

# TECHNIQUES D'ASSEMBLAGE INNOVANTES POUR TOLES HETEROGENES

L'évolution du marché visant à réaliser des constructions ou produits de plus en plus légers et au moins aussi solides se poursuit. Pour de plus en plus de pièces, on passe de l'acier à faible teneur en carbone classique aux nuances d'acier à haute résistance ou aux alliages non-ferreux. L'assemblage de différents matériaux pose toutefois d'énormes défis en raison des propriétés de matériaux fort différentes des parties à assembler. Deux projets de recherche en cours à l'IBS visant à développer des techniques innovantes permettant d'assembler des matériaux hétérogènes.

Irene Kwee, Nelis Vandermeiren, Koen Faes (Institut Belge de la Soudure), Sam Coppieters, Dimitri Debruyne, KU Leuven (Campus Gent)

## CONCEPT MULTI-MATERIAU

Dans l'industrie, on s'efforce constamment d'améliorer les éléments structurels: on vise une réduction de poids dans le secteur du transport, la construction de machines aspire à des éléments de machine plus performants et dans les produits de consommation et de construction, une intégration accrue de fonctionnalités procure un avantage compétitif. La combinaison de matériaux classiques (acier de construction, aluminium) avec d'autres matériaux classiques (acier inoxydable) voire nouveaux (composites, aciers haute résistance) offre des solutions aux concepteurs, là où un assemblage en un seul matériau échoue. Un assemblage multi-matériau utilise pour chaque sous-structure un matériau aux propriétés optimales. L'application se heurte toutefois à des défis en matière de technologie d'assemblage. Différentes combinaisons de matériaux et d'épaisseurs rendent l'assemblage de plus en plus complexe. Pour rencontrer les besoins actuels dans l'assemblage de matériaux hétérogènes, l'IBS a lancé des projets de recherche qui se focalisent sur de tels assemblages. Deux projets de recherche qui sont illustrés ici sont le projet INNOJOIN et le projet MECHJOIN. Tous deux visent à développer des techniques d'assemblage et des produits innovants. Ceci permet de produire de nouveaux produits hybrides qui répondent à la tendance actuelle de la production de matériaux légers dans divers secteurs.

## PROJET INNOJOIN

Le projet Cornet européen INNOJOIN étudie l'assemblage thermique des tôles à l'aide d'un large éventail de technologies de soudage novatrices: soudage par impulsion électromagnétique, soudage par points par friction, soudage par résistance avec élément, soudage par résistance avec ruban et soudage par friction avec élément. Ces techniques s'utilisent pour assembler une diversité de combinaisons de matériaux hétérogènes industrielles représentatives. Les objectifs techniques d'INNOJOIN sont l'étude du potentiel de ces nouveaux processus et des propriétés de soudage à atteindre avec ces techniques. Dans le cadre du projet, l'IBS étudie l'applicabilité du soudage par impulsion électromagnétique et du soudage par points par friction (soudage 'friction spot'). En particulier, cet article commente l'utilisation de ces deux techniques pour assembler l'aluminium avec l'acier. Le consortium INNOJOIN comprend l'IBS, KU Leuven Campus De Nayer, CEWAC, SLV (Halle, Allemagne) et LWF (Paderborn, Allemagne). Le projet bénéficie de l'appui de l'IVT (Agentschap voor Innovatie door Wetenschap en Technologie).

### Soudage par impulsion électromagnétique

#### Principe de fonctionnement général et avantages

Le soudage par impulsion électromagnétique fait partie du groupe des procédés de soudage par pression, selon lesquels une liaison métallique est réalisée entre deux surfaces en les comprimant l'une contre l'autre. Le soudage par impulsion

