

École polytechnique de Louvain

Soudure dissimilaire acier-aluminium par point par fusion de l'aluminium (FMB)

Analyse de l'effet de l'interverrouillage mécanique

Auteur : Cyril SOLLAS

Promoteurs : Thaneshan SAPANATHAN, Aude SIMAR

**Lecteurs : Catherine DONEUX, Thaneshan SAPANATHAN, Aude
SIMAR**

Année académique 2018–2019

Intitulé officiel du master : Master [120] : ingénieur civil des constructions

Résumé

L'objectif de ce travail est de développer un type de soudure dissimilaire breveté à l'UCL, le *Friction Melt Bonding*. Pour un cordon de soudure, celui-ci fait l'objet de nombreuses recherches depuis une petite dizaine d'années. Ce mémoire vise ici à développer ce concept en soudure par point, le ***Friction Spot Melt Bonding***.

L'enjeu majeur des soudures dissimilaires acier-aluminium est de pouvoir réduire au maximum la couche intermétallique qui se forme à l'interface entre les deux métaux. Cette couche néfaste rend la soudure fragile.

Dans le but d'analyser les paramètres qui influencent l'épaisseur de cette couche lors de la soudure, nous avons mis en place un protocole d'essais. Afin de garantir la répétabilité des essais, le processus a été automatisé. De cette manière, les paramètres de vitesses du robot et profondeur de soudures ont pu être analysés indépendamment.

L'analyse des résultats se fait en deux temps. La première étape consiste à réaliser une étude au microscope des soudures. Cette étape permet de mettre en avant les défauts créés et de suivre l'évolution de l'épaisseur de cette couche intermétallique. Les résultats les plus encourageant sont ensuite soumis à des tests mécaniques qui statuent sur la viabilité des paramètres d'essais.

Enfin, des perspectives et recommandations clôturent ce document pour des travaux ultérieurs.

Abstract

The purpose of this master thesis is to develop a type of welding based on a patented UCL process, the Friction Melt Bonding. For a weld bead, it has been the subject of research for the previous ten years. This thesis therefore aims to develop this concept in spot welding, the Friction Spot Melt Bonding.

The major challenge of steel-aluminium welds is to reduce the intermetallic layer that forms at the interface between the two metals as much as possible. This brittleness layer makes the weld fragile. We automatized the testing process in order to analyse the parameters that influence its thickness and nature.

The welds are analysed through microscope, the defects are recorded, as well as the evolution of the intermetallic layer thickness. The most relevant welds are kept and reused and go through mechanical tests to determine if the welds are viable.

Remerciements

Au terme de ce mémoire, je souhaite remercier les personnes qui ont contribué à la réalisation de ce travail, de près ou de loin.

Je voudrais commencer par remercier le personnel académique. Ma promotrice, Madame Aude Simar, m'a accordé ce mémoire alors que je ne fais pas partie de sa faculté. Merci de m'avoir fait confiance et de votre suivi. Mon promoteur, Thaneshan Sapanathan, qui s'est montré très disponible et à l'écoute, répondant rapidement à mes questions. Il m'a suivi à chaque étape de mon mémoire, de la confection des soudures à la préparation des échantillons à observer au microscope. Merci pour les formations à l'utilisation des machines indispensables à la réalisation de mon mémoire, pour les conseils et pour les soirées passées devant l'écran du microscope électronique.

Je voudrais remercier les techniciens du laboratoire qui m'ont fourni le matériel nécessaire à mon mémoire. Merci notamment d'avoir trouvé un support pour mes essais mécaniques.

Je remercie particulièrement mon employeur, Dirk Paerewyck, de m'avoir fait confiance en me donnant un travail, et en m'accordant des congés pour terminer mon mémoire.

Merci à mes colocataires, Jean-Victor, Jean-Baptiste, Jean-Amaury et Jean-Pierre pour leur paroles motivantes, leur patience et la location de la table de la salle à manger.

Merci à Damien et à Claire pour les relectures de ce précieux document. Merci à Morgane pour la main d'œuvre « petit chinois ».

Enfin, je remercie chaleureusement mes parents de m'avoir accompagné, encouragé, supporté et financé pendant mes études. Merci d'avoir toujours cru en moi et de m'avoir fait confiance, même dans les moments les plus critiques, merci d'avoir été un exemple pour moi.

Table des matières

Résumé.....	I
Abstract	II
Remerciements.....	III
Table des matières	IV
Introduction	1
Chapitre 1 Etat de l'art.....	3
1.1. Présentation des procédés FMB et FSW.....	3
1.1.1. Soudage par friction-malaxage - FSW	3
1.1.2. Friction Melt Bonding - FMB	5
1.2. Processus de soudage dissimilaire Fe - Al	6
1.2.1. Soudures à l'état solide.....	6
1.2.2. Soudure par fusion.....	9
1.3. Soudure par fusion de l'aluminium.....	9
1.3.1. Comportement mécanique.....	Erreur ! Signet non défini.
1.3.2. Couche de phases intermétalliques.....	Erreur ! Signet non défini.
1.3.3. Interverrouillage mécanique.....	11
1.3.4. Défauts de solidification [Norberto thesis]	11
1.3.5. Acier enrobé	12
Chapitre 2 Matériaux et démarche expérimentale	13
2.1. Matériaux et propriétés.....	13
2.1.1. Acier biphasé (DP).....	13
2.1.2. Alliage d'aluminium 6061 T6.....	14
2.1.3. Outil de soudure – Carbure de tungstène	16
2.1.4. Différences des propriétés des deux métaux.....	17
2.1.5. Choix de l'interverrouillage mécanique.....	17
2.2. Description du procédé.....	18
2.2.1. Préparation des plaques à souder.	18

2.2.2.	Dispositif mis en place.....	19
2.2.3.	Mode opératoire : automatisation du processus.....	20
Chapitre 3	Analyse de la microstructure.....	22
3.1.	Expérimentation de base.....	22
3.2.	Observations visuelles et aux microscopes.....	24
3.2.1.	Observations visuelles.....	24
3.2.2.	Évolution de la couche d'intermétallique.....	30
3.2.3.	Défauts observés.....	30
3.3.	Analyse des résultats.....	31
Chapitre 4	Essais mécaniques.....	32
Références bibliographiques	37

Introduction

Au XXIème siècle, l'homme voyage comme jamais. Entre les déplacements pour se rendre au travail, pour le loisir ou les échanges de biens, l'homme n'a jamais parcouru une telle distance de son histoire. Que ce soit en voiture, en avion ou en train, de plus en plus de véhicules sont utilisés à travers le monde. Or, l'homme se trouve à la croisée des chemins avec le réchauffement climatique. Il se doit de réduire drastiquement sa consommation énergétique et ses émissions de gaz à effet de serre. Il y a deux moyens d'y arriver dans le cadre des déplacements et des transports : moins se déplacer ou déplacer moins. Ce travail va aider à avancer sur la deuxième solution. Afin de réduire les consommations de carburant, il faut donc réduire le poids des véhicules. De plus, l'amélioration de la sécurité de ceux-ci a fréquemment entraîné une augmentation de la masse de ceux-ci.

Afin d'alléger les voitures (ou les avions), nous essayons de remplacer au maximum l'acier par de l'aluminium qui est beaucoup plus léger. Malheureusement, la résistance mécanique de celui-ci est moindre. Et nous ne pouvons pas sacrifier la sécurité pour augmenter l'efficacité de la voiture.

C'est là où les soudures aluminium-acier interviennent. La réalisation d'assemblage mécanosoudé d'aluminium et d'acier permet de répondre aux contraintes de sécurité pour les passagers et de diminuer le poids total du véhicule. En effet, bien que l'aluminium soit plus cher à produire, le gain sur la vie du véhicule en termes de consommation est réel.

L'objectif de ce travail est de développer un type de soudure dissimilaire breveté à l'UCL, le *Friction Melt Bonding*. Pour un cordon de soudure, celui-ci fait l'objet de nombreuses recherches depuis une petite dizaine d'années. Ce mémoire vise ici à développer ce concept en soudure par point, le ***Friction Spot Melt Bonding***.

Ce mémoire va donc étudier ce type de soudure qui permet notamment d'associer l'acier biphasé 600 et l'alliage d'aluminium 6061 T6. Le DP600 est un acier fortement utilisé dans le châssis des voitures de nos jours (voir figure 1).

Les soudures dissimilaires acier-aluminium, lors de leur réalisation, créent des couches de phases intermétalliques qui rendent l'ensemble fragile. L'objectif du mémoire va donc d'être de caractériser des conditions de soudures optimums afin de

réduire au maximum la couche intermétallique qui se forme à l'interface entre les deux métaux.

Ce document présentera dans un premier temps l'état de l'art sur les soudures dissimilaires entre l'acier et l'aluminium. Différentes techniques y seront expliquées, notamment en termes d'épaisseur de la couche intermétallique. Les matériaux seront également analysés afin de mieux comprendre ce qu'il se passe d'un point de vue atomique lors de la soudure et les influences que cela a sur les propriétés mécaniques macroscopiques.

Dans le but d'analyser les paramètres qui influencent l'épaisseur de cette couche lors de la soudure, nous avons mis en place un protocole d'essais. L'ensemble des séquences est expliqué et motivé. Afin de garantir la répétabilité des essais, le processus a été automatisé. De cette manière, les paramètres de vitesses du robot et profondeur de soudures ont pu être analysés indépendamment.

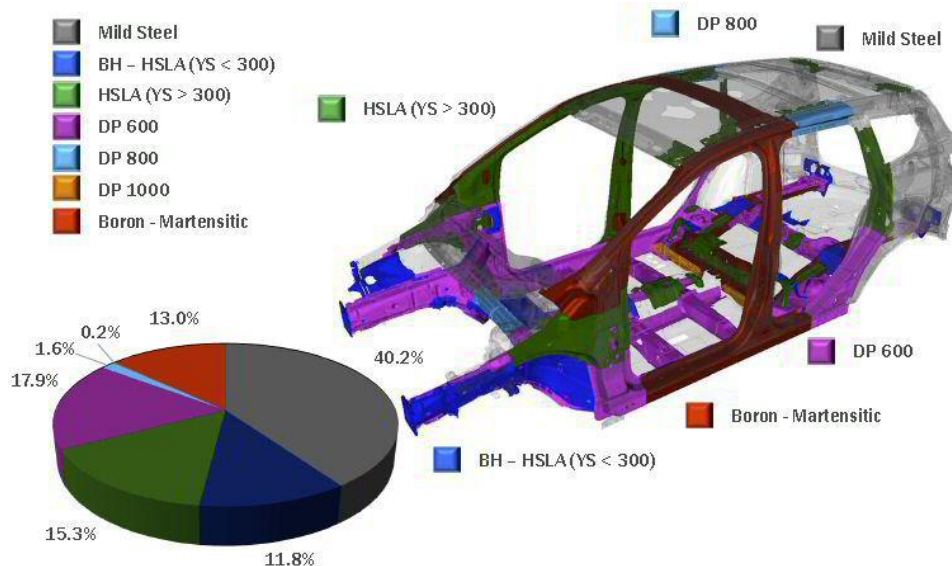


Figure 1 - Répartition des types d'acier dans la composition structurelle d'une voiture
 [Source D.Raabe]

L'analyse des résultats se fait en deux temps. La première étape consiste à réaliser une étude des soudures au microscope. Cette étape permet de mettre en avant les défauts créés et de suivre l'évolution de l'épaisseur de cette couche intermétallique. Les résultats les plus encourageant sont ensuite soumis à des tests mécaniques qui statuent sur la viabilité des paramètres d'essais.

Une discussion sur l'application des essais d'un point de vue industriel sera ensuite présentée. Enfin, des perspectives et recommandations clôturent ce document pour des travaux ultérieurs.

Chapitre 1

Etat de l'art

1.1. Présentation des procédés FMB et FSW

Le soudage par frottement provoquant la fusion ou *Friction Melt Bonding* est une technique de soudure utilisée dans le cadre des soudures entre matériaux hétérogènes, tels que l'aluminium et l'acier. Cette méthode est un dérivé du soudage par friction-malaxage ou *Friction Stir Welding* inventé en Grande-Bretagne au début des années 1990. Cette section présente les principes essentiels du FMB et du FSW.

