de Si occupant des lacunes structurales sur l'axe c de la phase η , ce qui aurait pour effet de réduire la mobilité atomique et donc de gêner l'IMC taux de croissance [18,36]. De plus, la formation d'une couche mince de τ_5 à l'interface liquide / solide, en tant que couche résidante, agit comme une barrière à la poursuite de la diffusion, supprimant ainsi la croissance rapide des IMC Fe-Al.

L'utilisation de métal d'aluminium à base d'aluminium contenant du Si est une approche viable pour réduire l'épaisseur des IMC lors du soudage arc / laser Al / acier [20-24]. La même approche peut être utilisée dans le soudage par points de résistance différente d'acier revêtu d'aluminium aluminisé (Al – Si) et d'alliage d'aluminium [72, 73], dans lequel la dissolution du revêtement pénètre le Si dans la fonte d'Al. Il a été démontré que la formation et la croissance des IMC au cours de Al / acier RSW peuvent être inhibées davantage en utilisant un acier contenant de l'azote revêtu d'Al – Si. Il est affirmé qu'une périphérie de pépite de soudure libre IMC avec le mode de rupture par arrachement lors du test de tension croisée peut être obtenu en raison de l'effet combiné du Si et de la formation d'une couche d'inhibition riche en azote [74] sur la surface de l'acier qui empêche l'interaction entre Fe et Al. Il a été prouvé que l'utilisation du revêtement Al – Si sur l'acier était une solution prometteuse pour les problèmes de soudage associés au soudage dissemblable de Al / Si. L'idée d'utiliser une feuille mince Al – Si (par exemple, alliage eutectique Al – 12Si) entre la couche intermédiaire d'Al et de tôle d'acier en tant que matériau de brasage [75, 76], basée sur le ralentissement de la croissance de l'IMC induit par le Si, n'a pas permis d'améliorer significativement la résistance sous mêmes conditions de soudage que pour les procédés conventionnels. Une certaine amélioration des propriétés de traction-cisaillement peut être obtenue à des courants de soudage extrêmement élevés. Néanmoins, cette idée doit encore être évaluée. Concevoir un revêtement de protection sophistiqué pour l'acier afin de contrôler la formation et la croissance des IMC: examen du rôle efficace des revêtements de Zn et Al – Si dans la réduction du taux de croissance des IMC pendant le traitement Al / acier RSW, il convient d'examiner

- (a) le mécanisme détaillé derrière cette réalisation,
- (b) l'influence de la composition de la couche (à base de Zn, à base d'Al, à base de Sn) ainsi que l'épaisseur de couche sur la métallurgie à réaction d'interface.

De plus, le moulage thermodynamique peut être utilisé pour concevoir un nouveau revêtement protecteur avec une composition spécifique qui peut conduire à la formation de IMC moins fragiles ou à une vitesse de croissance réduite soit en modifiant le trajet de réaction de

l'interface, soit en agissant comme une barrière de séparation. En plus du rôle de revêtement, l'utilisation d'une couche intermédiaire est une approche courante dans l'assemblage de matériaux dissemblables. Certaines couches intermédiaires ont été essayées pour améliorer le RSW de Al / acier, y compris Al pur (pour réduire la teneur en Mg dans l'alliage d'aluminium fondu) [48], Al – Si (pour utiliser l'effet bénéfique du Si) [72,73], Al –Mg (servant de brasure pour combler le vide entre les feuilles) [56] sans caractérisations métallurgiques / mécaniques suffisantes.

Pour concevoir / choisir la couche intermédiaire appropriée pour RSW, il convient de prendre en compte ses propriétés électriques, en plus de sa compatibilité avec les métaux de base ainsi que de son effet sur la réaction d'interface.

II-2.6 Perspectives de recherche

Corrosion: La corrosion galvanique est un défi critique dans le soudage dissemblable de Al / acier [84] qui a été moins étudié que dans les recherches précédentes. La corrosion galvanique dans Al / acier RSW peut être minimisée lors de l'utilisation d'un matériau de transition bi-métal. De plus, une technique hybride de soudage par soudure dans laquelle l'adhésif peut agir comme un joint peut améliorer la résistance à la corrosion du joint dissemblable [85]. Cependant, L'effet de l'adhésif sur la génération de chaleur et la formation de IMC nécessite des investigations supplémentaires.

Recherche sur des procédés de soudage alternatifs: Différentes techniques de soudage à l'état solide sont disponibles pour le soudage dissemblable Al / Acier. Parmi ceux-ci, le soudage par points par friction-malaxage (FSSW) pourrait devenir un concurrent du procédé de soudage par points par résistance. Cependant, il n'existe pas d'étude comparative concernant les joints dissemblables de caractéristiques métallurgiques / mécaniques réalisés par RSW et FSSW. Malgré la température d'interface plus basse pendant Al / Fe qui aide à minimiser l'épaisseur de la couche de réaction, le temps de traitement plus long dans FSSW encourage la croissance des IMC. Malgré le fait que FSSW ait trouvé des applications commerciales, Ce processus prend beaucoup de temps et est coûteux par rapport au RSW. De plus, il n'existe pas de caractérisation mécanique complète (en particulier dans le mode I) en ce qui concerne l'application de FSSW pour l'assemblage dissemblable des aciers Al / à un niveau nécessaire pour assurer la stabilité à l'utilisation. Le temps et les coûts nécessaires pour lier efficacement Al / acier à l'aide de FSSW nécessiteront un développement considérable.

Chapitre III

Méthodologie Expérimentale

III- Partie expérimentale

III- 1 Introduction

Les travaux de cette mémoire se sont principalement focalisés sur l'assemblage par résistance par point d'abord avec des matériaux identiques (acier /acier ,aluminium/aluminium) en interposant une poudre métallique au niveau de leur interface. Ensuite, le soudage par point de matériaux dissemblable acier/aluminium avec ou sans poudre interposée à l'interface, acier galvanisé /aluminium ,acier /aluminium revêtu par projection thermique. Nous avons fait aussi soudage d'acier /acier galvanisé revêtu par un feuille d'aluminium. L'objectif de ces essais est l'assemblage des tôles différent matériaux et épaisseur.

III-2 -1 Matériaux utilisés

- **Acier**

L'acier utilisé dans cette étude est un acier au carbone à 0.2 % C. Des éprouvettes de forme carrée ou rectangulaire étaient découpées puis nettoyées de leur rouille.

- **Aluminium**

L'aluminium est un métal mou, léger, mais résistant avec un aspect argent-gris mat. Les éprouvettes ont été prélevées d'une plaque d'aluminium prise dans l'atelier de soudage. Nous avons supposé que cette plaque était de l'aluminium presque pur.

- **Acier galvanisé**

L'acier galvanisé est l'un des nombreux produits phares utilisés dans le domaine de la construction. Il doit son succès à ses multiples propriétés et qualités. Le tableau 1 donne les propriétés physiques des matériaux utilisés.

Tableau 1 : Propriétés physiques des matériaux utilisés.

Propriété	Symbole	unité	Acier	Aluminium	Zinc
Conductivité Electrique	σ	10^6 .siemens/m	5.9	36.9	16.6
Point de fusion	T_f	°C	1450	660.45	419
Résistivité électrique	P	10^{-8} ohms.m.	16.9	2.7	6.0
Conductivité thermique	λ	$W.m^{-1}.k^{-1}$	50.2	237	116
Coefficient de dilatation linéique	α_1	$10^{-6}.K^{-1}$	$12 \cdot 10^{-6}$	23.1	$29 \cdot 10^{-6}$
Module d'Young	E	Mpa	21000	69000	78000

Matériaux intermédiaires

Afin de palier à certains problèmes techniques liés au soudage du couple acier/Al, nous avons prospecté l'emploi d'une poudre commerciale utilisée pour la projection thermique afin de la déposer à l'interface de l'acier/Al et procéder à leur soudage par point. Les poudres qui ont été testées dans cette étude sont la poudre de NiAlMo, NiCrAlSi, une poudre de bronze à base de CuSn et une poudre céramique à base d'oxydes de chrome et de titane

Afin d'interposer un revêtement métallique de composition chimique variée, donc des propriétés physiques différentes, nous avons prospecté la projection thermique d'un dépôt entre une éprouvette en aluminium et une autre en acier. C'est l'éprouvette en acier qui a reçu un revêtement.

Les torches CastoDyn® DS 8000 et RotoTec® 80, montrées à la figure 1, ont été employées pour réaliser les revêtements. La torche CastoDyn 8000 a été utilisée pour déposer les poudres de NiCrAlSi, NiAlMo et CuSn. La torche Rototec 80 a été utilisée pour les dépôts MetaCeram.



Figure III 1 : les torches de projection thermique.

III -2-2 Préparation de l'échantillon

Le découpage de l'échantillon, le soudage et la métallographie ont été effectués au niveau des ateliers d'usinage ; soudage et laboratoire de SDM et du LTSM.