magnétique est un processus de soudage par compression dans lequel la déformation se produit à très haute vitesse, tout comme dans le soudage par explosion. La force explosive est toutefois générée de façon sûre, à savoir via une bobine à induction. Les forces de compression magnétiques sont produites par la décharge d'une grande quantité d'énergie électrique dans la bobine durant un très court délai, ce qu'on appelle l'impulsion. C'est aussi un processus de soudage 'solid state', ce qui signifie que les matériaux ne fondent pas pendant le cycle de soudage, ce qui permet d'assembler des matériaux hétérogènes. Comme le soudage par impulsion électromagnétique ne recourt pas à la chaleur mais à des forces de compression pour réaliser un assemblage, il offre d'importants avantages par rapport aux techniques de soudage conventionnelles. En effet, on ne crée pas de zone thermiquement affectée et le matériau ne perd pas ses propriétés. Ce procédé comporte aussi la possibilité de réaliser des assemblages entre métaux et alliages ayant un point de fusion très différent, tel que l'aluminium avec l'acier. Le soudage par impulsion électromagnétique permet de souder un des matériaux tubulaires (**Figure 1**) et des produits plats (**Figure 2**), en fonction de la bobine utilisée.

#### Disposition expérimentale pour le soudage par impulsion électromagnétique des tôles

En général, le soudage par impulsion électromagnétique de la tôle est plus complexe que le soudage de tube, en raison des champs magné-

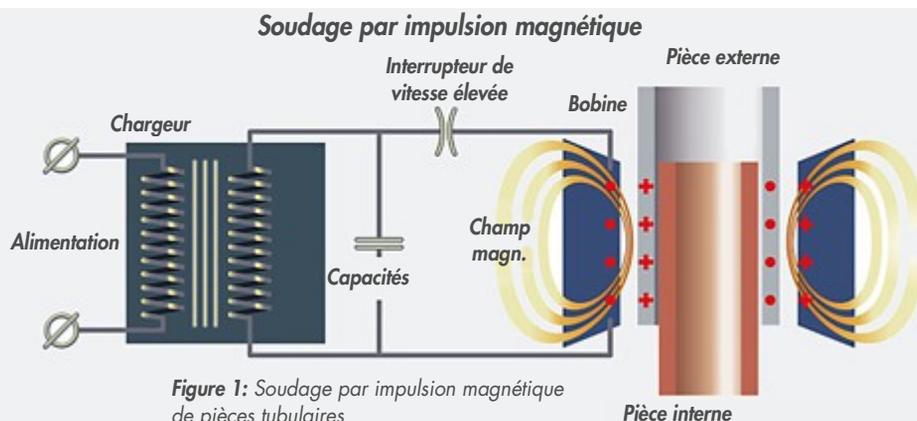


Figure 1: Soudage par impulsion magnétique de pièces tubulaires

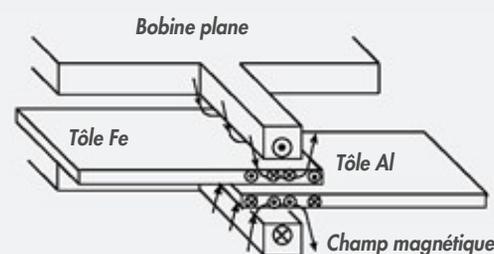


Figure 2: Soudage par impulsion magnétique de tôles (Source: Application of magnetic pulse welding for aluminium alloys and SPCC steel sheet joints. T. Aizawa et al)

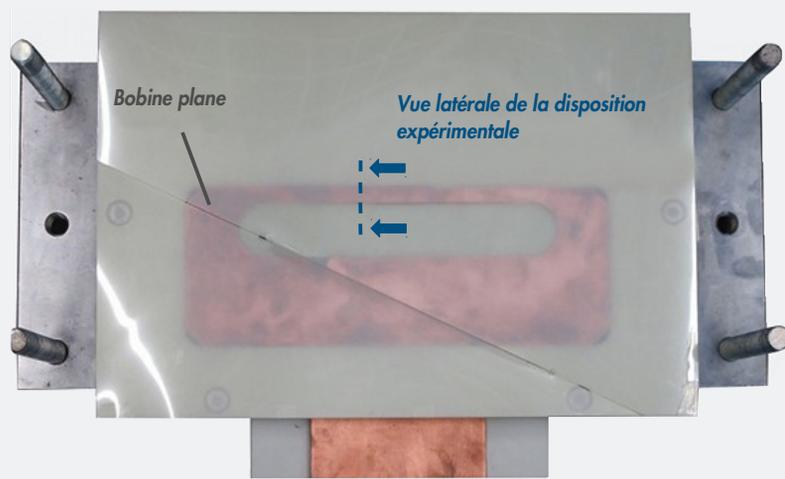


Figure 3: Bobine plane utilisée pour le soudage par impulsion électromagnétique de tôles (Source: Institut Belge de la Soudure)