1.1.1. Soudage par friction-malaxage - FSW

Le soudage par friction-malaxage a été breveté en 1991 par Thomas et al. [1]. Ce système de soudure a d'abord été utilisé pour souder des alliages d'aluminium, et il est actuellement employé pour associer moult matériaux dissimilaires ou à bas point de

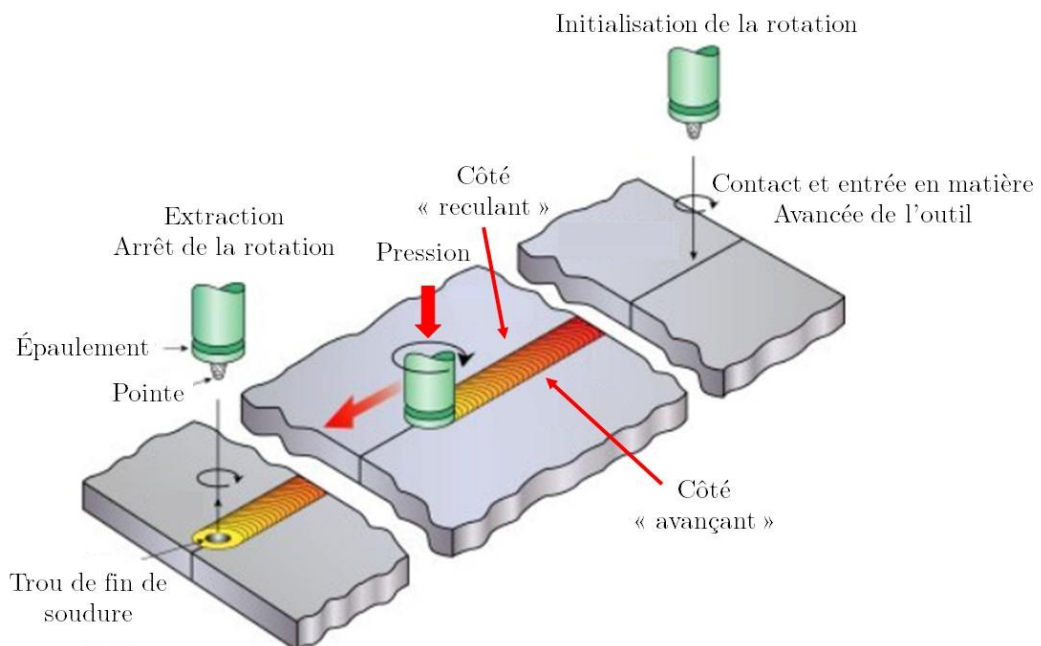


Figure 2 - Schéma du procédé FSW. Modifié d'après [K.FAES]

fusion. Ce type de soudure ne nécessite aucun matériau d'apport ni gaz de protection. Dans le cas étudié, la difficulté d'associer l'acier et l'aluminium réside dans la différence marquée entre leurs propriétés. La disparité de leur coefficient de dilatation et de leur module de Young provoque des contraintes résiduelles importantes qui peuvent fragiliser le cordon de soudure. De plus, la réaction acier-aluminium crée des phases intermétalliques à la jonction entre les deux métaux. L'épaisseur de ces phases est significative pour la ductilité de la soudure car celles-ci sont très fragiles. C'est pourquoi elles sont minutieusement contrôlées.

Le but est donc de minimiser la formation de cette couche intermétallique. Le soudage par FSW propose une soudure « à froid », la température de fusion des matériaux n'est pas atteinte. Ceci permet de limiter la formation des phases intermétalliques néfastes. Sur la figure 3, on peut voir l'outil cylindrique composé d'une pointe centrale. On la place à la jonction entre les 2 métaux pour un joint bout à bout, ou au-dessus d'un recouvrement de plaques. Une fois la pointe en contact, l'outil en rotation provoque de la friction et une augmentation de température, permettant une déformation plastique et la pénétration de la pointe jusqu'à l'épaulement. Grâce au frottement de celui-ci dû à la rotation, un flux de chaleur est généré et un mélange de matière peut opérer. L'outil avance ensuite le long de la ligne de soudure et, sur les premiers centimètres, en refroidissant, la matière se recristallise en grains très fins, conférant à la soudure de bonnes propriétés mécaniques. La soudure terminée, l'outil s'extrait de la soudure et laisse un trou apparent. La rotation s'arrête une fois l'objet hors d'atteinte de la soudure

De multiples recherches ont été effectuées pour améliorer les caractéristiques des soudures par FSW. À la figure 3, on peut voir un aperçu de quelques outils de soudure.



Figure 3 - Exemple d'outil servant à des soudures de type FSW

1.1.2. Friction Melt Bonding - FMB

Cette nouvelle technique a été développée et brevetée à l'UCL au début des années 2010 [Source Norberto Thesis] dans le but de souder des matériaux ayant des températures de fusion très différentes comme dans le cas des soudures acier-aluminium. Le soudage par fusion de l'aluminium est un système de soudure qui ne mélange pas les deux métaux.

La figure 4 illustre le procédé. L'outil est également cylindrique et avance à une vitesse donnée pour former un cordon de soudure, mais se termine par une section circulaire plane. Contrairement au FSW qui est généralement sollicité pour des cordons de soudure entre deux plaques bout à bout (butt joint), le FMB fonctionne pour un recouvrement de plaques (lap joint). Le frottement de l'outil en rotation procure de la chaleur au matériau ayant le plus haut point de fusion. Cette chaleur est transmise à la plaque inférieure qui entre partiellement en fusion et se colle à la plaque supérieure en refroidissant. La plaque de support sert à protéger la table de la machine en cas de chauffe trop importante. La composition de cette plaque influence la manière dont la chaleur accumulée va se dissiper. Entre les deux métaux, une couche intermétallique se forme, résultant de la réaction entre l'aluminium en partiellement en fusion avec l'acier solide. Pour faciliter le déplacement de l'outil en contact avec l'acier et assurer un meilleur contact de frottement, l'outil présente un angle d'inclinaison par rapport à la verticale, dans le sens opposé à la direction de soudure.

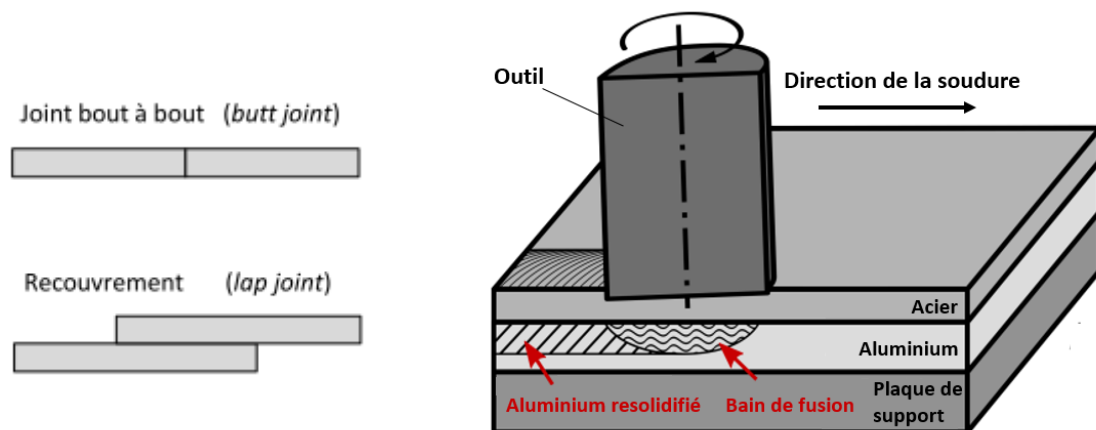


Figure 4 - Gauche : illustration des configurations de joint de soudure.
Droite : Représentation schématique du procédé FMB (modifié d'après N. Jimenez-Mena)

L'un des avantages majeurs du FMB est la simplicité de l'outil. Plus lourd, plus résistant et de forme particulière (pointe centrale, épaulement), celui du FSW est

beaucoup plus couteux. De plus, pour le FMB, le bain de fusion est confiné à l'interface entre les deux métaux. Ceci permet de le garder à l'abri de l'atmosphère sans apport de gaz de protection.

1.2. Processus de soudage dissimilaire Fe - Al

Les techniques de soudure acier-aluminium sont multiples. Elles sont classées en deux grandes catégories : les procédés de soudage à l'état solide et ceux où la température atteinte provoque la fusion de l'aluminium (entre 660°C et 1480°C). À l'état solide, les matériaux restent en dessous de la température de fusion de l'aluminium (660°C). Trois types de géométrie de soudure sont principalement développés : le joint entre deux plaques côte à côte (butt joint), le joint de recouvrement (lap joint), ainsi que la soudure par point (spot), où les plaques sont l'une sur l'autre avec une soudure en plusieurs points discontinus.

1.2.1. Soudures à l'état solide

- a) *Soudage par diffusion* (Fig. 5.a) : la soudure se pratique pour des joints de recouvrement ou entre deux plaques bout à bout. Sous pression, ces plaques sont chauffées grâce à une bobine d'induction ou dans un four. Le processus peut durer plusieurs heures et la formation de couches intermétalliques est à surveiller.
- b) *Soudage par friction inertielle* (Fig. 5.c) : ce type de soudure est spécifiquement utilisé entre deux échantillons cylindriques. Le principe consiste à mettre un élément en rotation et de les faire entrer en contact pour provoquer de la friction. L'énergie mécanique transformée en énergie thermique entraîne une plastification locale de la matière à l'interface. Une pression supplémentaire est alors appliquée pour procéder au collage des matériaux qui expulse la matière en trop. Cela permet de ne pas utiliser de gaz de protection.
- c) *Soudage par ultrason* (Fig. 5.e) : le principe est identique à la soudure inertielle à l'exception du mouvement de frottement, qui est généré par ultrason.
- d) *Soudage par friction malaxage* (Fig. 5.g) : l'outillage malaxe l'aluminium proche de l'interface avec l'acier. Il va légèrement toucher celui-ci et va générer de la

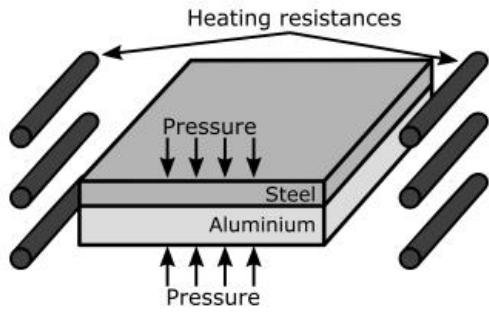
chaleur. Le mouvement de rotation va de plus permettre d'expulser les oxydes de la couche intermétallique.

- e) *Soudage par explosion ou soudage par impulsion magnétique* (Fig. 5.i) : le principe de ce type de soudure est d'accélérer suffisamment la plaque d'aluminium vers la plaque d'acier au moyen d'une explosion ou d'une impulsion magnétique. L'énergie cinétique, étant très importante, crée une interface ondulée entre les deux métaux lors de choc entre les deux éléments. Cette ondulation va créer un verrouillage mécanique en plus de la couche intermétallique.

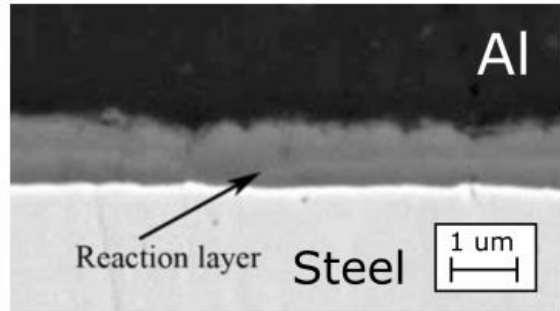
1.2.2. Soudures par fusion

- a) *Soudage à l'arc électrique* (Fig. 6.a) : cette soudure est réalisée à l'aide d'un arc électrique qui apporte la chaleur nécessaire à la fusion du matériau. L'arc électrique est formé entre une électrode et le métal à souder, le tout sous protection d'un gaz neutre. L'apport en métal provient soit d'une baguette d'apport, soit de l'électrode directement. Le métal d'apport peut donc être différent du métal de base. Dans le cas où l'électrode est en tungstène, on parlera de TIG (Tungstène Inert Gas). Cette électrode ne s'érode donc pas pendant le procédé. Si le métal d'apport est fourni directement par l'électrode, on parlera alors de MIG (Metal Inert Gas). Dans le cas d'une soudure hétérogène, ce sont les alliages d'aluminium qui font office de matériau d'apport. Il faut alors faire bien attention à ne pas surchauffer l'ensemble car cela entraîne la création d'une couche intermétallique trop épaisse.

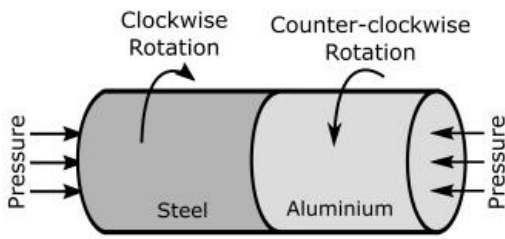
- b) *Soudage au laser par conduction* (Fig. 6.c) : un faisceau laser est dirigé sur l'acier. La chaleur créée dans cette première plaque est transmise par conduction à la plaque d'aluminium. Cette chaleur reçue permet alors à l'aluminium de fondre localement.



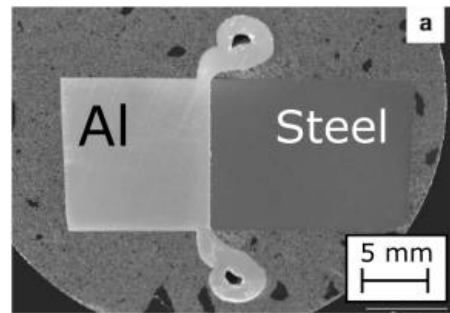
(a) Diffusion bonding



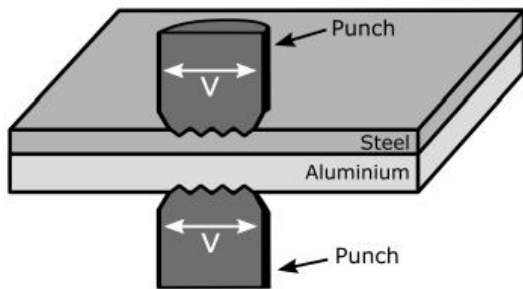
(b) Detail from [22]



(c) Inertia friction welding



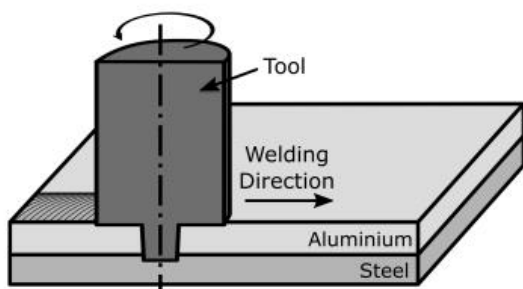
(d) Detail from [23]



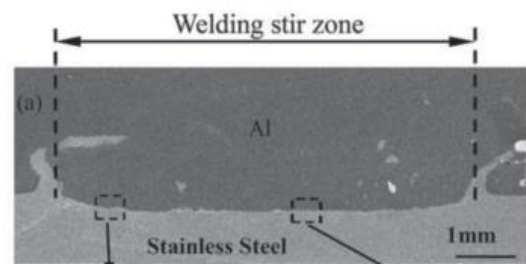
(e) Ultrasonic welding



(f) Detail from [24]

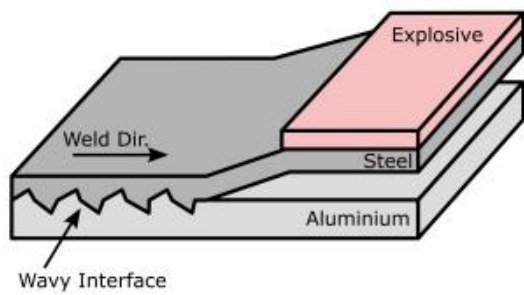


(g) Friction stir welding

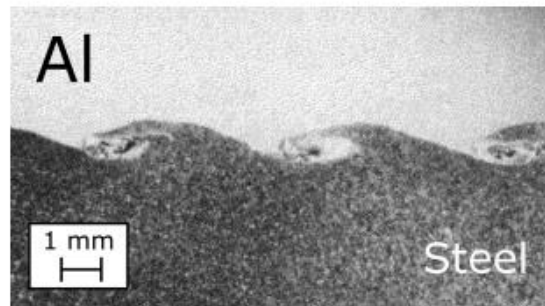


(h) Detail from [25]

Figure 5 - Procédés de soudure à l'état solide. Schémas repris de la thèse de J-M Norberto.