III -2-2-1 Découpage de l'échantillon

En métallographie, la préparation des échantillons commence par la coupe de l'échantillon. Une bonne coupe augmentera la qualité du rendu final de l'échantillon. En effet, un choix pertinent de disque de coupe permet que l'échantillon ne surchauffe pas et par conséquent ne se déforme pas et conserve ses propriétés initiales. Ce choix est basé sur la dureté du matériau à tronçonner.

Méthodologie expérimentale

En ce qui nous concerne, nous avons utilisé la guillotine de l'atelier d'usinage qui est montrée à la figure 2.



Figure III 2 : la guillotine .

III -2-2-2 Nettoyage

Le nettoyage des surfaces avant le soudage par point est primordial. Il est nécessaire pour éliminer les produits organiques gras, provenant des mises en œuvre préalables (lubrifiants de coupe, de protection temporaire). Il peut s'y ajouter des opérations d'élimination chimique des oxydes, etc.

➤ Papier abrasif

Le papier de verre est composé de grains de minéraux sur un papier épais et rigide. Il est utilisé en ponçage à sec. Pour poncer efficacement un matériau, il est important de choisir un abrasif adapté. Dans notre cas, nous avons utilisé le papier abrasif 320 et 600.

➤ Grenailage

Le grenailage est un procédé industriel utilisé pour préparer, entretenir ou nettoyer les surfaces de différents matériaux par projection d'abrasifs. L'opération s'effectue en cabine entièrement close de façon manuelle. L'abrasif utilisé dans notre cas était de l'oxyde d'aluminium. La figure 3 montre une photo de la grenailleuse du LTSM utilisée.



Figure III 3: La grenailleuse .

III-2-2-3.Trempage des éprouvettes d'acier dans du zinc fondu

Pour ce faire, nous avons préparé 200 g de zinc pur dans un creuset en acier que nous avons nous même fabriqué. Le creuset avait un diamètre de 80 mm et une hauteur de 100 mm. Le four de fusion était chauffé à 600 °C en phase de préchauffage puis maintenue à 480 °C durant la galvanisation (figure 5). Les éprouvettes d'acier ont été nettoyés au papier émeri puis ensuite passé au grenailage afin de s'assurer d'une bonne adhérence du revêtement.

Le temps de maintien dans le four, lorsque les éprouvettes étaient immergées dans le creuset était respectivement de 2, 4, 5 et 8 secondes. Les éprouvettes ainsi galvanisées sont montrés à la figure 4. Les nombres qui apparaissent en dessous des photos représentent les épaisseurs de la couche galvanisées exprimées en micromètres.



Figure III 4: Galvanisation des éprouvettes d'acier au labo LTSM.



Figure III 5 : le four de fusion .

III -2-3 La machine de soudage

Dans cette étude, nous avons utilisé la soudeuse de marque ESA montrée à la figure 6; pour effectuer le soudage par point des différentes expériences que nous avons réalisées. Les paramètres généraux de ce cette machine sont résumés au tableau 2. Cependant, parce que cette machine avait un comportement instable durant les essais, nous avons utilisé les paramètres suivants:

$$P= 1000 \text{ N} , \quad I= 9 \text{ kAm} , \quad t= 0.6 \text{ seconde} .$$

Tableau 2 : Paramètres de la machine.

I	P	ts
1 à 9 Kam	500 à 2000 N	0.1 à 0.14 s



Figure III 6:Machine de soudage par résistance par point .

III -3 Polissage des échantillons

Le polissage est effectué au labo SDM à l'aide d'une polisseuse. Il a pour but d'éliminer l'irrégularité de surface et donne une surface plus ou moins lisse. Le polissage a été fait en deux étapes :

- **Pré polissage**

Il a été fait par frottement de l'échantillon sur des papiers abrasifs de granulométrie de plus en plus fins. Le polissage est fait sous eau (ou avec arrosage) pour éliminer tout risque d'échauffement de l'échantillon. La granulométrie des papiers abrasifs utilisés était respectivement : 320-400-600-800. La durée de polissage est estimée à 5 minutes par granulométrie.

- **Polissage de finition**

A fin de donner à nos échantillons un effet miroir, on utilise une polisseuse de finition avec une poudre d'alumine de 1 μm . La figure7 montre une photo de la polisseuse Metasinex utilisée pour cet effet.



Figure7 : la polisseuse Metasinx.

III -3-1 Attaque chimique

Avant l'étude micrographique, l'échantillon subit une attaque chimique au Nital (figure 8), utilisé pour les examens des structures des aciers au carbone. Le Nital est une solution à 0,4 % d'acide nitrique (HNO_3) dans de l'éthanol ($\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$). La surface obtenue par polissage de la coupe est plongée 10 à 15 secondes dans cette solution. Elle est à nouveau nettoyée à l'éthanol et séchée à l'air chaud. Cette dernière opération est très délicate, car il ne faut laisser aucune trace sur la surface.



Figure III 8: attaque chimique au Nital.

III -4 Observation microscopique :

L'examen métallographique a été effectué au niveau du laboratoire LTSM. L'appareillage utilisé pour l'acquisition des images est un microscope métallurgique à plateau inversé. Ce

Méthodologie expérimentale

microscope est muni d'une caméra numérique Sony de 5 millions de pixels pour la prise de photos des microstructures. La figure 9 montre une photo du microscope optique Carl Zeiss.



Figure III 9 : Microscope optique.

Chapitre IV

Partie résultats et discussion

IV- résultats et discussion

IV-1 Introduction

Dans ce chapitre nous ferons le point sur les difficultés rencontrées, l'issue des solutions proposées et les perspectives futures sur lesquelles il faudra approfondir.

IV-2 Approche utilisée

A la lumière de la lecture de l'état de l'art sur le soudage par résistance par point des matériaux dissemblables, particulièrement pour le couple acier/aluminium, nous avons prospecté plusieurs pistes pour atteindre notre but, à savoir souder par point ces deux matériaux dissemblables. Nous résumons ici l'ensemble de notre approche:

1. Interposer entre l'acier et l'aluminium un troisième corps à l'interface dont les propriétés physiques pourraient être intermédiaires entre les deux matériaux.
2. Utiliser l'acier avec une surface de contact modifiée: soit employer un acier galvanisé soit un acier aluminisé. Pour cette dernière opération, l'acier est plongé dans un bain d'aluminium à l'état liquide.
3. Utiliser un acier recouvert avec une feuille mince d'aluminium.

Nous avons étudié différentes techniques de caractérisation ainsi que leurs interprétations de soudage par point. Dans cette partie, l'effet des paramètres de soudage ont été étudiés sur :

- La géométrie du point de soudure de même et/ou différents matériaux.
- La microstructure de la zone fondue .

La machine de soudage par résistance par point a été discutée au chapitre 3 de ce mémoire. Nous voudrions simplement attirer l'attention du lecteur sur les difficultés expérimentales que nous avons rencontré avec cette machine.

- a) Lorsque nous voulions changer le courant de passage entre les deux électrodes, la machine ne répondait plus.
- b) Le refroidissement des électrodes était aléatoire. Tantôt, l'eau circulait à l'intérieur des électrodes, tantôt, l'eau de refroidissement s'arrêtait et les éprouvettes étaient complètement cramées.

C'est dans cet état d'expérimentation que nous avons réalisé tout notre soudage par résistance par point.

IV-3 Soudage de matériaux identiques avec 3eme corps interposé

IV -3-1 Soudage acier / acier par poudre interposée

L'un des principaux obstacles pour obtenir une forte liaison Al/acier RSW est la présence de régions non mouillées / non liées (c'est-à-dire l'absence de couche de réaction) en raison de la présence d'oxyde d'Al. Le retrait de la couche d'oxyde nécessite une forte apport de chaleur, entraînant la formation d'une couche épaisse de Fe – Al IMC à l'interface du joint, rendant impossible l'obtention d'une résistance satisfaisante du joint [32,33].

résultats et discussion

Afin de vérifier cette première hypothèse, nous avons décidé d'interposer une série de poudres afin de choisir la poudre la plus adaptée pour un soudage par résistance par point acier/aluminium. Pour nous faciliter cette première tâche, nous avons choisi d'abord d'employer deux plaques métalliques acier/acier pour nous focaliser sur la faisabilité de cette procédure et ensuite pour connaître la qualité du joint formé entre les deux tôles.

Les figures 1, 2 et 3 présentent les résultats de l'assemblage du soudage par résistance par point de deux plaque en acier d'une épaisseur de 2 mm chacune avec respectivement une poudre interposée de CuSn, NiAlMo et NiCrAlSi.