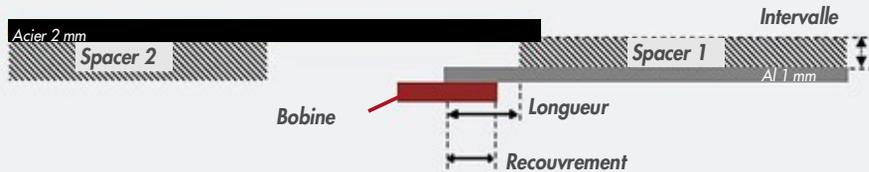


Figure 4: Vue latérale de la disposition expérimentale du soudage par impulsion électromagnétique de l'aluminium sur tôles d'acier (Source: Institut Belge de la Soudure)

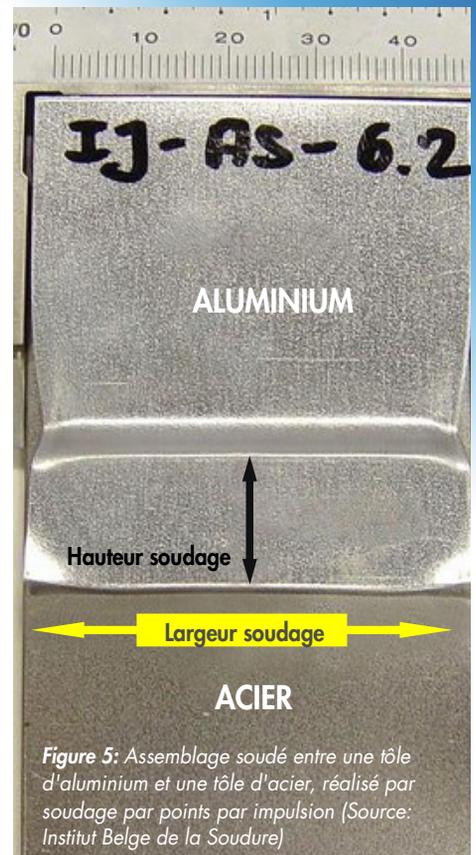


Figure 5: Assemblage soudé entre une tôle d'aluminium et une tôle d'acier, réalisé par soudage par points par impulsion (Source: Institut Belge de la Soudure)

tiques non uniformes qui sont générés, aux différents endroits de la tôle. Pour cette raison, le contrôle du champ magnétique pour le soudage de pièces en forme de plaque est bien plus difficile que dans le soudage de composants tubulaires, au cours duquel un champ magnétique uniforme est créé autour de la circonférence des composants tubulaires. Le soudage par impulsion électromagnétique des tôles est un domaine relativement inconnu permettant encore de nombreux développements novateurs. La figure 3 montre la bobine plane utilisée pour souder des pièces en forme de plaque. La figure 4 illustre la vue latérale de la disposition expérimentale utilisée pour souder l'aluminium avec l'acier. Quand un courant traverse la bobine, ceci développe une force électromagnétique qui fait impacter la partie de la tôle d'aluminium qui est recouverte par la bobine, contre la tôle d'acier. Les deux tôles sont séparées par des 'spacers'. Ceci crée un intervalle entre les deux tôles (stand-off). Cette distance, avec la longueur libre (Figure 4), détermine l'angle et la vitesse de l'impact de la tôle d'aluminium contre la tôle d'acier. L'angle et la vitesse d'impact déterminent à leur tour la qualité de l'assemblage soudé.

#### Assemblages soudés par impulsion électromagnétique aluminium-acier

L'assemblage de l'aluminium (EN AW 1050-H14, épaisseur de tôle 1 mm) et de l'acier (S235JR, épaisseur de tôle 2 mm) a été étudié à l'aide du procédé de soudage par impulsion électromagnétique. Différentes séries d'expériences ont été menées, en variant trois paramètres: le niveau d'énergie, l'intervalle entre les tôles et le recouvrement entre la bobine et la tôle d'aluminium.