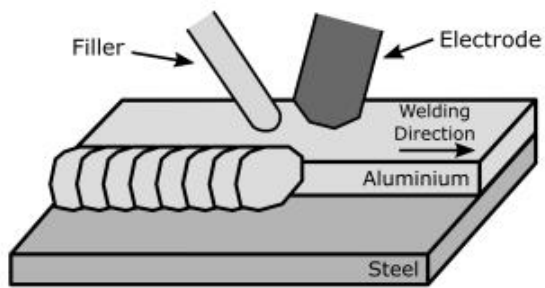


(i) Explosive welding

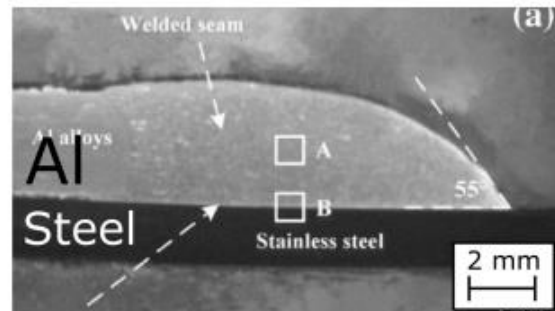


(j) Detail from [26]

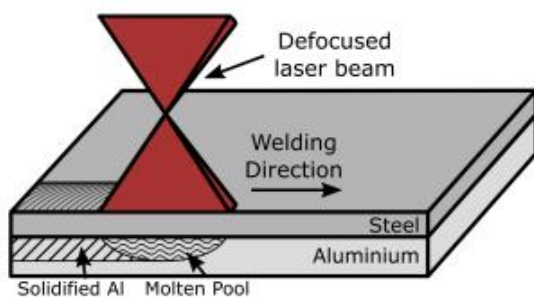
Figure 4 - suite



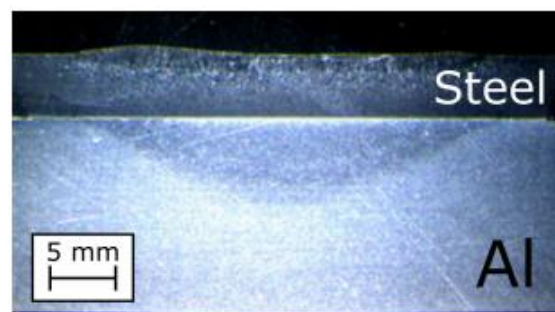
(a) Arc welding



(b) Detail from [27]



(c) Laser welding (conduction)



(d) Detail from [28]

Figure 6 - Procédés de soudure par fusion. Schémas repris de la thèse de J-M. Norberto.

1.3. Soudure par fusion de l'aluminium

1.3.1. Propriétés des phases intermétalliques

A la figure suivante, le diagramme de phase du système Fe-Al est représenté avec les intermétalliques, formés lors du processus, mis en évidence par des couleurs. Ceux-ci sont divisés en deux catégories :

- IM riches en aluminium (bleu) : - FeAl_2 , Fe_2Al_5 , FeAl_3
- IM riches en fer (orange) : - FeAl , Fe_3Al

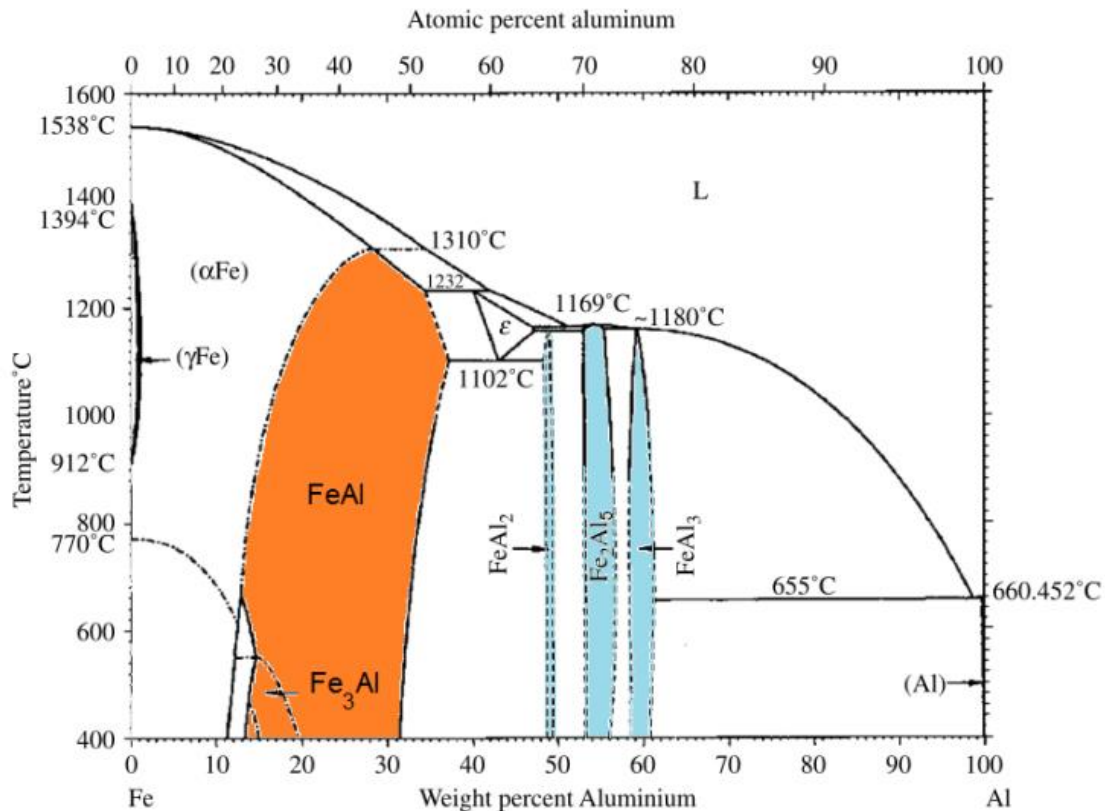


Figure 7 - Diagramme de phase du système binaire Fe-Al repris du mémoire de S.Crusifix, adapté d'après M. Girard. [Source CRUSIFIX + GIRARD]

Nous pouvons constater que l'aluminium est soluble dans le fer pour des concentrations allant jusqu'à 40-45% à très haute température (+/-1300°C). Le fer en revanche n'est presque pas soluble dans l'aluminium. La composition atomique de fer des intermétalliques riches en aluminium tourne autour des 30%. Ces intermétalliques présentent une rigidité et une dureté très élevées. Leur comportement est complètement fragile et ils ne se déforment pas plastiquement. C'est dans cette configuration que nous

nous situons. En effet, les températures maximales n'atteignent pas la température de fusion de l'acier, mais au-dessus de la température de fusion de l'aluminium. Au départ de l'aluminium se forme donc du FeAl_3 et du côté acier se forme du Fe_2Al_5 . Sierra et al. ont remarqué que la phase Fe_2Al_5 possède une épaisseur plus faible que l'autre phase. Son énergie libre de formation est plus grande que celle de la phase FeAl_3 , mais il se forme plus rapidement, formant des « langues » à l'interface avec l'aluminium.

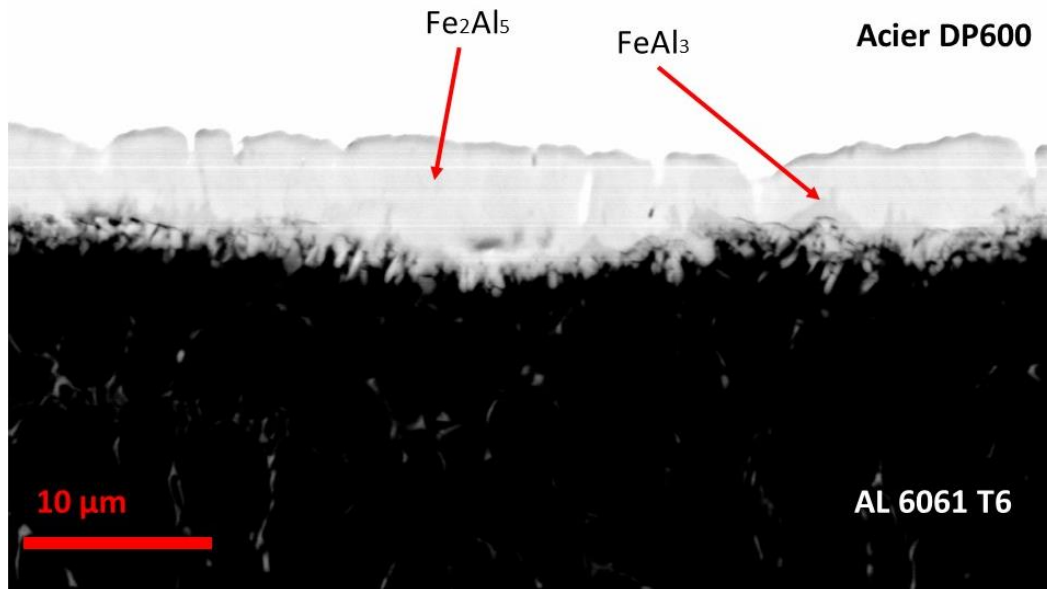


Figure 8 - Illustration de la croissance des phases intermétalliques d'une soudure par fusion de l'aluminium par point. Échantillon SSNC03.

1.3.2. Interverrouillage mécanique

L'interverrouillage mécanique est un système d'amélioration mécanique des soudures utilisé en mélangeant les matériaux comme dans les différents procédés de FSW, ou dans des procédés de soudure plus classiques comme décrit plus haut (soudure par explosion etc.). Le principe est donc de créer plus qu'un plan de contact entre les deux métaux. En jouant sur la géométrie de l'acier, on peut forcer l'aluminium à couler dans des formes préusinées. Ce paramètre sera étudié durant les essais.

1.3.3. Défauts de solidification [J-M. Norberto]

En cas de défaut de solidification, la qualité de la soudure va grandement s'en faire ressentir. Le problème réside de la présence de phase solide et liquide l'une à côté de l'autre. Les différences de viscosité, de densité et de composition des différentes phases peuvent conduire à différents types de défaut de solidification. Les principaux sont des porosités de gaz, des porosités de rétrécissement et de Hot tearing.

Le Hot tearing est un phénomène qui apparaît dans l'état semi solide, il s'agit d'une fissure irréversible. Ces fissures peuvent apparaître pour 3 raisons principales. La première, c'est le rétrécissement du volume lorsqu'on passe du liquide au solide. Le solide prenant moins de place, une fissure apparaît lors de la transformation de phase. La deuxième raison est le refroidissement de la soudure. En effet, en refroidissement la matière va occuper moins de place et peut entraîner l'apparition de trou. Enfin, la troisième raison est le résultat des contraintes appliquées au volume se solidifiant (éprouvettes tenues dans un mord à chien forçant un déplacement de matière vers l'extérieur par exemple).

D'un point de vue microscopique, les hot tears apparaissent et se propagent aux joints de grains liquide de la structure solide. Nous n'avons donc pas assez de liquide pour combler le volume manquant. Ce résultat est dû aux 3 raisons citées plus haut.

Il existe plusieurs techniques pour réduire le risque de voir apparaître le phénomène : jouer sur la vitesse de soudure, imposer des forces de compression pour éviter la formation de cavité, ajouter de la matière supplémentaire de remplissage, jouer sur la microstructure pour empêcher la nucléation des hot tears aux joints de grains.

Les porosités de rétrécissement sont la résultante des mêmes causes que les hot tears mais ne présentent pas la même forme.

Les porosités de gaz sont dues à la différence de solubilité des gaz entre les métaux solides et liquides. Lors du changement de phase, du gaz va être expulsé des métaux, celui-ci peut alors se retrouver au piège au cœur de la soudure et conduire à une porosité.

1.3.4. Acier enrobé

Afin de limiter au maximum la création de phases intermétalliques, un procédé de brasage au zinc a été développé par G. Zhang et al. Ce procédé permet de limiter les intermétalliques en plaçant un filler en zinc entre les deux métaux. Le zinc a été choisi de par sa faible température de fusion et sa faible température d'eutectique. L'apport en température est beaucoup plus important dans les essais de ce travail car l'aluminium est fondu durant le procédé. Au vu des résultats encourageant concernant la réduction des épaisseurs des couches d'intermétalliques, le paramètre de coating de la plaque d'acier doit être étudié lors des essais afin de vérifier si cela a également un impact lors d'une montée en température plus importante.