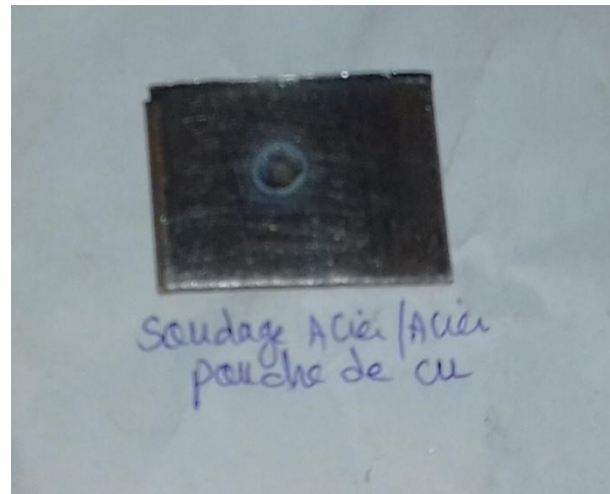


Figure IV 1: soudage acier /acier / poudre de CuSn .



Figure IV 2: soudage acier /acier / poudre NiAlMo .



Figure IV 3 : soudage acier /acier / poudre NiCrAlSi

A partir d'une inspection visuelle des éprouvettes, nous constatons qu'il y a un noyau qui est formé pour toutes les situations essayées avec les poudres. Les essais de déboutonnage étaient impossibles. Le diamètre du noyau pour tous les cas était d'environ 7 mm. Pour étudier davantage les soudures de ces éprouvettes, nous avons découpé ces dernières au niveau du noyau, nous les avons poli avec différents papiers abrasifs et soumis à l'attaque chimique du Nital pour révéler seulement la microstructure de l'acier au carbone. Cette attaque chimique permettait de déterminer les frontières entre les matériaux et celle du noyau. Les résultats sont montrés aux figures 4 et 5.

La figure 4 montre les résultats d'observation au microscope optique de la microstructure de soudage acier /acier par une poudre interposée de CuSn. Nous remarquons la formation d'un noyau mais qui nous semble de petite taille probablement à cause des paramètres de soudage choisis. Nous rappelons qu'avec la machine utilisée, nous n'avons qu'un seul choix de paramètres. Cette situation nous limite dans une prospection plus rigoureuse des paramètres étudiés. Ici la poudre à base de cuivre a été choisie pour avoir un matériau interposé à forte conductivité.

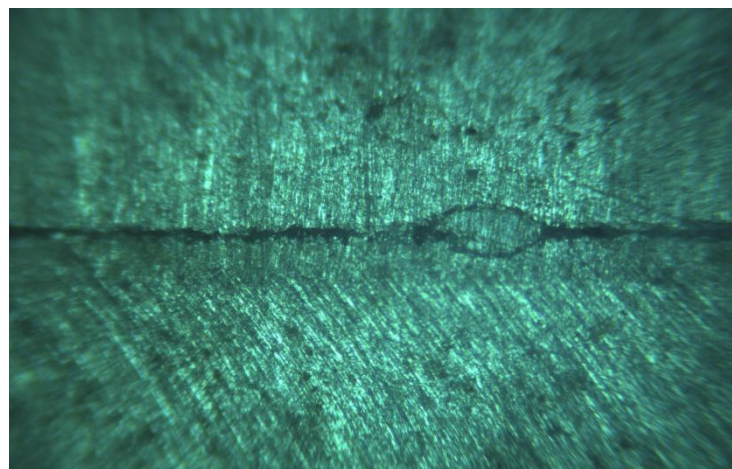
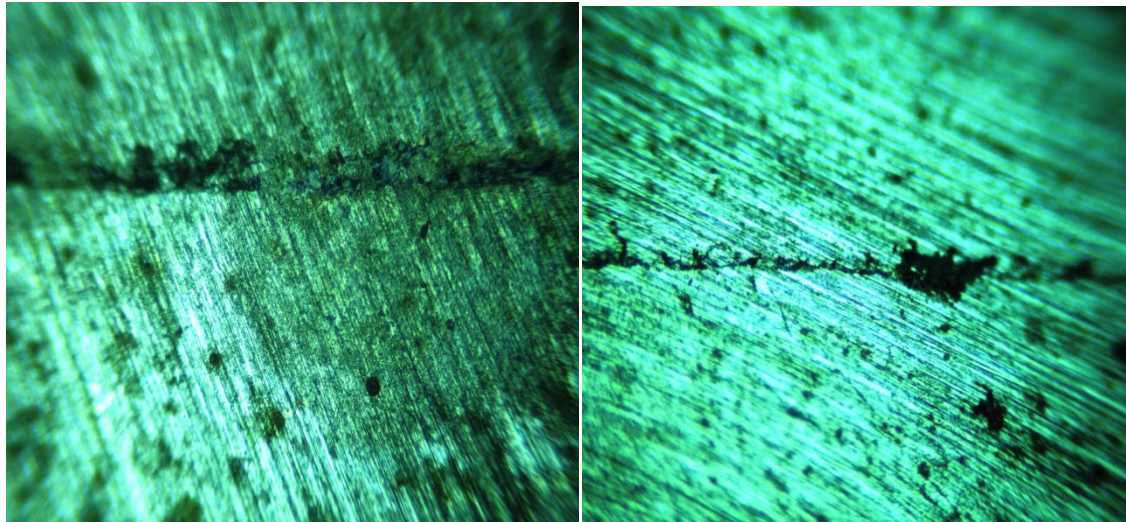


Figure IV 4 : Zone fondue du soudage par point de acier/acier /CuSn interposé (100 X).

La figure 5 montre respectivement le soudage par résistance par point de deux tôles d'acier avec respectivement une poudre interposée de a) NiAlMo et b) NiCrAlSi. Nous remarquons qu'il y a bien formation d'un noyau mais elle est beaucoup moins évidente que celle obtenue avec la poudre de CuSn.



a) NiAlMo [200 X]

b) NiCrAlSi [200 X]

Figure IV 5 : Zones fondues de acier/acier/poudre à base de Ni.

L'arrachement à la main des deux plaques était impossible pour les deux poudres à base de nickel. La découpe à la tronçonneuse des éprouvettes n'a pas affecté non plus la liaison établie entre les deux tôles d'acier. Nous notons aussi, que l'aspect verdâtre des éprouvettes est visible parce que ces photos ont été prises avec un microscope optique de moindre qualité que celui du microscope optique Axiovert de Carl Zeiss. Ce dernier avait un problème d'électronique qui nous a causé beaucoup de souci quand au suivi rigoureux des expériences de soudure réalisée.

IV-4 Soudage de matériaux dissemblables avec 3eme corps interposé

Avant de commencer les essais de soudage par résistance par point de matériaux dissemblables, nous avons voulu vérifier le comportement des plaques d'aluminium avec la machine utilisée. Le soudage par résistance par point de deux tôles d'aluminium d'une épaisseur de 3 mm chacune est montré à la figure 6. Ici, l'épaisseur des tôles d'aluminium était choisie supérieure à celle de l'acier pour éviter sa fusion prématurée dans le soudage par résistance par point vis à vis de la tôle d'acier.

Il est clair qu'il y a une fusion partielle des deux plaques d'aluminium sans formation de noyau. Nous avons refait l'expérience avec d'autres éprouvettes mais dans ce cas, les deux plaques d'aluminium étaient carrément trouées. L'inspection avec attention de la machine de soudage nous a permis de détecter que son électrode supérieure n'était pas alimentée par l'eau. Elle n'était donc pas refroidie.. Cette situation provoquait une décharge excessive du courant qui fusionnait les deux tôles d'aluminium.



Figure IV 6 :soudage Aluminium/Aluminium

Il est évident que notre expérimentation du soudage par résistance par point limitait notre champ d'action et de prospection et que désormais, nous devons essayé plusieurs solutions pour au moins connaître les tendances de résultats des différentes approches afin de préparer un autre travail avec une machine de soudage plus performante pour espérer dégager une solution à ce problème.

IV-4-1 Soudage acier /aluminium

Une fois que les couples de même matériau testé au soudage par résistance par point (acier/acier et aluminium/aluminium), il est intéressant de suivre le comportement en soudage par résistance par point des matériaux dissemblables acier/aluminium.

Dans un premier temps, nous avons essayé simplement et directement de souder par point une tôle d'acier à une tôle d'aluminium. Les résultats sont présentés à la figure 7. La fusion excessive de l'aluminium est évidente. Par contre, l'acier ne semble souffrir de cette soudure. En effet, leurs propriétés physiques, telles que la température de fusion (1 450° C contre 660 °C), le coefficient de dilatation (1,2 contre 2,3 mm/100°C) , sont très différentes. Sur la figure 7, les flèches indiquent la présence du phénomène d'expulsion de l'aluminium lors du soudage par résistance par point. L'expulsion est un phénomène fréquemment observé dans le procédé de soudage par points. L'expulsion montre un effet sévère sur la qualité du point, particulièrement la diminution de la taille du noyau à cause de l'éjection de métal fondu à l'interface tôle/tôle.