Les assemblages aluminium-acier ont d'abord été étudiés visuellement, puis analysés de façon métallographique et enfin, la résistance à la traction a été déterminée via des essais de traction-cisaillement. La Figure 5 montre un assemblage soudé typique entre une tôle d'aluminium et une tôle d'acier. Suivant les conditions de soudage sélectionnées, on obtient une zone de soudage d'une certaine largeur et hauteur de soudage. Pour identifier les zones non soudées et distinguer ainsi la forme effective de la zone de soudage, les deux tôles sont séparées manuellement (test de pelage). La Figure 6 montre un aperçu des trois assemblages soudés testés, réalisés avec le même intervalle et recouvrement entre la bobine et la tôle d'aluminium, mais avec trois niveaux d'énergie; de gauche à droite: 14, 16 et 18 kJ. Une augmentation de l'énergie induit un champ magnétique plus grand, d'où une plus grande largeur et hauteur de soudage. La Figure 7 montre une coupe métallographique typique d'un assemblage aluminium-acier, dans le centre de la zone de soudage. Un détail de cette coupe enregistré avec un microscope électronique à balayage est restitué dans la Figure 8. La présence d'une couche intermétallique d'une épaisseur d'environ 20  $\mu\text{m}$  s'explique de deux manières. Une première explication est que l'énergie générée pendant l'impact des deux tôles entraîne une hausse très locale de la température, qui est suffisante à l'interface de soudage pour faire fondre l'aluminium et l'acier. Il se crée ensuite une couche intermétallique pendant le refroidissement et durcissement rapides. Une seconde explication de l'apparition de la couche est un mélange mécanique de l'aluminium et de l'acier dans un état visco-plastique et l'intense déformation plastique durant l'impact des deux tôles. L'utilisation de

paramètres de soudage non optimaux peut faire apparaître des porosités et petites fissures dans la soudure, tel qu'illustré dans la Figure 8. Les porosités dans la couche intermétallique sont la conséquence de phénomènes de fusion locale dans l'interface de soudage. Les fissures transversales dans la couche intermétallique résultent des tensions de cisaillement, notamment générées par la différence de coefficient d'expansion thermique de l'aluminium et de l'acier. Quand ces tensions de cisaillement dépassent la solidité de la couche intermétallique, des microfissures transversales peuvent apparaître. Les assemblages sont testés via des essais de traction et cisaillement. La Figure 9 montre la force de traction maximale atteinte en fonction du niveau d'énergie, pour les différents niveaux de l'intervalle et du recouvrement. En général, la résistance à la traction augmente à mesure que le niveau d'énergie augmente. Ceci peut être expliqué par la plus grande zone de soudage, comme illustré dans la Figure 6. Une augmentation du recouvrement résulte aussi dans une plus grande résistance à la traction, vu qu'on obtient une plus grande hauteur de soudage. Enfin, une diminution de l'intervalle de 3 à 2 mm induit généralement une augmentation de la résistance à la traction. Ceci peut s'expliquer par la vitesse d'impact plus élevée, obtenue à un intervalle de 2 mm. Un intervalle de 3 mm était trop grand dans ce cas, ce qui entraîne une vitesse trop faible au moment de l'impact. En conclusion, la plus grande résistance à la traction de 4,6 kN est atteinte avec un niveau d'énergie de 18 kJ, un recouvrement de 10 mm et un intervalle de 2 mm, vu que la plus grande zone de soudage a été obtenue dans ces conditions de soudage.

#### Soudage par points par friction

##### Principe de fonctionnement général et avantages

Le soudage par points par friction est un nouveau processus de soudage 'solid state', qui peut être utilisé pour des assemblages à recouvrement entre matériaux homogènes et hétérogènes. Le cycle de soudage est exécuté à l'aide d'un outil spécial, permettant de réaliser l'assemblage via la chaleur de friction et la déformation mécanique. Le résultat est un assemblage soudé par points, sans perte de matériau, ni cratère laissé à la fin de la soudure.