Chapitre 2

Matériaux et démarche expérimentale

2.1. Matériaux et propriétés

Dans le cadre de ce travail, les matériaux des plaques à souder sont ici l'acier « dual phase » 600 (DP600) et l'alliage d'aluminium 6061 T6. Le tableau suivant présente leur composition déterminée par ICP (Induced Coupled Plasma). Les tableaux originaux peuvent être retrouvés en annexe.

% Wt.	Al	Mg	Si	Fe	Cu	Mn	Cr	Co	Ni	P	Ti	Zn	C _{tot}
DP600 steel	0,03		0,24	97,4	0,01	1,93	0,20	<0,01	0,02	0,02	<0,01	0,01	0,04
AA6061 T6	97,5	0,93	0,56	0,44	0,24	0,05	0,19						

Tableau 1 - Composition des métaux utilisés pour la réalisation de nos soudures.

2.1.1. Acier biphasé 600 (DP600)

Le « Dual Phase Steel » est un acier qui a été développé pour remplacer l'acier à faible teneur en carbone couramment utilisé dans le domaine de l'automobile. Celui-ci est composé d'une matrice de α -ferrite qui contient de « petites îles » de martensite dure. La ferrite va donner le caractère ductile à l'acier biphasé, tandis que la martensite procure la grande résistance du matériau. A la **figure**, un exemple de processus thermique classique d'acier biphasé est décrit. Après un laminage à froid, l'acier est chauffé pour obtenir une double phase de ferrite et d'austénite, subissant ensuite une trempe qui provoque la transformation de l'austénite en martensite.

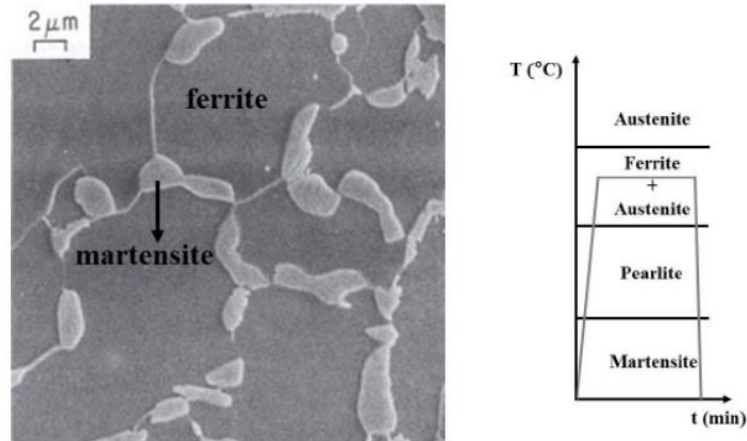


Figure 9 - Gauche : microstructure d'un acier biphasé [G.SPEICH]
 Droite : exemple d'un traitement thermique d'un acier classique pour
 obtenir un acier biphasé [A.PIERMAN]

Les propriétés mécaniques de ce type d'acier vont dépendre de plusieurs facteurs : la fraction volumique de la martensite, sa composition en carbone, ainsi que sa répartition et sa morphologie. Plusieurs classes d'acier biphasé sont donc possibles et sont répartis suivant leur résistance maximale à la traction. Ainsi, l'acier DP600, utilisé dans le cadre de ce mémoire, a une résistance maximale à la traction d'environ 600MPa. À 20°C, l'acier DP600 possède les caractéristiques suivantes : [Investigation of mechanical properties of DP 600steels at elevated temperatures].

Masse volumique	T° de fusion	Module de Young E	Limite d'élasticité	Résistance à la traction max	Déformation	Conductivité thermique
kg/m ³	°C	GPa	MPa	MPa	%	W/mK
7800	≅ 1500	201,40	431	671	22,9	60

Tableau 2 - Propriétés mécaniques de l'acier DP600

2.1.2. Alliage d'aluminium 6061 T6

La particularité qui fait des aluminiums un matériau très utilisé dans les domaines aéronautique et automobile est sa légèreté. Celui-ci est 3 fois plus léger que l'acier. La réduction du poids des éléments permet de diminuer fortement la consommation de carburant. De plus, avec les méthodes de plus en plus sophistiquées, les aluminiums sont traités pour être de plus en plus performants et résistants. Leur utilisation dans les éléments structuraux est donc devenue incontournable (près de 80% de la composition d'un avion [The aluminium story]).

Masse volumique	T° de fusion	Module de Young E	Limite d'élasticité	Résistance à la traction max	Déformation	Conductivité thermique
kg/m ³	°C	GPa	MPa	MPa	%	W/mK
2700	660	70-80	48	115	25	180

Tableau 3 - Propriétés mécaniques de l'aluminium AA 6061 T6

Les aluminiums de la série « 6000 » combinent une bonne solidité, résistance à la corrosion, une excellente usinabilité, et soudabilité. Ils peuvent également être traités thermiquement, ce qui n'est pas le cas d'autres alliages d'aluminium. L'aluminium 6061 est divisé en 22 sous-catégories [6061 Aluminium properties] Le « T6 » est un alliage traité thermiquement pour être vieilli artificiellement. Comme représenté sur la figure 10, ce traitement se déroule en deux parties.

La première est une étape de mise en solution (+/- 1 heure) à 570°C. Pendant cette période, le magnésium et le silicium peuvent diffuser dans la matrice d'aluminium. L'alliage est ensuite trempé pour obtenir une solution solide saturée où la structure des molécules est figée. Homogène, mais fragile, une autre étape de chauffe doit être appliquée à l'alliage pour le rendre plus ductile.

Pour la seconde étape, le vieillissement, l'alliage est monté à 170°C pendant huit heures (la durée dépend de la forme, de la taille et du type d'application), avant d'être refroidi avec une nouvelle trempe.

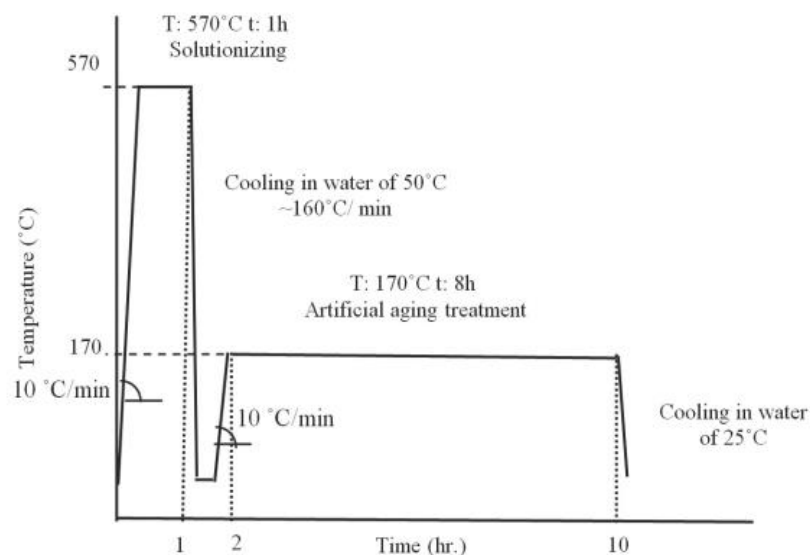


Figure 10 - Cycle du traitement thermique d'un aluminium 6061 T6 [F.Ghavari]

2.1.3. Outil de soudure – Carbure de tungstène

Les soudures se font par le biais d'une machine FSW assez polyvalente. En effet, celle-ci peut servir pour plusieurs sortes de soudure différentes. Il est donc possible d'insérer plusieurs types d'outil dans le « bras » rotatif de l'appareil.

L'outil de notre procédé est en carbure de tungstène. Matériau stable, sa forme cylindrique de 16 millimètres de diamètre lui permet de résister à la compression qu'il subit lors du processus de soudage. Sa température de fusion valant près de 2900°C, il résiste également très bien aux augmentations de température dues aux frottements de l'opération. La base plate ne s'use pas, mais un dépôt de calamine bleuté se forme au fur et à mesure des soudures. Il faut de préférence nettoyer l'outil pour ne pas que la génération du flux de chaleur soit différente entre les tests [S.CRUSIFIX]. Contrairement au cordon de soudure, pour une soudure par point, l'outil ne se déplacera pas horizontalement pendant le processus. L'angle de pénétration de l'outil est de 0°. La vitesse et la profondeur de pénétration seront les paramètres étudiés plus loin. Comme on peut le voir en figure 11, l'outil est symétrique. Celui-ci est donc réversible, les deux extrémités peuvent servir pour souder les éléments.

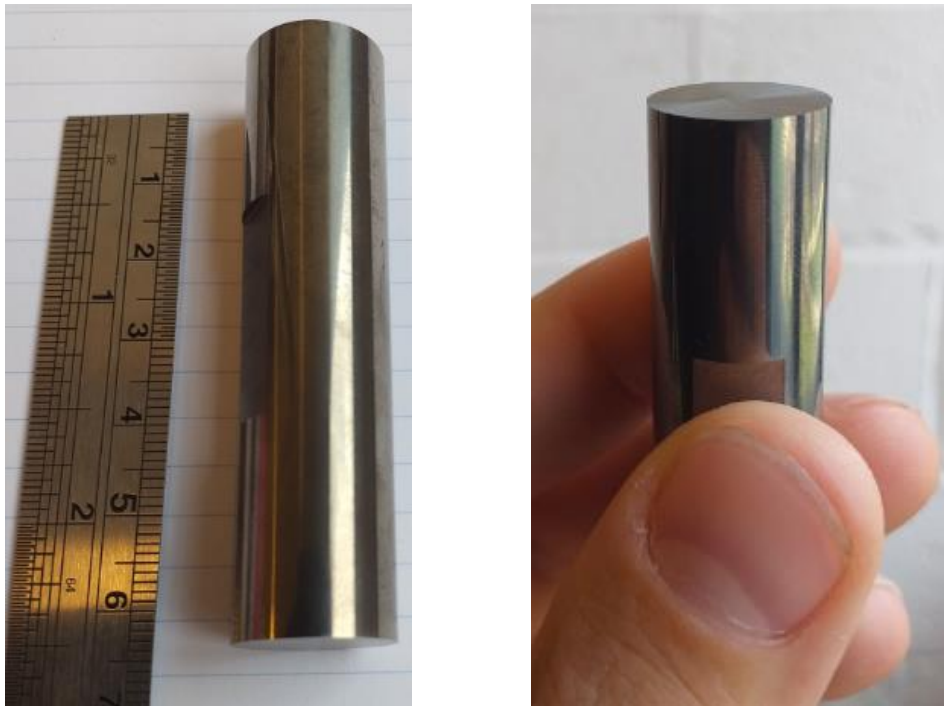


Figure 11 - Photo de l'outil en carbure de tungstène servant au procédé FMB

2.1.4. Différences des propriétés des deux métaux

Les matériaux étant différents, la difficulté de les souder ensemble va découler de leurs propriétés mécaniques. En comparaison directe, on remarque que l'acier est beaucoup plus résistant et possède une meilleure élasticité que l'aluminium, mais il est également trois fois plus lourd. L'importance de choisir le bon matériau est donc primordial pour l'optimisation de sa conception et de son utilisation.

La différence entre les températures de fusion des deux métaux est très marquée. Le procédé FMB a pour objectif d'utiliser cette différence à son avantage. Celle de l'acier étant plus de deux fois supérieure à celle de l'aluminium, le but va être de faire entrer en fusion le métal à plus bas point de fusion (Al) sans atteindre celui de l'acier. L'aluminium va donc se coller à l'acier, minimisant l'énergie procurée tout en gardant une qualité de soudure satisfaisante.

On observe également une différence en termes de conductivité thermique : l'alliage d'aluminium 6061 est 3 fois plus conducteur que l'acier. Cela va entraîner une dissipation de chaleur plus importante dans l'aluminium. Cela va se traduire pour un échauffement plus généralisé de l'échantillon en aluminium au contraire d'un échauffement plus localisé de l'acier.

2.1.5. Choix de l'interverrouillage mécanique

Pendant le processus, l'aluminium va partiellement entrer en fusion. Liquide, il voudra occuper un volume plus important et il provoquera des efforts internes. La pression que l'aluminium liquide peut exercer pourrait être utilisée pour entrer dans des cavités prévues dans l'acier et faire office d'interverrouillage mécanique. Nous tenterons donc d'améliorer la résistance des soudures par point avec un système d'interverrouillage mécanique entre les deux plaques.

Afin d'être certain de l'impact d'un tel système, nous choisissons de perforer la plaque d'acier en plusieurs endroits et à travers toute l'épaisseur de la plaque. Il serait certainement plus efficace de déterminer la profondeur optimale pour garantir l'accroche mécanique, mais le choix a été fait de transpercer l'échantillon en acier afin

de réaliser un POC (Proof of concept). Nous avons choisi de perforent les trous en forme de pentagone pour que la répartition de ceux-ci soit homogène.



Figure 12 – Gauche : Configuration des trous de 1 [mm] percés dans la plaque d'acier. Les dimensions sont en millimètres. Le cercle extérieur représente le diamètre de l'outil de soudure. Droite : modèle à l'échelle d'une plaque d'acier percée.

2.2. Description du procédé

Dans un but de pouvoir comparer les soudures et de pouvoir analyser des variables indépendamment les unes des autres, un code de programmation a été créé (détail en annexe). Ainsi, nous donnons une structure à la mise en œuvre des soudures pour faire varier la profondeur de pénétration et la vitesse de pénétration. Cette partie décrit le code, présente le dispositif installé et le mode opératoire avec les paramètres étudiés.