IV-4-2-Soudage acier/aluminium par poudre interposé :

En pratique, il est très difficile de souder par point des matériaux différents comme l'aluminium et l'acier. C'est pourquoi, nous avons prospecté plusieurs solutions possibles pour essayer de résoudre ce problème. La première solution envisagée est l'idée d'interposer des poudres commerciales employées dans la projection entre l'acier et l'aluminium. L'objectif était de réduire les disparités physiques qui existent entre l'acier et l'aluminium. Comme en

résultats et discussion

projection thermique la poudre de NiCrAlSi et NiAlMo sont employées pour justement atténuer les différences des propriétés physiques entre l'acier et la céramique, nous avons utilisé ces deux poudres comme première tentative. La poudre à base de CuSn a été également employé afin de vérifier l'effet de la forte conductivité thermique sur le noyau formé entre les deux matériaux dissemblables. La poudre Tungtec qui est une poudre à base de NiCrBSi est aussi utilisée dans le but d'avoir un large éventail de propriétés physiques interposé entre l'acier et l'aluminium. Enfin, une poudre de céramique, la MetaCeram de Castolin-Eutectic a été utilisé pour avoir l'effet inverse de la poudre de CuSn, à savoir baisser la conductivité électrique à l'interface acier/aluminium.



Figure IV 7 : soudage acier /aluminium

Les figures 8, 9, 10 et 11 regroupent les résultats du soudage par résistance par point de l'acier/aluminium avec interposition d'une poudre respectivement de NiCrAlSi, NiAlMo, NiCrBSi (Tungtec) et $\text{CrO}_3\text{O}_2\text{TiO}_2$ (MetaCeram).

Il est évident que le noyau obtenu après soudage par résistance par point est présent dans toutes les éprouvettes. Il est de forme arrondi, d'un diamètre d'environ de 8 mm, valeur constatée pour pratiquement toutes les éprouvettes. La tôle d'aluminium n'est pas perforée et il n'y a pas eu d'expulsion de la matière comme c'était le cas pour le couple acier/aluminium sans poudre interposée.

Il faut noter aussi que les poudres de NiAlMo et NiCrAlSi s'accrochaient plus au substrat d'acier que celui de l'aluminium. Cependant, c'est avec la poudre NiCrAlSi que nous avons obtenu le meilleur résultat. Selon la figure 5 ci-haut, la formation du noyau dans le cas de la poudre NiCrAlSi semble mieux générée.



Figure 8: soudage acier /aluminium par poudre de NiCrAlSi.

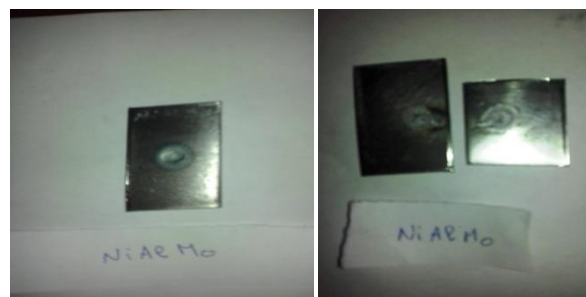


Figure 9 : soudage acier /aluminium par poudre NiAlMo.

Comme nous l'avons signalé précédemment, la présence du Si réduit le taux de la couche intermétallique Fe_5Al_2 . Cette inhibition de la croissance de la couche IMC a été attribuée à la réduction de la mobilité atomique causé par la présence du Si et donc gêner la croissance des IMC. Dans ces deux cas, nous pensons qu'il y a eu seulement un brasage dans les cas étudiés.

L'arrachement à la main ou à l'aide d'un tournevis était impossible. Nous avons découpé les éprouvettes à la guillotine mécanique et là les éprouvettes se sont détachées. Sur les photos des figures 8, 9 et 10, le côté gauche représente la photo du couple acier/aluminium soudé et celle de droite représente les éprouvettes arrachées après découpe à la guillotine.

Pour la poudre de Tungtec qui est à base de NiCrBSi, le noyau est aussi présent, bien rond avec un diamètre proche de 8 mm. Curieusement, la poudre interposée semble mieux adhérent à l'aluminium plutôt qu'à l'acier. L'arrachement à la main était impossible et le découpage à la guillotine a séparé difficilement les deux plaques. Nous pensons que la composition chimique de la poudre d'interface joue un rôle important dans le soudage par résistance par point. Cet aspect de la question doit être approfondi en jouant notamment sur:

- a) **l'épaisseur du revêtement**
- b) **la distribution granulométrique de la poudre**
- c) **les paramètres opératoires du soudage par résistance par point.**

résultats et discussion

Nous croyons qu'un contrôle précis de ces paramètres donnera de très bons résultats qu'au soudage par résistance par point du couple acier/aluminium. Il est dommage que nous n'avons pas pu voir au microscope optique le noyau en coupe ainsi que la zone affectée thermiquement de ces cas là à cause de la séparation des éprouvettes au découpage à la guillotine. L'arrachement difficile du couple acier/aluminium avec une poudre de NiCrBSi interposée suggère qu'il ya eu probablement un soudobrasage des deux tôles.



Figure IV 10 : soudage acier /aluminium par poudre de Tungtec.

Dans le cas du soudage par résistance par point du couple acier/aluminium par poudre interposée en céramique $\text{CrO}_3\text{O}_2\text{TiO}_2$ (MetaCeram), nous avons déposé trois couches de différentes épaisseurs sur l'éprouvette d'aluminium seulement. Le but était d'interposer entre l'acier et l'aluminium un matériau mauvais conducteur afin de diminuer la disparité qui existe entre les conductivités thermiques des deux matériaux. La variation de l'épaisseur de la couche de céramique était nécessaire afin de ne pas isoler complètement l'aluminium de l'acier.

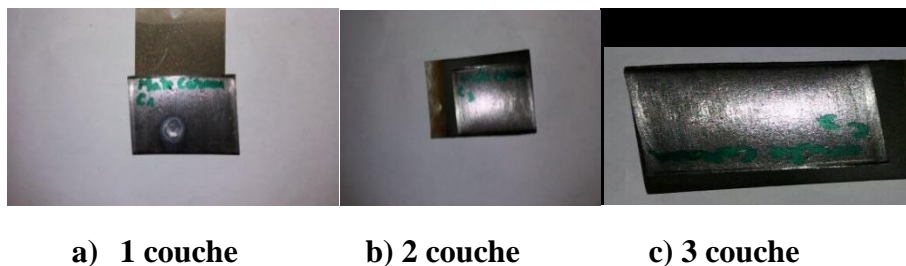


Figure IV 11 : Soudage acier / aluminium / revêtement MetaCeram interposé.

La déposition des revêtements céramiques s'est faite avec une torche CastoDyn 8000 sur des éprouvettes d'aluminium. La distance de projection était maintenue à environ 150 mm et un jet d'air comprimé était soufflé sur le dépôt durant la déposition.

résultats et discussion

La première couche s'est faite après un passage rapide de la torche sur le substrat d'aluminium. Le revêtement obtenu était dispersé sur le substrat sans pour autant remplir complètement sa surface. Des portions de l'éprouvette d'aluminium étaient complètement dénudées.

La deuxième expérience de projection thermique avec la MetaCeram s'est faite avec une déposition de deux couches de revêtement (30 μm épais) et qui a complètement couvert le substrat d'aluminium.

La troisième expérience de projection thermique avec la MetaCeram s'est faite avec une déposition de trois couches de revêtement (50 μm épais). L'éprouvette d'aluminium était évidemment complètement recouverte de céramique.

D'après la figure 11, nous remarquons clairement la formation d'un noyau dans le couple acier/aluminium. Dans les cas où les revêtements ont recouvert complètement l'éprouvette d'aluminium, il n'y a eu soudure ou brasage, le courant ne passait plus car le revêtement de céramique devenait une barrière thermique.

Bien que dans le premier cas, un noyau s'est formé, les deux tôles ont été détachées à la main. Il n'y a eu donc qu'un brasage partiel et léger entre le couple acier/aluminium. Même si cette expérience n'était concluante, il est intéressant de noter que dans ce cas, avec la présence partielle de particules de céramique sur l'éprouvette d'aluminium, il n'y a pas eu de perforation de l'aluminium ni d'expulsion. Pour cela, cette piste devrait être poursuivi pour aboutir, peut être, à une juste dose de la céramique qui permettrait de souder le couple acier/aluminium correctement.

Lorsque le revêtement céramique devient épais, il devient une barrière thermique qui s'oppose au passage du courant. Les photos des éprouvettes soudées avec une telle épaisseur indiquent clairement qu'il y a eu aucune réponse des tôles vis à vis du soudage notamment avec une troisième couche (50 μm épais) de céramique.

- **Projection thermique des poudres à base de nickel :**

A la lumière des résultats obtenus lors du soudage par résistance par point du couple acier/aluminium/poudre céramique interposée avec différentes épaisseurs du revêtement, nous avons entrepris de faire le même travail avec les poudres de NiAlMo et NiCrAlSi. Les figures 12 et 13 représentent le soudage du couple acier/aluminium avec respectivement une poudre NiAlMo interposée et une poudre NiCrAlSi interposée.