Figure 6: Effet de l'énergie sur la zone de soudage après un test de pelage. Energie: (a) 14 kJ, (b) 16 kJ, (c) 18 kJ (Source: Institut Belge de la Soudure)



Figure 7: Coupe métallographique d'un assemblage soudé aluminium-acier (Source: Institut Belge de la Soudure)

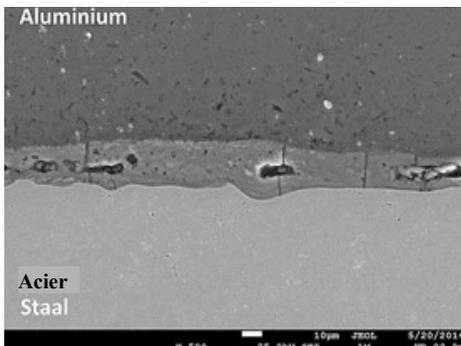


Figure 8: Détail d'un assemblage soudé aluminium-acier: couche intermétallique avec porosités et fissures transversales (Source: Institut Belge de la Soudure)

Un autre avantage du procédé est la courte durée de soudage. De plus, c'est un processus écologique: il n'utilise pas de matériau d'apport, ni gaz protecteur et n'émet aucune fumée de soudage, ni rayonnement IR ou UV durant le cycle de soudage. L'appareil de soudage par friction par points présent à l'IBS est montré dans la Figure 10.

**Disposition expérimentale pour le soudage par points par friction des tôles**

La Figure 11 montre le processus de soudage par points par friction. D'abord un pion et un manchon (sleeve) tournent (Figure 11a). Le manchon rend le matériau plastique, qui pénètre dans le manchon. Le pion se déplace vers le haut (Figure 11b). Si la profondeur de pénétration est suffisante, le manchon rotatif est retiré et le pion pousse le matériau plastique dans la zone de soudage (Figure 11c) pour créer l'assemblage (Figure 11d).

**Assemblages soudés par points par friction aluminium-acier**

L'assemblage de l'aluminium (EN-AW 5182, épaisseur de tôle 2 mm) avec l'acier galvanisé (MS-W1200 ZE50/50, épaisseur de tôle 1,5 mm) est étudié à l'aide du soudage par points par friction. Trois paramètres varient, à savoir la vitesse de rotation, la profondeur de pénétration et la durée de soudage. Les



Figure 10: Appareil de soudage par points par friction dans l'Institut Belge de la Soudure

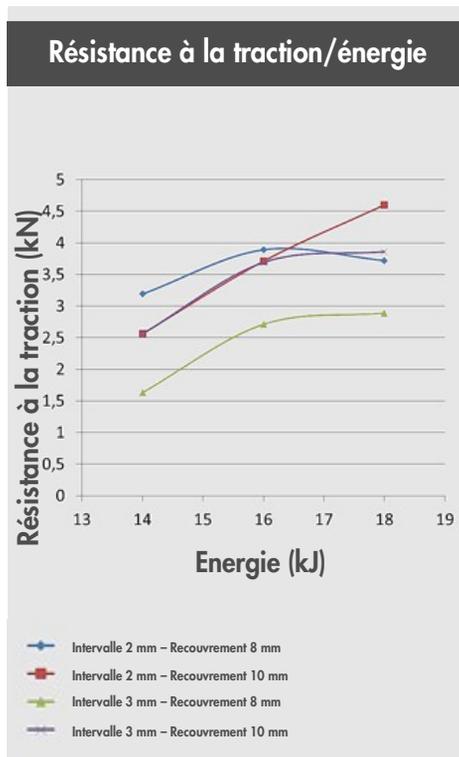


Fig. 9: La résistance à la traction face à l'énergie pour les assemblages soudés aluminium-acier avec le soudage par impulsion électromagnétique (source: Institut Belge de la Soudure)