2.2.1. Préparation des plaques à souder.

L'acier fourni étant enrobé de zinc, la première étape a été de décaper l'enrobage sur plusieurs grandes plaques d'acier. Ces plaques étaient trempées dans une solution d'*HCl* dilué qui a réagi avec le zinc. Sur certaines d'entre elles, le zinc n'a été enlevé que d'un côté pour les tests avec une couche de zinc entre l'acier et l'aluminium. À l'interface avec l'outil, le zinc est retiré car il possède une température de fusion beaucoup plus basse que l'acier. Il salirait l'outil et influencerait l'apport thermique par frottement. Les grandes plaques ont ensuite dû être découpées pour obtenir des languettes de 2,5 centimètres de large sur 8 de long à l'aide d'une cisaille à guillotine. Pour un type de test, certaines languettes d'acier doivent être perforées. Avec une mèche de 1 millimètre de diamètre, des trous ont été forés suivant la configuration présentée à la figure 12. Le cercle représente la section de l'outil de soudure.

Avant chaque soudure, les plaques étaient poncées légèrement pour enlever la fine couche oxydée des matériaux, ou retirer les restes d'acier encore accrocher après avoir

percer les plaques. Elles étaient ensuite nettoyées avec un chiffon imbibé d'acétone juste avant chaque test pour enlever la majeure partie des impuretés.

2.2.2. Dispositif mis en place

La machine utilisée est une FSW-LM-AS16 control 2D. Elle peut exercer une pression de 60 [kN] et monter la rotation de l'outil de soudure à 2000 tours par minutes. Des lumières LEDs peuvent être allumées si nécessaire, et deux caméras permettent d'observer les tests de soudure à tout moment en direct. Des capteurs de pression et de position peuvent transmettre des graphiques d'évolution de ces données. Celles-ci peuvent être enregistrées (avant de commencer le test) et être exportées dans un fichier Excel pour analyse.

Comme nous effectuons des soudures par point, l'outil n'avance pas pendant le processus. Seule la coordonnée z (la profondeur) sera déterminante. Les coordonnées x et y ne varient donc pas lors du test. Une mise au point de leur position était néanmoins nécessaire avant chaque essai pour que la soudure soit faite au milieu des plaques le plus précisément possible. Donc, après serrage des plaques à souder, les positions x -zéro et y -zéro étaient enregistrées manuellement au milieu de la plaque d'acier.



Figure 13 – Gauche : photo de l'espace de travail de la machine FSW.
Droite : boîtier de contrôle où le code était modifié, les données/graphiques observés.

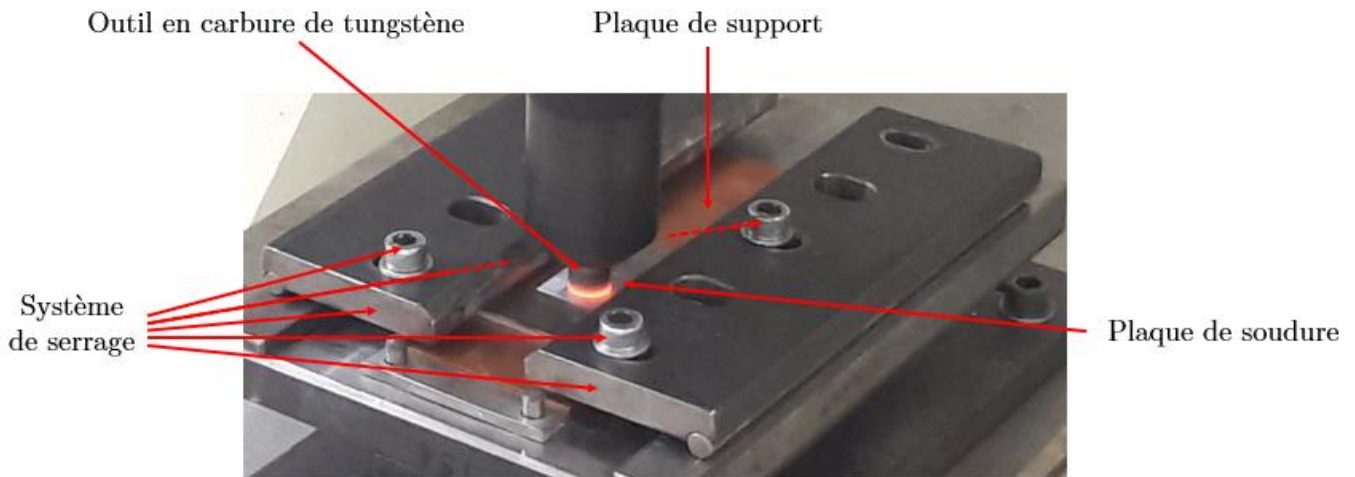


Figure 14 - Photo du dispositif lors d'une soudure.

2.2.3. Mode opératoire : automatisation du processus

En annexe 1, le code présenté en exemple a été la base de l'automatisation du projet. Celui-ci est décrit en détail dans l'annexe. Les étapes générales sont décrites ci-dessous.

- 0) Avant toute rotation, la machine initialise le point z -zéro. L'outil vient toucher la plaque d'acier et applique une pression imposée de 0,4kN sur les plaques à l'endroit de la soudure. La position est alors enregistrée pour commencer la phase de soudure. Ensuite l'outil s'écarte.
- 1) L'outil commence sa rotation. Il atteint les 2000 tours par minute et s'approche de la soudure et il pénètre de 50 [μm] dans l'acier à une vitesse constante de 0,4 [mm/min]. Cette première étape de pénétration est identique pour chaque test pour initialiser la phase de frottement en douceur sans malmener l'outil.
- 2) La deuxième phase de pénétration est celle sujette aux modifications de paramètres. La vitesse et la profondeur de pénétration ont été modifiées pour la confection d'une centaine de soudures. Les tests sont répertoriés dans un tableau en annexe.
- 3) Une fois que l'outil a terminé sa course, celui-ci, toujours en rotation, reste au même au même niveau z durant deux secondes. Cette courte période de stabilisation nous paraissait nécessaire pour éviter un relâchement des efforts de compression trop direct.
- 4) L'outil remonte, laissant une trace circulaire sur la plaque d'acier, et sa rotation s'arrête. Ceci marque la fin du processus de soudure.

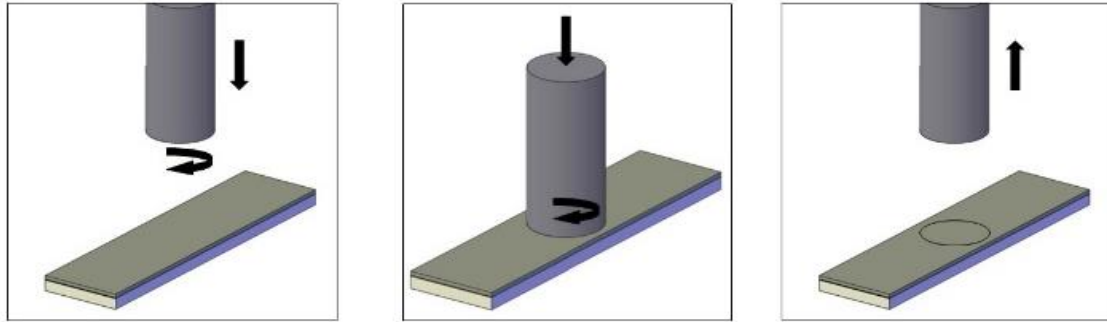


Figure 15 - Schéma descriptif simplifié du processus FSMB.

2.2.4. Micro-découpe et polissage

Une fois les soudures produites, certaines sont sélectionnées pour être observées au microscope. Elles sont d'abord découpées à la micro-tronçonneuse *Struers Accutom 5*. Deux matériaux étant présents, le disque de découpe doit être choisi en fonction du matériau le plus solide : l'acier. La vitesse de découpe est lente au vu de l'épaisseur très fine du disque. A une vitesse de 0,015 [mm/sec], chaque découpe de 27 [mm] prend 30 minutes. Comme illustré à la **figure X et Y**, deux coupes sont nécessaires pour avoir un échantillon de taille adéquate (+/- 0,5 [cm]).

Ensuite, l'échantillon est placé dans une *CitoPress-5* avec de la poudre *PolyFast* conductrice. Nous obtenons des « pralines » observables au microscope électronique à polir à la main du fait de la dureté différente des matériaux. Le polissage avec trois types de papier SiC (papier abrasif en grains de carbure de silicium) avant de passer à la poudre de diamant 1 [µm] est le minimum pour obtenir une surface observable au microscope électronique.

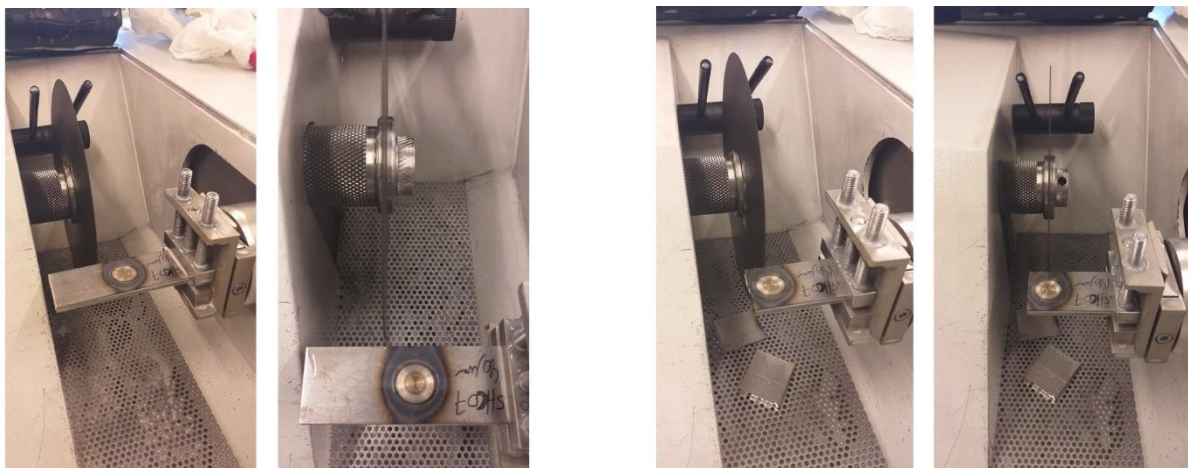


Figure 16 - A gauche, première étape de découpe. A droite, deuxième étape de découpe.

Chapitre 3

Analyse de la microstructure

3.1. Expérimentation de base

➤ Acier DP600 pur et enrobé

Le type d'acier multiplie le nombre de cas par deux. Celui-ci peut être enrobé de zinc (i) à l'interface avec l'aluminium ou pas (ii). Dans les deux cas, l'acier sera pur à l'interface avec l'outil.

➤ Interverrouillage mécanique

L'interverrouillage mécanique est un système d'amélioration mécanique des soudures [da Silva] [Xiong]. Le choix du type d'interverrouillage a été de forer 6 trous dans la plaque d'acier pour que l'aluminium puisse s'écouler dans ceux-ci et être lié physiquement à l'acier. Le nombre de cas est multiplié par deux : acier perforé (i) et acier non perforé (ii).

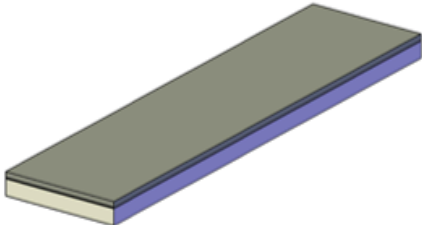
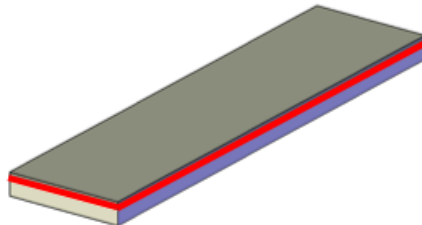
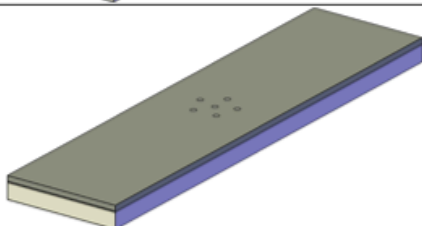
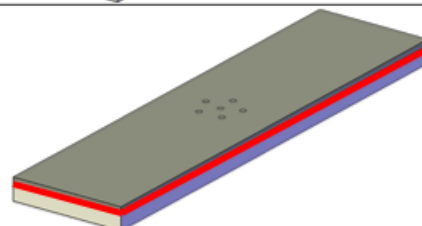
➤ Plaques de support

L'influence de la plaque de support est importante. Elle permettra à la chaleur de se dissiper plus ou moins vite pendant le processus. Trois plaques sont généralement utilisées pour ce type de soudure : l'acier inoxydable (i), le laiton(ii) et le cuivre (iii). Notre nombre de cas est multiplié par trois.

Cuivre	350	W/mK
Laiton	120	W/mK
Inox	14,5	W/mK

Tableau 4 - Conductivité thermique des plaques de support de soudure.
Valeur reprise de *Norbeto thesis*. *SOURCE*

➤ Résumé des cas de base

	Acier non-enrobé	Acier enrobé (Couche de zinc à l'interface de soudure)
Acier non perforé		
Acier perforé (6 trous de Ø1 mm)		

Chaque cas a été testé sur 3 supports différents: cuivre, laiton et inox

Tableau 5 - Résumé du nombre de cas d'expérimentation différents.

Au total, nous avons 12 cas potentiellement viables à développer. Nous sommes conscients du nombre très important de test à observer. Une sélection sera faite au fur et à mesure de nos observations.