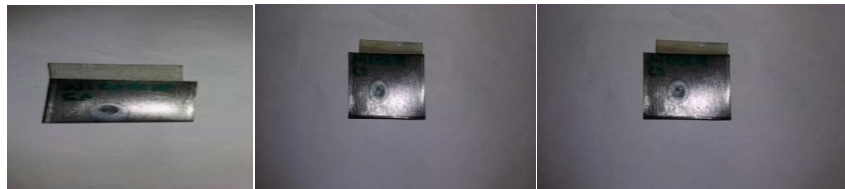


a) 1 couche

b) 2 couche

c) 3 couche

Figure IV 12 : soudage acier /aluminium par revêtement [NiAlMo].



a) 1couche

b) 2 couches

c) 3 couches

Figure IV 13 : soudage acier /aluminium par revêtement [NiCrSiAl].

Les conditions de déposition de ces revêtements étaient identiques à celles réalisées avec le revêtement céramique. Nous avons constaté que pour les trois épaisseurs de revêtement de NiAlMo et NiCrAlSi, il y a eu un brasage dans les éprouvettes avec formation d'un noyau. Cependant la solidité de la soudure diminue au fur et à mesure que l'on augmente l'épaisseur du revêtement. Selon les photos de la figure 12 et 13, il semble que le revêtement est évacué vers l'extérieur du noyau et forme une couronne autour de celui-ci. Cette couronne paraît plus dense avec l'augmentation de l'épaisseur du revêtement. Il est possible, que plus l'épaisseur du revêtement augmente, plus la couronne autour du noyau devient importante et plus le soudage par résistance par point du couple acier/aluminium/poudre interposée devient difficile. Il est possible que la présence de la couronne détourne une partie du courant laissant moins de courant nécessaire pour la formation du noyau. Ce phénomène a été déjà observé dans d'un revêtement lors d'un soudage par résistance par point d'un acier/acier/revêtement zinc [34].

Pour avoir une idée sur l'influence des revêtements à l'interface des deux tôles, la figure 14 montre schématiquement deux tôles en contact T1 et T2 serrées par l'intermédiaire de deux électrodes de cuivre à travers lesquelles circule un courant de soudage alternatif de forte intensité. Le courant électrique traverse alors trois interfaces: S1 et S2 représentent les contacts électrode-tôle et S3, le contact tôle-tôle. Du point de vue électrique, l'assemblage électrodes et tôles est équivalent à une somme de sept résistances séries de deux types: les résistances ohmiques et les résistances de contact. [11]

•Résistances ohmiques:

- R1 et R7 représentent les résistances ohmiques des électrodes de cuivre caractérisées par leurs bonnes conductivités électriques.
- R3 et R5 sont les résistances ohmiques représentatives des tôles en acier. De façon générale, la résistance ohmique se définit comme:

$$R = \frac{l}{\sigma \cdot S}$$

Où σ est la conductivité électrique du matériau (fonction de la température), S la section de passage du courant et l , la longueur du tube de courant.

- Résistance électrique de contact:
- R2 et R6 représentent les résistances électriques de contact au niveau de l'interface électrode-tôle.
- R4 est la résistance électrique de contact à l'interface tôle-tôle. Cette résistance de contact est la plus élevée et est le siège d'un dégagement de chaleur important Q , où débute la formation du noyau fondu.

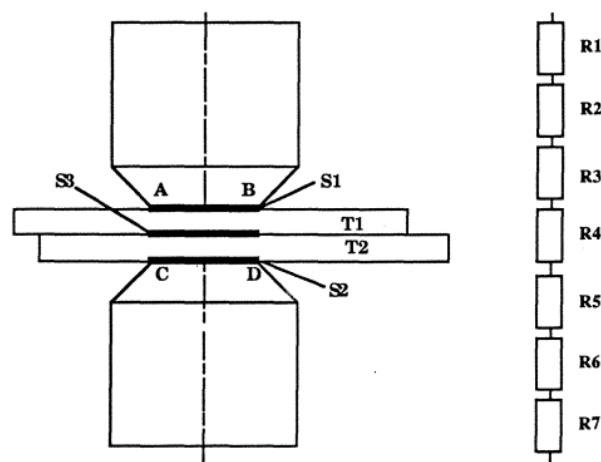


Figure IV 14: Circuit électrique série représentatif de l'assemblage électrodes et tôles
[19]

En pratique, on tient compte d'une résistance générale du montage appelée résistance dynamique globale exprimée par : $R_{dynG} = U_s / I_s$. Elle est déterminée en fonction du temps grâce à la mesure de la tension de soudage U_s aux bornes des deux électrodes et de l'intensité de soudage I_s relevée durant le cycle de soudage. [19]

Durant le cycle de soudage, deux phénomènes principaux interagissent avec l'augmentation de température. Il s'agit d'une part de la diminution des résistances de contact électrode-tôle et tôle-tôle et de l'augmentation des résistances ohmiques de la tôle d'autre part. Les cinq phases principales apparaissant durant la formation du point soudé sont les suivantes:

- enfoncement de la surface et effondrement des aspérités;
- augmentation de la résistivité des tôles avec la température;
- formation du noyau fondu;
- cassures mécaniques; - expulsion.

Cependant ces phénomènes deviennent plus complexes si un revêtement est interposé entre les deux tôles. Les figures 15 et 16 illustrent très bien ces différences dans le cycle de soudage

par résistance par point respectivement de deux tôles soudées sans revêtement et avec revêtement.

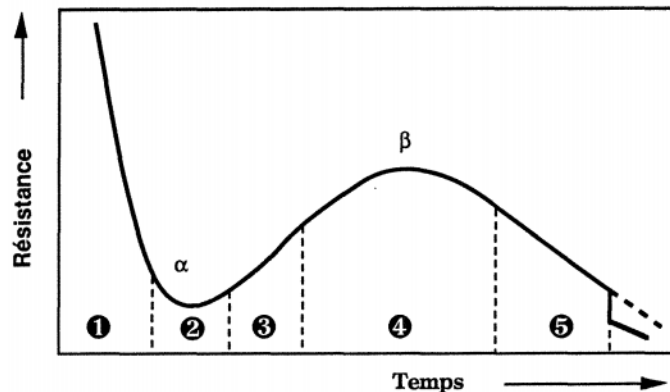


Figure IV 15: Courbe type de résistance électrique dynamique globale d'un acier non revêtu

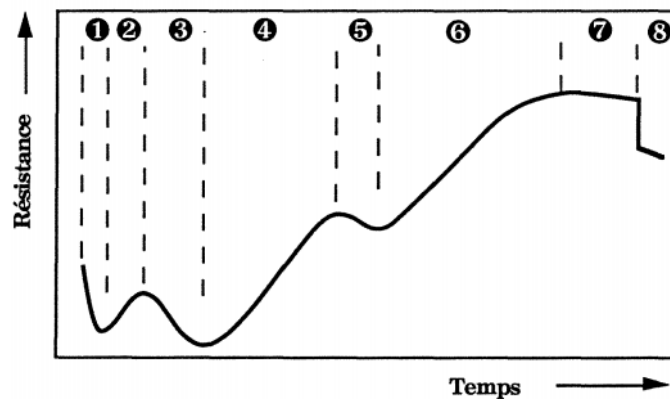


Figure IV 16: Courbe type de la résistance électrique dynamique globale d'un acier revêtu de zinc. [40]

En résumé, ce qui caractérise la différence de l'allure entre ces deux courbes c'est la fusion du zinc qui provoque un échauffement important du volume de métal entraînant une diminution rapide de la résistance de contact provoquée par le zinc fondu. On observe alors une augmentation linéaire de la R_{dynG} [40]. Sans entrer dans les détails de ces phénomènes, ce que nous retenons ici, c'est que la présence d'un revêtement comme troisième matériau dans le soudage par résistance par point modifie complètement les caractéristiques thermiques du soudage par résistance par point.

IV-5 Soudage acier galvanisée /aluminium

Comme expliqué précédemment, nous avons voulu exploité la présence d'un troisième matériau pour le soudage du couple acier/aluminium dans l'espoir de modifier la cinétique du soudage par résistance par point afin, peut être, arriver à une soudure saine.

résultats et discussion

Ainsi, l'utilisation d'un matériau d'apport Al-12Si, sous forme de fil déposé sous le faisceau laser, modifie la nature de la couche de réaction formée, qui est alors constituée d'intermétalliques ternaires Fe-AlSi. Ce matériau d'apport, de composition proche de l'eutectique, a été choisi pour favoriser la fusion de l'aluminium, et donc pour tenter de réduire l'apport d'énergie. Les couches de réaction formées sont alors d'épaisseur inférieure à 2 microns, quelque soient les conditions d'assemblage, et ne sont jamais fissurées. L'épaisseur de couche de réaction plus fine obtenue pour ces assemblages est attribuée à la présence de silicium dans l'aluminium fondu, qui accélère la vitesse de dissolution du fer et des intermétalliques [39].

Des expériences similaires sur des aciers galvanisés ont amélioré sensiblement la soudure par résistance par point du couple acier/aluminium.