Nos échantillons ont été nommés en fonction de leurs caractéristiques dans le tableau. Quatre lettres sont suivies d'un chiffre :

- Les deux premières lettres correspondent à la manière dont l'acier est enrobé à sa surface. La première lettre sera toujours « S » pour « Steel », car le dessus ne sera jamais recouvert de zinc. La deuxième lettre, « S » ou « G » pour Steel ou Galva à l'interface de la soudure.
- La troisième lettre reprend la caractéristique de perforation de l'acier. Un « H » pour « Holes » et un « N » pour « No-holes ».
- Enfin, la dernière lettre sera la première lettre de la matière de la composition de la plaque de soudure. Ainsi, « S » pour « Steel », « B » pour « Brass » et « C » pour « Copper ».
- Le chiffre est simplement le numéro de la soudure dans le cas d'expérimentation concerné.

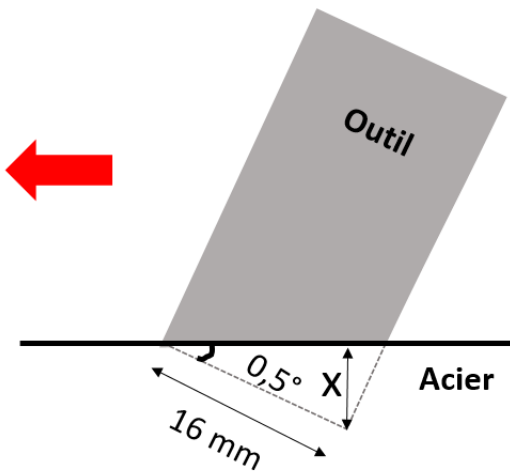
Nous appellerons les cas « classiques » les soudures avec la plaque d'acier non-perforée et non-enrobée sur les trois types de support.

➤ Paramètres initiaux – distance et vitesse de pénétration

Afin d'obtenir des paramètres de base, les précédents tests de cordons de soudure par FMB ont été observés [Norberto Thesis + S. Crusifix]. Pour une soudure par FMB, il est idéalement prévu un angle de $0,5^\circ$ et une vitesse d'avancée minimum de 200 [mm/min] pour l'outil de soudure. Avec le diamètre de l'outil valant 16 [mm], les premiers paramètres ont été calculés :

$$\text{Temps de passage de l'outil :} \quad \frac{16 \text{ [mm]}}{200 \frac{\text{[mm]}}{\text{[min]}}} = 0,08 \text{ [min]} = 4,8 \text{ [sec]}$$

$$\text{Distance de pénétration } x : \quad x = \sin(0,5^\circ) * 16 \text{ [mm]} = 0,140 \text{ [mm]}$$



Les paramètres pouvant être modifiés grâce au code de la machine FSW sont la vitesse et de la distance de pénétration de l'outil. Celles-ci sont déterminées pour obtenir une durée de pénétration équivalente au temps de passage de l'outil lors du processus FSW. En prenant une distance de pénétration de l'ordre de la centaine de microns, la vitesse de pénétration est déterminée :

$$v \text{ [mm/min]} = \frac{0,10}{0,08} = 1,25 \text{ [mm/min]}$$

Figure 17 - Coupe du procédé FMB pour déterminer la plongée de l'outil.

Les tests démarrent avec une distance de pénétration de 100 [µm] et une vitesse de 1,25 [mm/min].

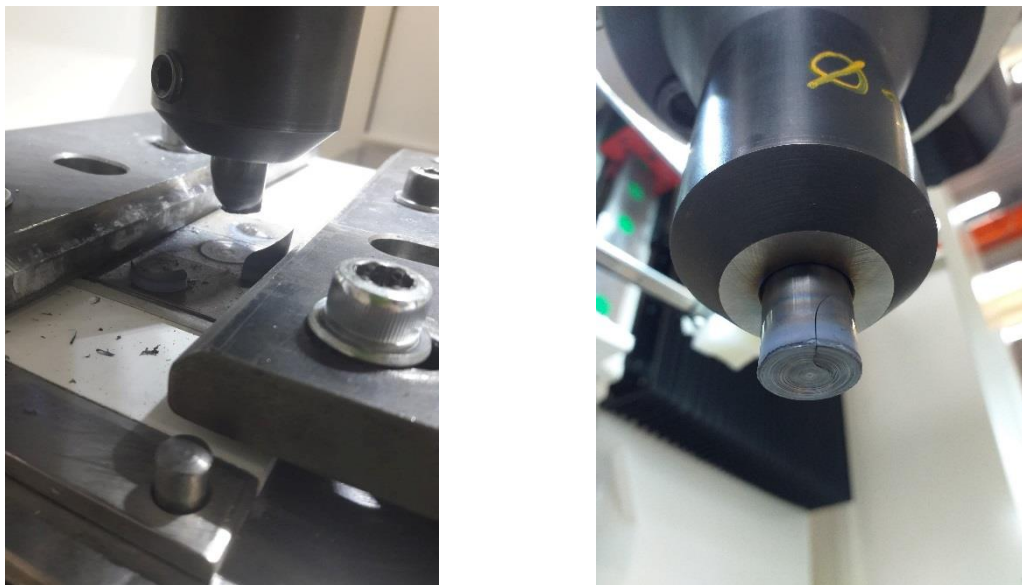
3.2. Observations visuelles et aux microscopes

3.2.1. Observations générales

Pour rappel, les remarques faites lors des expériences sont reprises en annexe. De manière presque systématique, les premières soudures effectuées après avoir introduit l'outil et réglé les paramètres d'angle, rencontraient un problème. Les paramètres étaient parfois les mêmes qu'une soudure préalablement effectuée. Au début du processus, l'outil s'enfonçait dans le fond de son encoche, même après l'étalonnage au

début du mode opératoire (appui de 0,4kN). Une mauvaise manipulation lors de l'installation de l'outil en était la cause.

Après une trentaine de soudures, l'outil s'est cassé lors d'une soudure. La photo en figure X montre ce qu'il en reste. Celui-ci a envoyé des morceaux de carbure de tungstène rouge vif dans tout l'espace de travail de la machine. Un autre outil, comptant également un peu plus d'une trentaine de tests à son actif, s'est quant à lui fissuré (voir figure suivante). Pour celui-ci, nous avons pu utiliser l'autre côté de l'outil.



*Figure 18 - Gauche : Outil cassé pendant une soudure.
Droite : Outil fissuré lors d'une soudure, avec dépôt de calamine en bleu.*

Sur la photo de droite, nous pouvons observer un dépôt de calamine. Celui-ci apparaît dès les premières soudures. Il est nécessaire de nettoyer l'outil entre chaque utilisation afin de ne pas modifier la génération de chaleur par frottement, mais également pour que les dimensions de l'outil cylindrique restent identiques.

3.2.2. Observations visuelles des soudures

Les premières soudures dites classiques ont été expérimentées. Le premier élément de variation fut donc la plaque de support. Nous testons les plaques d'acier non-enrobé et sans perforation.

➤ Plaque de support en acier

L'acier est le matériau ayant la conductivité thermique la moins importante. Les deux premiers tests ne sont pas concluants, l'aluminium et l'acier ne sont pas soudés. Le temps de frottement doit être augmenté. De nouveaux tests sont effectués en diminuant la vitesse de pénétration et/ou en augmentant la distance de pénétration de

l'outil. La chaleur ne s'évacuant pas très vite, l'outil devenait rapidement rouge écarlate pendant une longue période. Il a été difficile de doser l'apport de chaleur avec le support en acier qui conduit très peu la chaleur. Nous pouvions voir sur la plupart des plaques soudées un creux se former sous la plaque d'aluminium comme illustré à la figure 19 entouré en rouge. L'aluminium s'est évaporé sous l'endroit de la soudure.

Les traces blanches proviennent de la poudre de nitrure de bore vaporisée sur la plaque de support avant le processus. C'est une sécurité en cas de chauffe trop importante, elle permet que la plaque d'aluminium ne se soude pas avec la plaque de support.



Figure 19 - Soudure SSN06 : première soudure avec plaque de support en acier. L'arrière de la soudure laisse apparaître un creux dans l'aluminium comme s'il s'était en partie évaporé.

➤ Plaque de support en cuivre

La plaque de cuivre possède la plus grande conductivité thermique. C'est le matériau préconisé par J-M. Norberto dans sa thèse pour éviter les « hot tears » [SOURCE Norbeto thesis]. Mais les premiers tests avec cette plaque de support ne sont pas concluants. Les plaques ne sont pas soudées. Le temps de pénétration n'est pas assez long pour un apport de chaleur suffisant et faire entrer l'aluminium en fusion. En augmentant de 50% la distance de pénétration de l'outil, nous obtenons une soudure sans défaut apparent.

Après découpes et polissage, des petites ouvertures sont visibles. Celles-ci seront analysées au microscope dans la suite de nos travaux.

➤ Plaque de support en laiton

La plaque en laiton bénéficie d'une conductivité thermique intermédiaire. Pour les deux types de tests précédents, nous regardons le *temps de pénétration* en multipliant la vitesse par la pénétration de l'outil. Pour le laiton, nous choisissons des vitesses et des distances de pénétrations donnant des temps de pénétrations situés entre les deux premières séries de tests. Nous obtenons de belles soudures sans défaut apparent. Certaines plaques d'aluminium présentent néanmoins un creux du même gabarit qu'avec la plaque de support en acier.

Après découpes et polissage des échantillons, des creux étaient clairement visibles à l'interface acier-aluminium. Ceux-ci sont illustrés à la **figure X**.

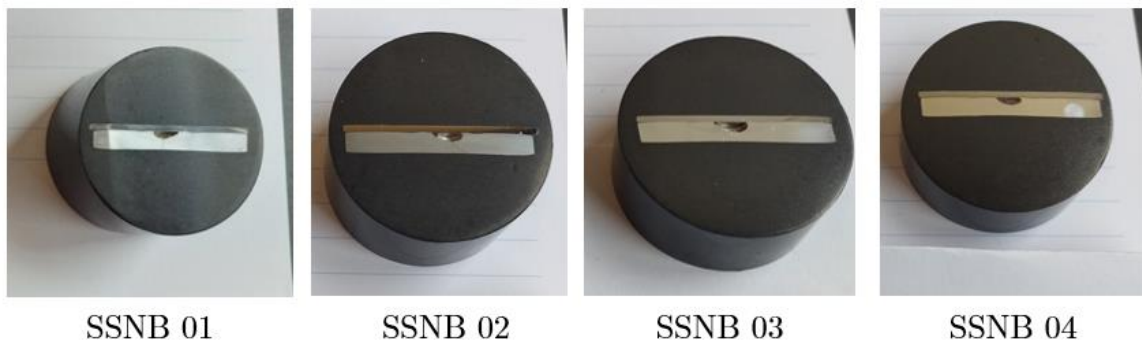


Figure 20 - Photos d'échantillons polis présentant un creux à l'interface. Plaque de support en laiton. Acier sans trou et sans enrobage – aluminium.

3.2.3. Première réduction du nombre de cas expérimentaux

Bien conscients que le nombre de cas différents à analyser est trop importants, sur base des premières observations visuelles et de la thèse de J-M. Norberto sur le FMB, nous choisissons de réduire notre nombre de cas en laissant de côté les plaques de support en acier et en laiton. Cela nous laisse 4 cas à observer avec une plaque de support en cuivre :

- Les soudures dont la plaque d'acier est simple, non-perforée (SSNC)
- Les soudures dont la plaque d'acier est simple, perforée (SSHC)
- Les soudures dont la plaque d'acier est enrobée de zinc, non-perforée (SGNC)
- Les soudures dont la plaque d'acier est enrobée de zinc, perforée (SGHC)

3.2.4. Évolution de l'enrobage de zinc

Le milieu des soudures observées ne présente aucune trace du zinc. L'analyse de la spectroscopie à rayon X (EDX) montre via l'homogénéité des points bleus que le zinc a totalement disparu.

En exemple à la figure X, l'analyse EDX de la couche de zinc en dehors de la zone de soudure montre la forme et la couleur de l'enrobage. Ce dernier est plus blanc que l'acier, voire brillant. Ce trait particulier nous permet de le repérer directement lors des observations au SEM.

En s'écartant du milieu de la soudure, les premières traces de zinc n'apparaissent qu'au bord des soudures confectionnées. Celui-ci semble s'être dispersé à l'extérieur de la HAZ (heat affected zone), ou semble s'être évaporer. Sur la figure X+1, l'empreinte de l'outil marque le bord de la soudure. La fine ligne blanche indique la présence de zinc.

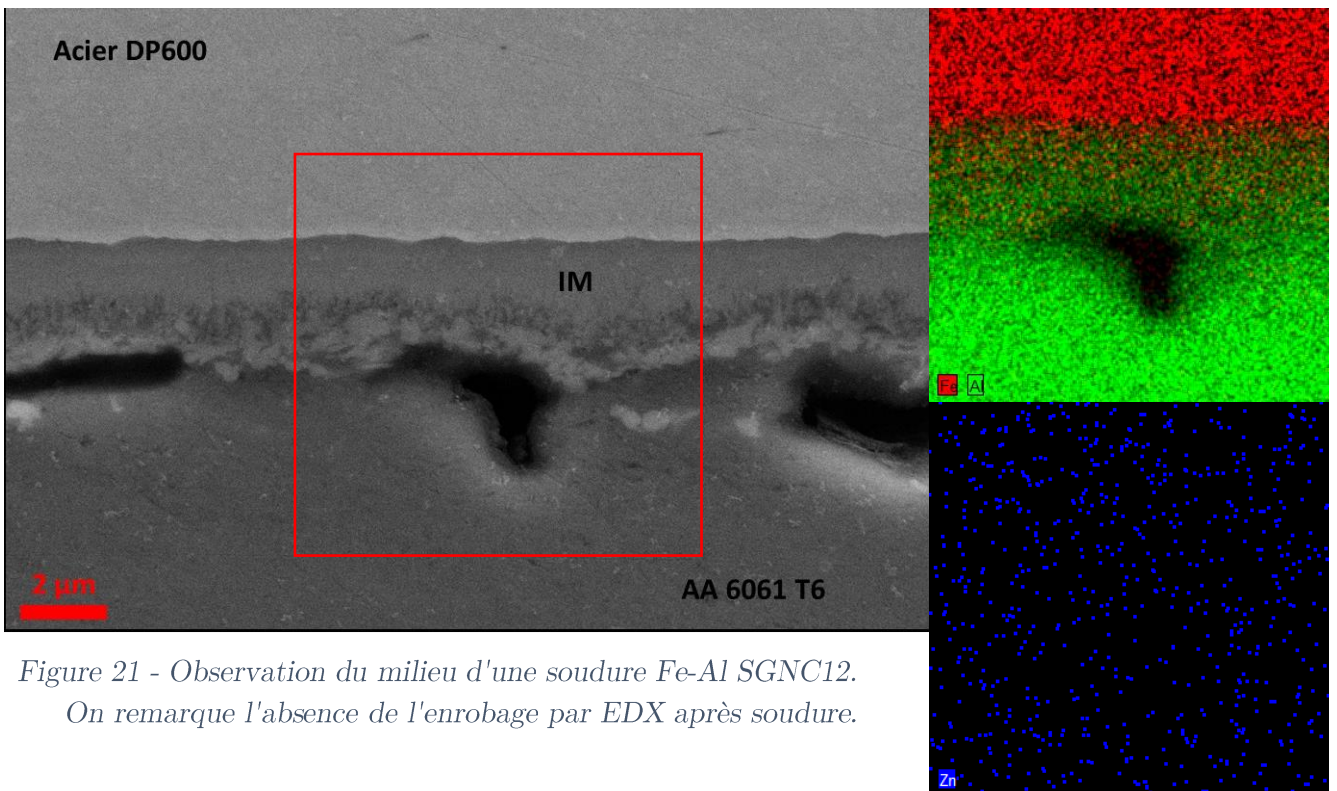


Figure 21 - Observation du milieu d'une soudure Fe-Al SGNC12.
On remarque l'absence de l'enrobage par EDX après soudure.

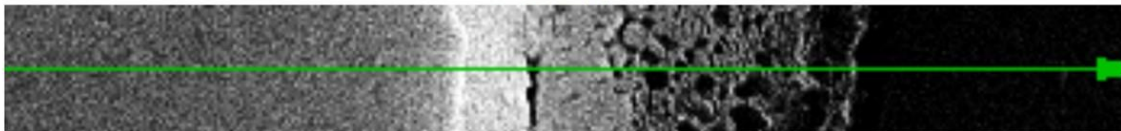
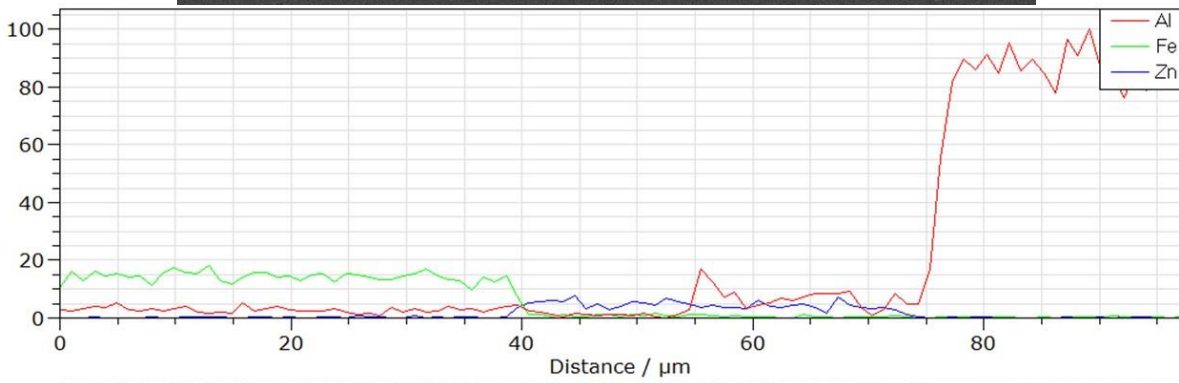
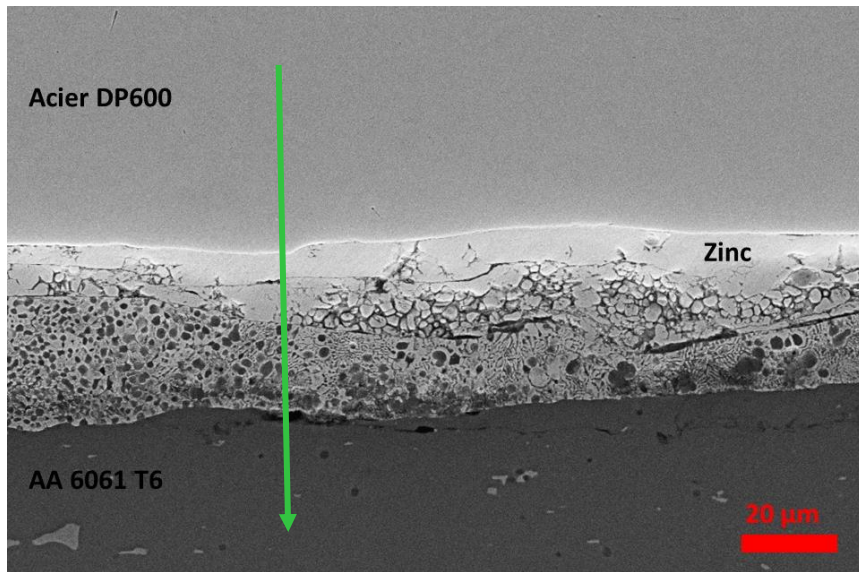


Figure 22 - Analyse EDX de l'échantillon SGNC01. La couleur plus brillante du zinc permet de le reconnaître facilement dans les autres échantillons.

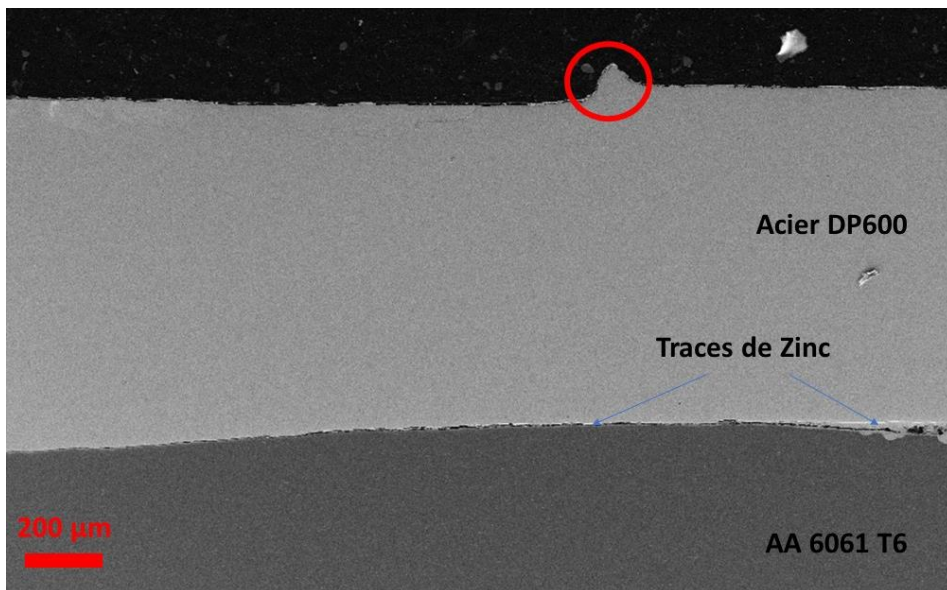


Figure 23 - Illustration de traces de zinc à l'extérieur de la HAZ. Entouré en rouge, la marque de l'outil. Échantillon SGHC02.

3.2.5. Deuxième réduction du nombre de cas expérimentaux.

Tenter de placer une fine couche de zinc à l'interface Fe-Al était un pari osé. En effet, ce système fonctionne pour un brasage [G. Zhang]. Dans le cas de soudure par fusion de l'aluminium, la température de fusion du zinc ($\approx 420^{\circ}\text{C}$) est largement dépassée. Par les observations qu'il nous a été permis de faire, nous concluons que le zinc liquide a été éjecté à l'extérieur de la zone de soudure avec la pression de l'outil.

Il nous reste 2 différents tests à observer :

- Les soudures avec acier non perforé sur un support en cuivre (SSNC)
- Les soudures avec acier perforé sur un support en cuivre (SSHC)

3.2.6. Évolution de la couche d'intermétallique

- SSNC :

Les premiers tests de SSNC ont permis de trouver un temps de pénétration satisfaisant pour qu'une fusion correcte puisse avoir lieu. La vitesse de pénétration et la plongée de l'outil étaient changées pour tourner autour des 20 secondes de temps de pénétration.

L'épaisseur de la couche intermétallique reste entre 2 et 6 microns.

- SSHC :

3.2.7. Défauts observés

Les échantillons observés ne présentaient pas de défauts apparents en surface comme pour les tests expérimentés sur les plaques de support en acier et en laiton. Mais tous laissaient montrer des petits défauts à l'interface

Dendrite

3.3. Analyse des résultats

Premier test systématiquement non soudé. Poids de la machine enfonce l'outil jusque dans le fond de son encoche

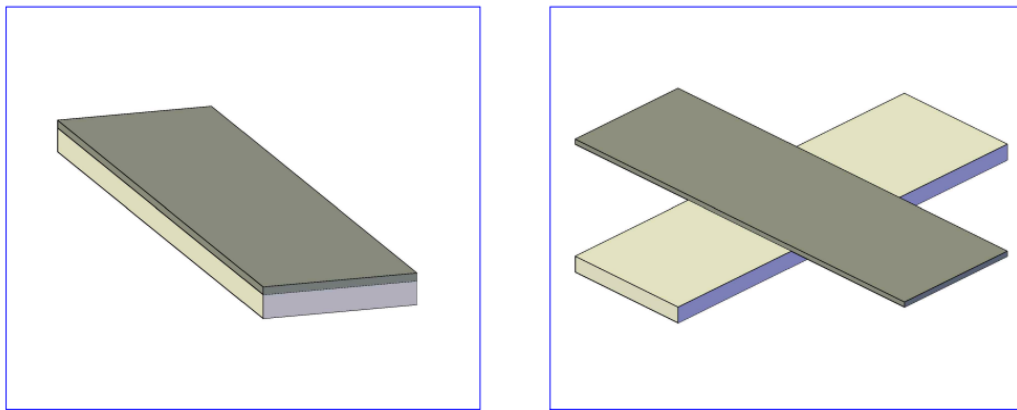
Image crossed britteld fracture and sharp !

Chapitre 4

Essais mécaniques

4.1. Description de l'essai de traction

Dans le but de prouver l'efficacité des soudures produites précédemment, il nous faut passer par un test mécanique. Les types d'essai développés dans la littérature ne sont pas très simples à interpréter [S.Crusifix], ni à mettre en œuvre [J-M. Norberto 2019 paper]. Un essai de traction est donc imaginé. Au lieu de vouloir pousser au travers d'une plaque percée, nous choisissons de changer la disposition des plaques de soudures. Une nouvelle série de soudure est donc réalisée avec les plaques d'acier et d'aluminium installées perpendiculairement comme sur la figure 24.



*Figure 24 - Disposition des plaques d'acier et d'aluminium.
Gauche : soudure destinée à être découpée et observée au microscope.
Droite : soudure destinée à être testée mécaniquement à la traction.*

De là est imaginé un outillage. L'outil doit être en double et de dimensions adéquates de telle sorte qu'il ne puisse pas être dans le chemin de son jumeau. Ceux-ci sont repris à la figure 26. Le risque de ce type de test est que les plaques puissent plier. Néanmoins, si cela devait arriver, celles-ci peuvent facilement être renforcées sans influencer la résistance de la soudure en venant coller une plaque de plus épaisse par-dessus les lamelles soudées.

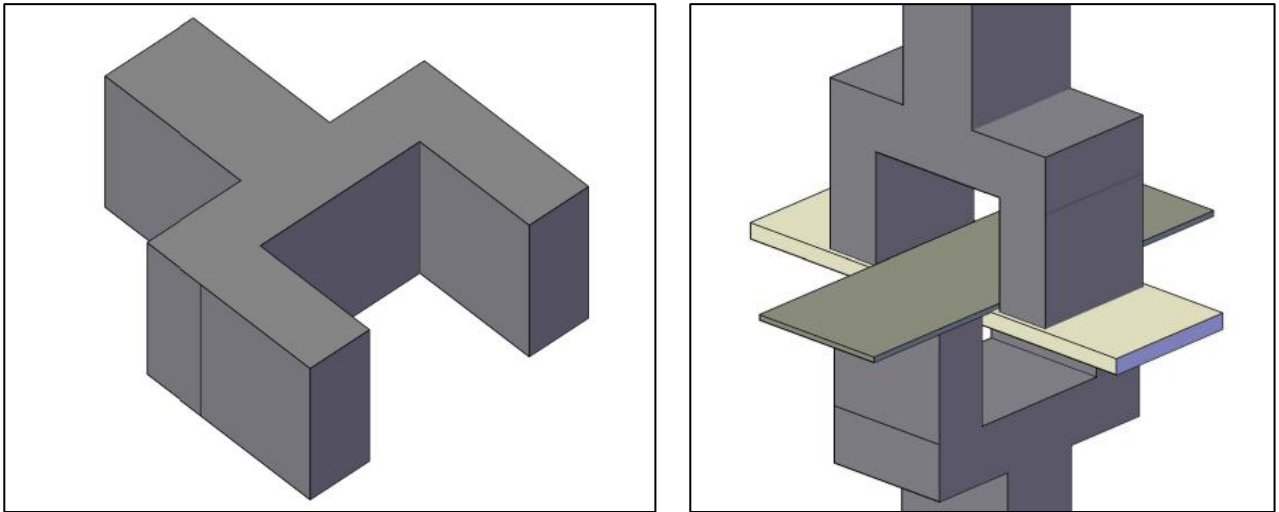


Figure 26 - Dessin technique de l'outillage servant aux tests mécaniques.