Ces observations expérimentales nous ont conduit à galvaniser et à aluminiser nous même nos éprouvettes d'acier en faisant varier l'épaisseur des revêtements et vérifier par la suite la soudabilité du couple acier/aluminium.

Malheureusement, les revêtements de zinc n'étaient pas uniforme et leur surface était irrégulière. Nous avons quand fait des essais de soudage par résistance par point sur ces échantillons. Les résultats ont montré que seul l'acier revêtu avec un revêtement de 10 μm a donné une bonne soudure; ici, nous qualifions la bonne soudure par la tenue de cette dernière à l'arrachement de la main et à la découpe de la guillotine manuelle.

La figure 17 montre une coupe transversale du point de soudure de l'acier revêtu avec du zinc d'une épaisseur de 10 μm . Il est à noter que cette valeur de l'épaisseur représente une moyenne de la surface revêtue et non pas une valeur fixe.

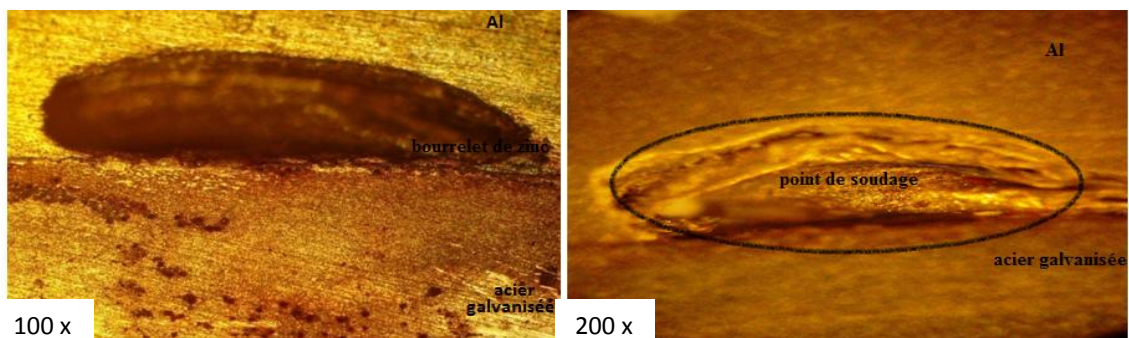


Figure IV 17 : Soudage acier/aluminium/revêtement de zinc [100 X].

Nous distinguons la présence d'un noyau formé à l'interface acier/aluminium. Durant la formation du point, le zinc à l'interface tôle-tôle fond et est radialement évacué de la zone fondue vers l'extérieur pour former un anneau de zinc qui encercle le noyau fondu. Cet anneau détourne le courant autour de la zone du point soudé, laissant ainsi moins de courant pour la formation du noyau. Pour les tôles revêtues, une intensité plus importante est par conséquent nécessaire pour générer la soudure. De plus, le zinc fondu apparaît également au niveau de l'interface électrode-tôle. A ce moment, sous l'effet de la pression et de la température élevée,

une partie du zinc diffuse dans l'électrode de cuivre. Il en résulte alors que les caractéristiques électriques, la forme de l'électrode ainsi que les paramètres de soudage changent [34]. Après chaque, nous devons nettoyer les électrodes pour enlever le dépôt de zinc.

IV-6 Soudage acier galvanisée industriellement /aluminium

Dans cette expérience, nous avons voulu comparé les précédentes expériences basées sur le trempage de l'acier dans un bain liquide de zinc réalisé au laboratoire LTSM avec celle d'une galvanisation d'un acier faite à Baticim (société nationale de galvanisation de Oued Smar). Le résultat du soudage par résistance par point du couple acier galvanisé/aluminium est montré à la figure 18. Il y a absence de noyau. Nous obtenons juste un collage entre les deux tôles qui se séparent facilement en insérant un objet métallique entre les deux.

Ce résultat confirme simplement les observations faites lors des précédentes expériences qui ont montré l'effet de l'épaisseur du zinc dans la formation du noyau. En général, les galvanisations industrielles sont de l'ordre de 80 μm . Celle de l'acier galvanisé que nous avons utilisé était de l'ordre de 60 μm .

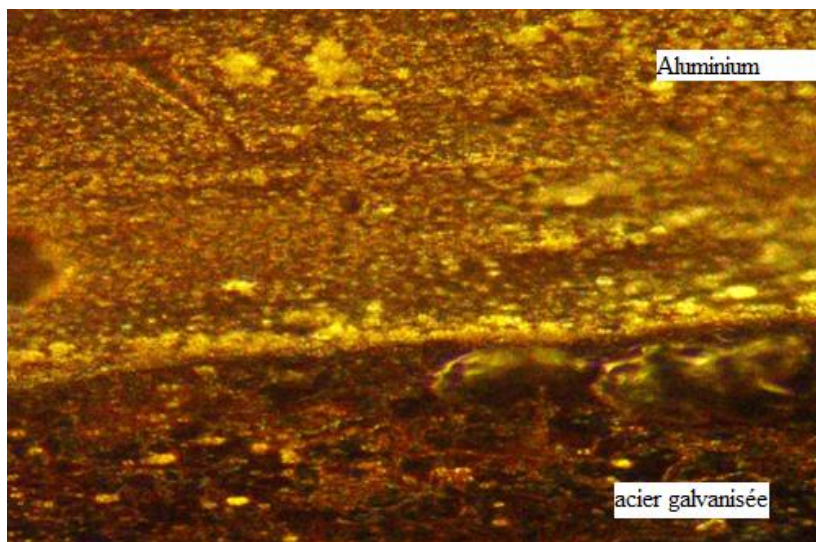


Figure IV 18 : Soudage par point acier galvanisée industriellement/aluminium (200 X).

IV-7 Soudage acier aluminisé/aluminium

Nous appelons un acier aluminisé un acier qui a été trempé dans un bain d'aluminium fondu. Pour cela, nous avons préparé 200 grammes d'aluminium pur prélevé d'une bobine d'aluminium en forme de fil employé dans la projection thermique. Cet aluminium a été fondu dans un creuset en acier fabriqué par nos soins. La température de maintien était au départ fixée à 780 °C durant une demi-heure pour chauffer rapidement le four et la masse du creuset. Ensuite, la température a été ramenée à 700 °C. Malheureusement, le bain s'est complètement asséché et nous n'avons pas pu réaliser ces expériences d'aluminisation.

Afin de compenser cet échec, nous avons interposé entre l'acier et l'aluminium, une feuille d'aluminium commerciale d'une épaisseur de 20 µm et nous avons réalisé un soudage par résistance par point de ces trois matériaux. La figure 19 montre la feuille d'aluminium utilisée et l'aspect des soudures par résistance par point d'un assemblage où la tôle d'aluminium était présentée côté cathode. Nous avons, dans ce cas seulement, inversé par la polarité de l'électrode lors du soudage par point. Ainsi, nous avons tantôt réalisé la soudure côté une fois avec la tôle d'acier présentée côté cathode, tantôt la tôle d'aluminium qui était présentée côté cathode. Ce changement de polarité n'était pas du tout prospecté mais fait pour satisfaire notre curiosité.

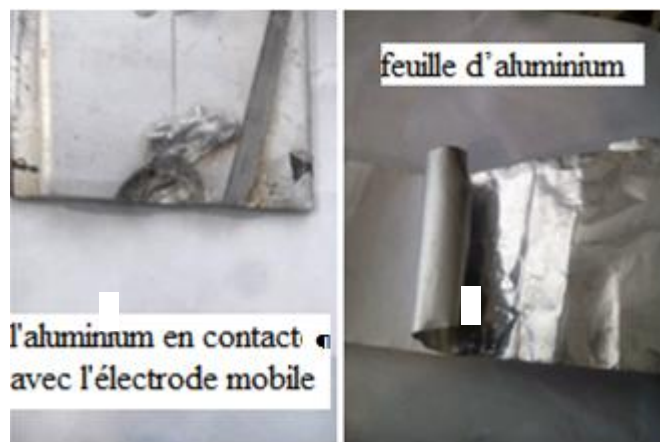


Figure IV 19 : Soudage par point acier/feuille d'aluminium/aluminium.

En général, la soudure forme plus rapidement lorsque la tôle fine est mise à la cathode. On soude avec une intensité plus forte, et par conséquent le diamètre de noyau est plus grand. Cependant, l'apparition de noyau vers un pôle ou une électrode n'est pas évidente, car il existe aussi une influence de la résistivité sur le développement du noyau. Pour une étude approfondie de cet effet, il est nécessaire que les tôles, dont différente épaisseur, soient la même nuance. Celle-ci permet d'éliminer l'influence de la résistivité électrique sur le développement du noyau [21]

résultats et discussion

Dans notre cas, nous disons simplement que les deux cas, il y a eu une fusion importante de l'aluminium. Lorsque ce dernier était présenté à la cathode, il y a une expulsion importante de l'aluminium.

Lorsque la tôle d'acier était présentée côté cathode, comme dans tous les cas étudiés dans ce travail, nous obtenons un brasage entre les deux tôles acier/aluminium. La figure 20 montre une coupe transversale de la soudure par point. La profondeur du noyau est faible.

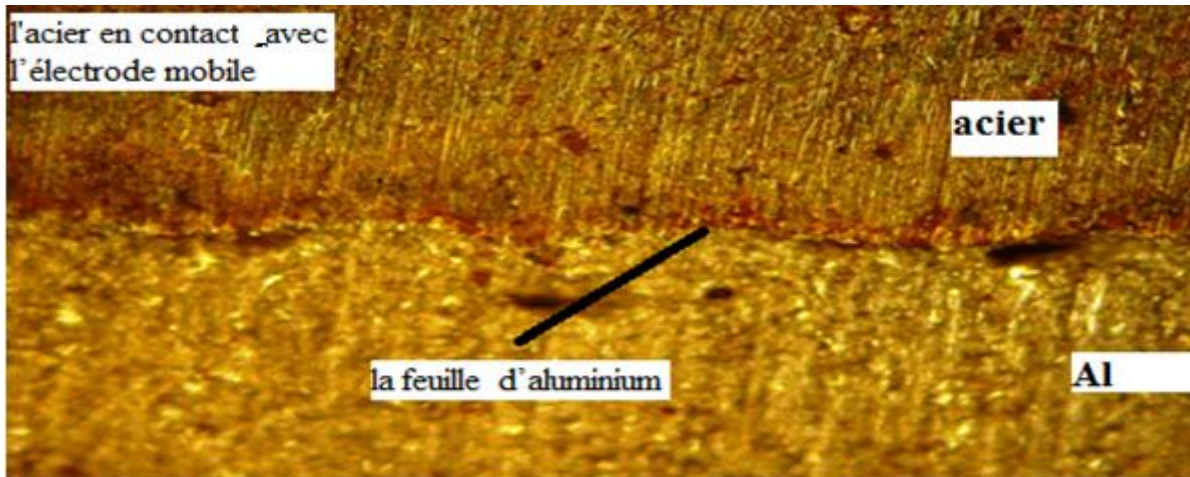


Figure IV 20: Soudage par point acier /feuille d'aluminium/aluminium (200 X).

En l'absence d'une étude plus poussée, nous nous limitons à une description qualitative du phénomène.

IV-8 Soudage acier galvanisé/feuille d'aluminium/aluminium

Enfin nous avons réalisé une combinaison acier galvanisé/aluminium avec une feuille d'aluminium interposé. Ici, nous avons plus de quatre matériaux à souder par point. La figure 21 présente qualitativement les résultats de ces essais.



Figure IV 21: Soudage par point acier galvanisé/feuille d'aluminium/aluminium.

résultats et discussion

Une coupe transversale de la soudure par point, montrée à la figure 22 montre qu'il n'y a pas eu de formation d'un noyau mais plutôt une brasure faite à partir du zinc fondu et de l'aluminium.

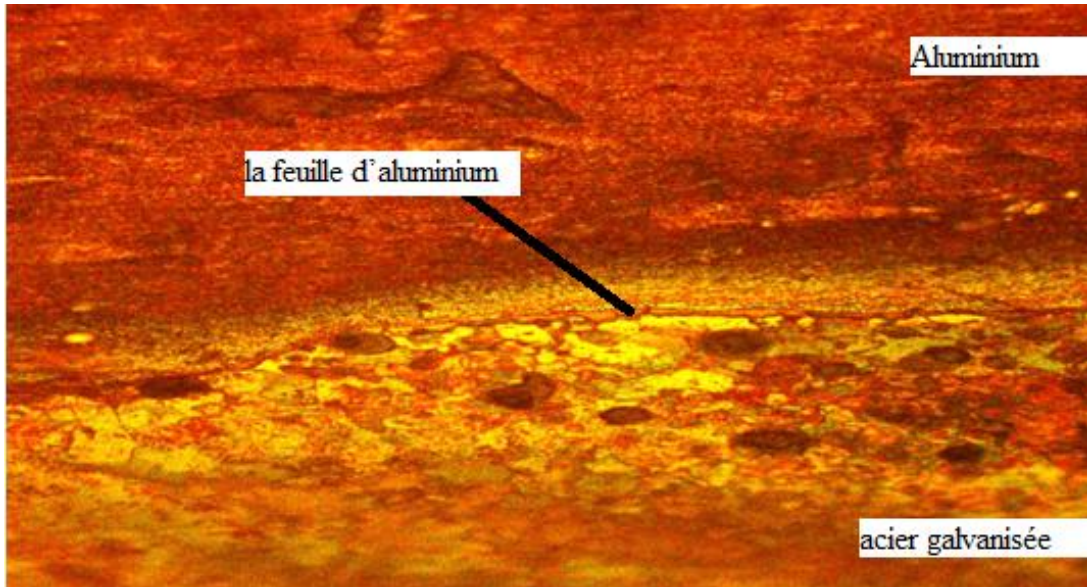


Figure IV 22: Coupe transversale d'un soudage par point d'un acier galvanisé/feuille d'aluminium/aluminium (200 µm).

Sur acier galvanisé, la présence d'une couche de zinc, qui fond dès 419°C, favorise la dissolution de l'alumine superficielle, et le mouillage de l'aluminium devient possible sans l'utilisation d'un flux décapant. L'angle de mouillage est alors plus faible qu'avec l'utilisation d'un flux, et la couche de réaction beaucoup plus épaisse, pouvant atteindre 40 microns. Des porosités sont aussi observées à l'interface lorsque aucun flux n'est utilisé, dues à la vaporisation du zinc. Le flux de brasage, en plus de favoriser la dissolution de l'alumine, semble donc agir à la fois comme une barrière chimique, en retardant la réaction entre l'aluminium et l'acier, et thermique, en limitant le flux de chaleur transmis à l'acier, et donc la température du substrat sur lequel se dépose l'aluminium liquide.[39]

IV-9 Conclusion générale

Le but de ce travail était de vérifier la faisabilité d'un soudage par résistance par point de matériaux dissemblables. Nous avons choisi l'acier couplé à de l'aluminium. A notre grande surprise, la recherche bibliographique a révélé que le soudage par résistance par point du couple acier/aluminium reste un défi majeur pour l'industrie automobile et à ce jour n'est pas encore résolu. Nous avons alors entrepris de prospecter plusieurs solutions possibles et présenter les grandes lignes de ces résultats dans ce modeste travail. Nous avons essayé de souder par point le couple acier/aluminium en interposant :

- a. un revêtement de différente composition déposé par projection thermique tout en modifiant les épaisseurs des revêtements
- b. un revêtement obtenu par trempage de l'acier dans un bain de zinc et/ou d'aluminium
- c. un revêtement de zinc obtenu par galvanisation
- d. une feuille d'aluminium

Les résultats ont montré que:

- 1) Pour le couple acier/aluminium avec un revêtement interposé, l'épaisseur du revêtement important dans la formation du noyau. En général, plus l'épaisseur est importante plus le soudage par point devient difficile. Il est carrément impossible avec une poudre à faible conductivité thermique comme la céramique.
- 2) La présence de zinc déposé électrolytiquement sur une très faible épaisseur suffit à modifier les surfaces de contact électrode-tôle et tôle-tôle. Ces surfaces de contact jouent un rôle prépondérant sur la cinétique du point soudé.
- 3) L'épaisseur du zinc est à contrôler et semble un paramètre important dans la formation du noyau.
- 4) L'interposition d'une feuille d'aluminium n'a pas apporté des résultats significatifs pour ce que cette solution soit retenue.

Une étude plus rigoureuse nécessite la connaissance d'un certain nombre de paramètres tant opératoires que thermophysiques des matériaux. L'évolution des résistances de contact durant le cycle de soudage est un paramètre important qu'il faudra suivre si l'on connaît ses effets lors de l'emploi d'un troisième matériau. Une approche expérimentale est alors nécessaire.