Réalisé à l'aide de la partie compression d'une machine de test à la traction Zwick 50 [kN] comme illustré sur la photo en figure X, les soudures sont testées les unes après les autres en enregistrant la course de la machine et la force qu'elle a exercée.

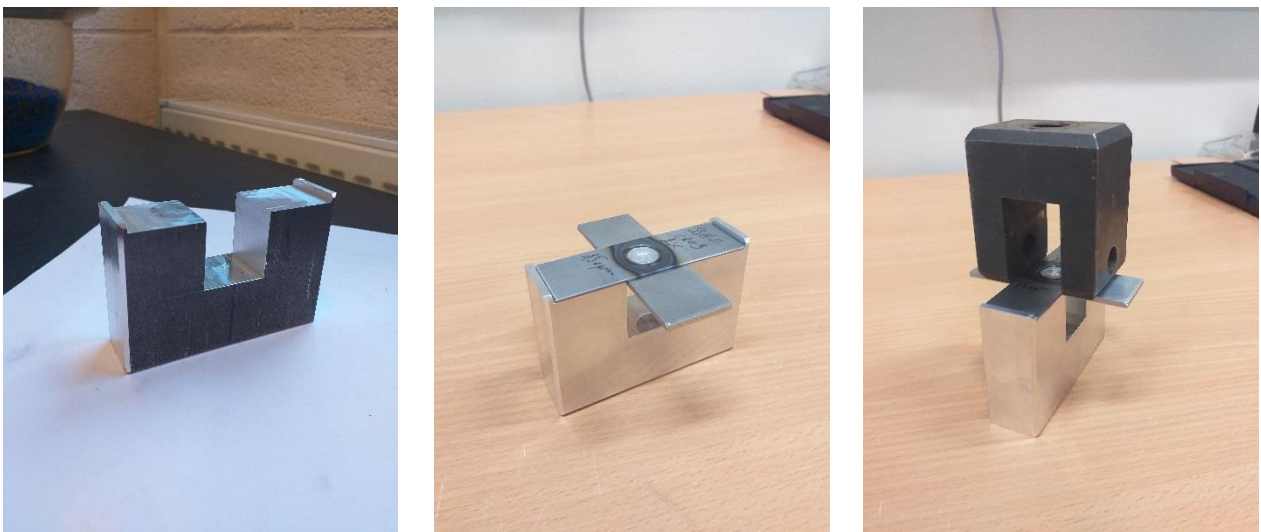


Figure 25 - Outillage usiné/récupéré pour la confection des essais mécaniques

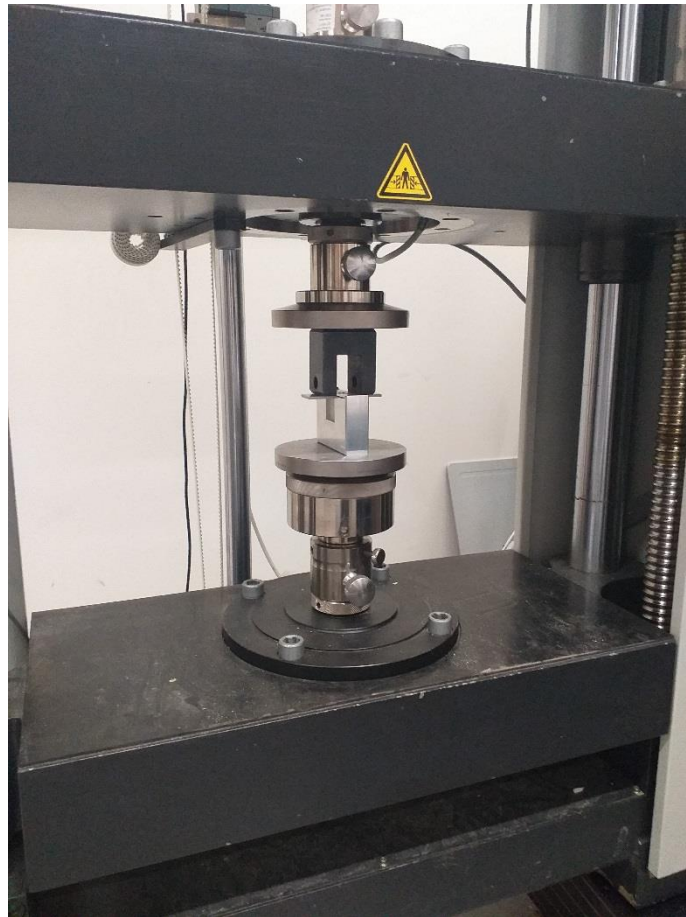


Figure 27 - Machine de test à la traction/compression Zwick 50kN

4.2. Analyse des résistances

Les résultats ne sont malheureusement pas très concluants.

Chapitre 5

Conclusion et perspectives

Le Friction Spot Melt Bonding est un nouveau type de soudure qui peut être viable. Malheureusement, les bons rendus des premiers essais observés au microscope électronique n'ont pas été aussi satisfaisants que pour les essais mécaniques.

En examinant les interfaces des soudures portées à la rupture, nous constatons que l'aluminium, dans tous les cas, ne s'est pas collé à l'acier comme nous l'attendions. Nous remarquons que celui-ci est entré en fusion, mais ne s'est collé qu'en quelques endroits disparates. Sur la figure 28, nous pouvons voir une forme acérée qui correspond à la partie soudée de la plaque d'aluminium.

Comme nous avons pu le voir au microscope électronique, la couche intermétallique est bien présente. Ceci est la preuve que l'aluminium est entré en fusion.

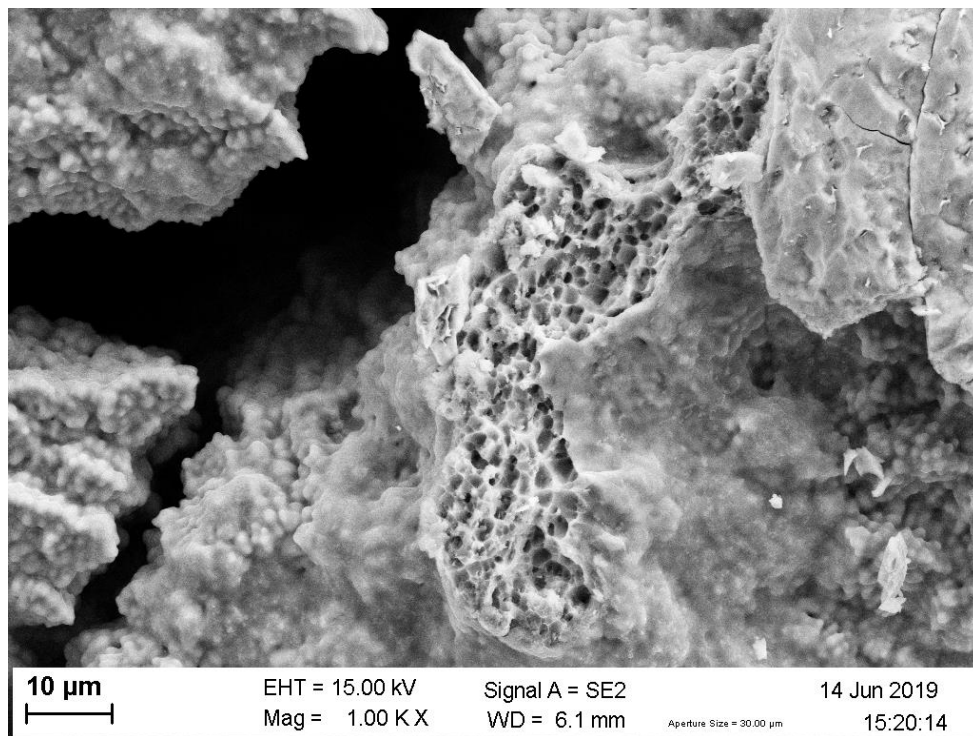


Figure 28 - Observation de l'interface d'une plaque d'aluminium après rupture par essai de traction.

Selon nous, quelques solutions peuvent être envisagées et développées :

Tout d'abord, l'aluminium n'a pas assez chauffé pour pouvoir se coller à l'acier. Il serait probablement utile de diminuer la vitesse de pénétration pour augmenter le temps de frottement, et ainsi augmenter le temps de chauffe. Cependant, certains défauts dû à une trop grande chaleur étaient déjà présents (équivalent des hot tears).

Ou alors, la pression appliquée sur la soudure n'est pas assez importante, voire pas assez maintenue. La chaleur apportée provoquant des défauts de

Nous pensons également qu'une approche plus délicate peut être faite au niveau de l'étude des soudures avec une plaque de support en laiton. En effet, le cuivre étant très conducteur, l'aluminium laisse probablement échapper son énergie thermique trop rapidement pour pouvoir se coller à l'acier.

Références bibliographiques

- [1] H. Shu, S. Qiao, R. Qiu, X. Zhang, and H. Yu, “Effect of welding time on the joining phenomena of diffusion welded joint between aluminum alloy and stainless steel,” *Mater. Manuf. Process.*, vol. 27, no. 12, pp. 1366–1369, 2012.
- [2] A. Simar, “State of the art about dissimilar metal friction stir welding,” *Sci. Technol. Weld. Join.*, vol. 1718, no. March, pp. 0–15, 2016.
- [3] B. Toulas, “6061 Aluminium Properties,” *Engineeringclicks*, 2018.
- [4] D. Macel, “L ’ ASSEMBLAGE DE PIÈCES AU FOUR SOUS VIDE : PRINCIPES ET APPLICATIONS EN BRASAGE-DIFFUSION ET SOUDAGE-DIFFUSION,” *Soudage Tech. Connexes*, vol. mai-juin, pp. 45–49, 2014.
- [5] S. Crusifix, “Soudage dissimilaire acier-aluminium par friction malaxage: influence des conditions thermiques sur la microstructure et les propriétés mécaniques des assemblages,” 2013.
- [6] A. A. M. da Silva, E. Aldanondo, P. Alvarez, E. Arruti, and A. Echeverría, “Friction stir spot welding of AA 1050 Al alloy and hot stamped boron steel (22MnB5),” *Sci. Technol. Weld. Join.*, vol. 15, no. 8, pp. 682–687, 2010.
- [7] B. Aydemir, H. K. Zeytin, G. Güven, and A. Güngör, “Investigation of mechanical properties of DP 600 steels at elevated temperatures.”
- [8] N. Jimenez-Mena *et al.*, “Enhancement of toughness of Al-to-steel Friction Melt Bonded welds via metallic interlayers,” *Mater. Sci. Eng. A*, vol. 740–741, no. September 2018, pp. 274–284, 2019.
- [9] Thomas WM; Nicholas ED; Needham JC; et al., “Improvements to friction welding,” UK patent application no. 9125978.8. US Patent 5460317, 1995.
- [10] “The Aluminium Story - Visité le 10-08-2019.” [Online]. Available: <http://transport.world-aluminium.org/fr/modes/avions/>.
- [11] D. Raabe, “Dual phase steels.” [Online]. Available: <http://www.dierk-raabe.com/dual-phase-steels/> - Visité le 10-08-2019.
- [12] N. Jimenez-Mena, “Optimization of the friction melt bonding of aluminium and steel : from microstructure evolution to mechanical properties,” 2018.
- [13] F. Gharavi, K. A. Matori, R. Yunus, and N. K. Othman, “Corrosion behavior of friction stir welded lap joints of AA6061-T6 aluminum alloy,” *Mater. Res.*, vol. 17, no. 3, pp. 672–681, 2014.

- [14] G. Zhang, W. Su, J. Zhang, and Z. Wei, "Friction stir brazing: A novel process for fabricating Al/steel layered composite and for dissimilar joining of Al to steel," *Metall. Mater. Trans. A Phys. Metall. Mater. Sci.*, vol. 42, no. 9, pp. 2850–2861, 2011.
- [15] C. Van De Rest, A. Simar, and P. Jacques, "Method for welding at least two layers," International Publication No. WO2013164294 (A1), 2013.
- [16] A. Pierman, "Micromechanical study of the influence of the microstructure and composition on the plastic flow and damage properties of Dual-Phase steels," Université Catholique de Louvain, 2013.
- [17] F. THIBEAULT, L. ST-GEORGES, L. I. KISS, and R. DAS, "Étude numérique et expérimentale des mécanismes thermiques lors du soudage par friction malaxage," no. August 2016, 2011.
- [18] G. Speich, "Physical metallurgy of dual-phase steels," *McGraw-Hill*, 1981.
- [19] K. Faes, "ALUWELD : Techniques de soudage des alliages d'aluminium – Soudage hybride arc/laser et Soudage par friction malaxage," 2017. [Online]. Available: <https://www.bil-ibs.be/fr/project/aluweld-techniques-de-soudage-des-alliages-daluminium-soudage-hybride-arclaser-et-soudage>.
- [20] M. Girard, "Soudage-Diffusion hétérogène assisté par friction malaxage – cas du couple Al/Fe," Nantes, 2010.

UNIVERSITÉ CATHOLIQUE DE LOUVAIN
École polytechnique de Louvain

Rue Archimède, 1 bte L6.11.01, 1348 Louvain-la-Neuve, Belgique | www.uclouvain.be/epl