REFERENCES:

- [1] Pouranvari M., "Dissimilar Resistance Spot Welding Of Aluminium/Steel: Challenges And Opportunities", *Materials Science And Technology*, 2017, Vol. 33, No. 15, 1705–1712
- [2.] Robson Jd., *Critical Assessment 9: Wrought Magnesium Alloys*, *Mater Science Technology*, 2015; 31:257–264.
- [3] Meschut G, Janzen V, Olfermann T. Innovative And Highly Productive Joining Technologies For Multimaterial Lightweight Car Body Structures. *J Mater Engineering Permannce, Perform.* 2014; 23:1515–1523.
- [4] Prangnell P, Chen Yc, Wang Y, Et Al., Novel Approaches To Interfacial Reaction Control In Dissimilar Metal Welding Robson, *The 3rd Epsrc Manufacturing The Future Conference*; 2014 Sep 23–24.
- [5] Wagner M, Jahn A, Brenner B, Et Al., Innovative Joining Technologies For Multi-Material Lightweight Car Body Structures. *International Automotive Body Congress (Iabc)*; 2014 Oct 29–30; Michigan.
- [6] Debroy T, Bhadeshia Hkdh., Friction Stir Welding Of Dissimilar Alloys – A Perspective, *Science Technology Welding Joining.* 2010; 15:266–270.
- [7] Schneider J, Radzilowski R., Welding Of Very Dissimilar Materials (Fe-Al). *Journal Of The Minerals, Metals, And Materials Society*, 2014; 66:2123–2129.
- [8] Hussein Sa, Tahir Asm, Hadzley Ab., Characteristics Of Aluminum-To-Steel Joint Made By Friction Stir Welding: A Review. *Materials Today Communication*, 2015; 5:32–49.
- [9]. Rathod Mj, Kutsuna M., Joining Of Aluminum Alloy 5052 And Low-Carbon Steel By Laser Roll Welding, *Welding Journal*, 2004; 83:16s–26s
- [10] Madhavan S, Kamaraj M, Vijayaraghavan L, Et Al., Microstructure And Mechanical Properties Of Aluminium/Steel Dissimilar Weldments: Effect Of Heat Input, *Mater Science Technology*, 2017; 33:200–209.
- [11] Bozzi S, Helbert-Etter Al, Baudin T, Et Al., Intermetallic Compounds In Al 6016/If-Steel Friction Stir Spot Welds, *Mater Science Engineering A.* 2010; 527(16-17):4505– 4509.
- [12]. Potesse M, Schoeberl T, Antrekowitsch H, Et Al., The Characterization Of The Intermetallic Fe–Al Layer Of Steel-Aluminum Weldings. In: Howard Sm, Stephens Rl, Newman Cj, Et Al., Editors, *Epd Congress 2006*. New York (Ny): Curran Associates Incorporated; 2006. P. 167–176.

Référence

- [13]. Matysik P, Józwiak S, Czujko T., Characterization Of Low-Symmetry Structures From Phase Equilibrium Of Fe-Al System – Microstructures And Mechanical Properties, *Materials*. 2015; 8:914–931.
- [14]. Yasuyama M, Ogawa K, Taka T. Spot Welding Of Aluminium And Steel Sheet With Insert Of Aluminium Clad Steel Sheet. *Quarterly Journal Of Japan Welding Society*, 1996; 14:314–320.
- [15]. Li X, Scherf A, Heilmaier M, Et Al., The Al-Rich Part Of The Fe-Al Phase Diagram, *Journal Of Phase Equilibria Diffusion*, 2016;37:162–173
- [16]. Larbi Cherif Mohammed Comportement Mecanique D'assemblages Soudes Par Point (2015/2016) Université De Aboubakr Belkaïd Tlemcen
- [17]. Equipe « Assemblage et contrôles destructifs » du CEWAC
- [18] E.Gauthier^a D. Carron^a P. Rogeon^a P. Pilvin^a C. Pouvreau^a T. Lety^b F.Primaux^c A. Limat^b, Université De Bretagne-Sud, Rue De Saint-Maudé, 56321 Lorient B. Psa Peugeot-Citroën, Drd/Dchm/Cfer/Avrt, Route De Gisy, 78943 Velizy-Villacoublay C. Le Bronze Industriel, Avenue Du Général Leclerc, 51600 Suippes Modélisation Numérique De La Dégradation D'électrodes De Soudage Par Point En Alliage Cu-Cr-Zr (Bordeaux, 26 Au 30 Août 2013)
- [19] Eric Thieblemont The Se Modelisation Du Soudage
Par Resistance Par Points Institut National Polytechnique De Lorraine 4 Septembre 1992
- [20] Chtourou Rim Thèse De Doctorat Tenue Mécanique Des Assemblages Soudés Par Point Multi-Tôles Et Acier Multigrades : Etude Expérimentale, Modélisation Macroscopique Et Procédure D'identification Mécanique
Des Structures [Physics.Class-Ph]. Université De Valenciennes Et Du Hainaut-Cambresis; École Nationale D'ingénieurs De Sfax (Tunisie) Le 15/05/2017
- [21] Chainarong Srikunwong T H E Se (Modelisation Du Procédé De Soudage Par Points) 14 Octobre 2005
- [22] Sierra G, Peyre P, Deschaux Beaume F, et al. Steel to aluminium braze welding by laser process with Al–12Si filler wire. *Sci Technol Weld Join*. 2008;13:430–437.
- [23] Springer H, Szczepaniak A, Raabe D. On The Role Of Zinc On The Formation And Growth Of Intermetallic Phases During Interdiffusion Between Steel And Aluminium Alloys, *Acta Mater*. 2015;96:203–211.
- [24] Richards Rw, Jones Rd, Clements Pd, Et Al. Metallurgy Of Continuous Hot Dip Aluminizing. *Int Mater Rev*. 1994;39:191–212.
- [25] Pouranvari M, Marashi Sph. Critical Review Of Automotive Steels Spot Welding: Process, Structure And Properties. *Sci Technol Weld Join*. 2013;18:361–403.

Référence

- [26] Wan Z, Wang Hp, Wang M, Et Al. Numerical Simulation Of Resistance Spot Welding Of Al To Zinc-Coated Steel With Improved Representation Of Contact Interactions. *Int J Heat Mass Transf.* 2016;101:749–763.
- [27] Qiu Rf, Satonaka S, Iwamoto C. Effect Of Interfacial Reaction Layer Continuity On The Tensile Strength Of Resistance Spot Welded Joints Between Al Alloy And Steels. *Mater Des.* 2009;30:3686–3689.
- [28] Wan Z, Wang Hp, Chen N, Et Al. Characterization Of Intermetallic Compound At The Interfaces Of Alsteel Resistance Spot Welds. *J Mater Process Technol.* 2017;242:12–23
- [29] Chen N, Wang HP, Carlson BE, et al. Fracture mechanisms of Al/steel resistance spot welds in lap shear test. *J Mater Process Technol.* 2017;243:347–354 coated steel with improved representation of contact interactions. *Int J Heat Mass Transf.* 2016;101:749–763.
- [30] Wang J, Wang HP, Lu F, et al. Analysis of Al–steel resistance spot welding process by developing a fully coupled multi-physics simulation model. *Int J Heat Mass Transf.* 2015;89:1061–1072.
- [31] Zhang WH, Qiu XM, Sun DQ, et al. Effects of resistance spot welding parameters on microstructures and mechanical properties of dissimilar material joints of galvanised high strength steel and aluminium alloy. *Sci Technol Weld Join.* 2011;16:153–161.
- [32] Miyamoto K, Nakagawa S, Sugi C, et al. Dissimilar joining of aluminum alloy and steel by resistance spot welding. *SAE Int J Mater Manuf.* 2009;2:58–67.
- [33] Miyamoto K, Nakagawa S, Sugi C, et al. Dissimilar metals joining of steel and aluminum alloy by resistance spot welding – dissimilar metals joining of steel and aluminum alloy by Zn insertion. *Q J Jpn Weld Soc.* 2014;32:83–94.
- [34] TANAKA (Y), SAKAGUCHI (M). -"Electrode life in Resistance Spot Welding of Zinc-plated Steel Sheets", *Int Journal Mater Prod Technol*, Vol 2, pp 64- 74, 1987
- [35] Arghavani MR, Movahedi M, Kokabi AH. Role of zinc layer in resistance spot welding of aluminium to steel. *Mater Des.* 2016;102:106–114.
- [36] Sakiyama T, Murayama G, Naito Y, et al. Dissimilar metal joining technologies for steel sheet and aluminum alloy sheet in auto body. 2013. p. 91–97 (Nippon Steel Technical Report, No. 103).
- [37] Pouranvari M, Abedi A, Marashi P, et al. Effect of expulsion on peak load and energy absorption of low carbon steel resistance spot welds. *Sci Technol Weld Join.* 2008;13:39–43.
- [38] Pouranvari M, Marashi SPH. Failure mode transition in AHSS resistance spot welds. Part I. Controlling factors. *Mater Sci Eng A.* 2011;528(29):8337–8343.

Référence

[39] J.C. Viala, M. Peronnet, F. Barbeau, F. Bosselet, J. Bouix, Interface chemistry in aluminium alloy castings reinforced with iron base inserts, Composites Part A, 33 (2002), p. 1417-1420

[40] • GEDEON (S.A), SORENSEN (C.D), ULRICH (K.T), EAGAR (T.W) "Measurement of Dynamic Electrical and Mechanical Properties of Resistance Spot Weld", Welding Journal, pp 378-385, Décembre 1987.

[41] SARKIS Elias Projet de fin d'étude, Mécanique des structures et systèmes, Machine de soudage à la molette pour les gaines Circulaires Juin 2012

[42] Frédérique ROSSILLON ,Thèse Influence des conditions de soudage sur le comportement en fatigue d'un acier THR Dual Phase soudé par point , 15 Novembre 2007.