assemblages aluminium-acier réalisés sont d'abord examinés visuellement, puis analysés par métallographie; enfin, la résistance à la traction est déterminée. Une soudure par friction par points comporte trois zones aux microstructures différentes: la zone thermiquement affectée, la zone thermiquement affectée et le noyau de la soudure. Les principaux défauts de soudage sont un remplissage insuffisant de la soudure, des porosités et défauts de liaison, et une rainure annulaire sur la surface supérieure de la soudure. La Figure 12 montre la coupe métallographique d'une soudure par points par friction typique, respectivement à l'état non attaqué (Figure 12a) et attaqué (Figure 12b). Cette soudure comporte la plus grande surface de liaison entre l'aluminium et l'acier, et du reste aussi la plus grande résistance à la traction (9,5 kN). La microstructure montre une structure à gros grains dans la partie supérieure et médiane de la soudure (Figure 12c) et sur la surface de séparation entre les deux tôles (Figure 12d). La taille de grain augmente à mesure qu'une plus grande chaleur est générée durant le cycle de soudage, par une augmentation de la durée de soudage, de la profondeur de pénétration ou de la vitesse de rotation. Le mapping des éléments Fe, Al et Zn indique la présence d'une concentration d'aluminium réduite et d'une concentration de zinc accrue dans les microstructures illustrées dans les Figures 12 c et d.

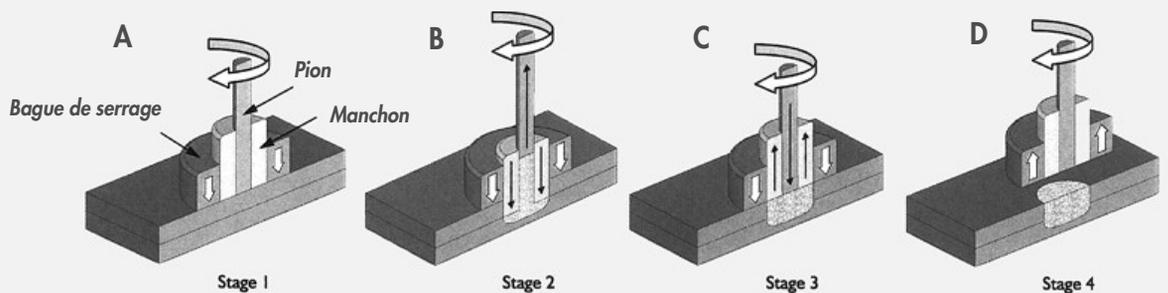


Figure 11: Procédé de soudage par points par friction (Source: Hemholtz-Zentrum Geesthacht, Allemagne)

La présence de Zn dans l'Al peut s'expliquer par la diffusion du Zn, provenant de la couche de coating de l'acier. Cette diffusion Zn à la surface de séparation est initiée par les courants de matériau créés par le mouvement du manchon et du pion. La diffusion Zn se produit aussi dans les zones à côté de la soudure, plus précisément à la surface de séparation sous la bague de serrage, à cause de la haute pression exercée par la bague de serrage et à la chaleur générée dans la soudure. On peut en conclure que la surface de liaison entre les deux tôles se forme entre l'aluminium et la couche de couverture Zn de l'acier. Une plus forte diffusion du Zn dans l'aluminium peut aussi résulter en une surface de liaison agrandie et dès lors une résistance à la traction accrue.

**PROJET MECHJOIN**

Le projet Cornet européen MECHJOIN traite de l'assemblage mécanique des matériaux haute résistance ayant une ductilité limitée. Certains matériaux légers avancés, comme les alliages d'aluminium ou magnésium haute résistance ne peuvent pas être soudés thermiquement, contrairement à l'acier, étant donné que la résistance statique et la résistance à la fatigue des assemblages sont affectées. On a donc besoin de techniques d'assemblage plus adaptées avec un faible apport thermique pour assembler ces matériaux de façon qualitative. Les combinaisons de matériaux hétérogènes seront également étudiées dans ce projet. L'accent dans MECHJOIN est mis sur deux techniques d'assemblage mécaniques et donc 'froides' (clinchage et rivetage auto-poussant) pour matériaux légers à haute résistance. Mais l'assemblage de ces matériaux moins ductiles engendre des fissures provoquées par de fortes concentrations de contraintes locales. Le but technique de MECHJOIN est dès lors la rédaction de directives sur la façon d'éviter ces fissures ou sur les fissures (taille, nombre, orientation, ...) admissibles en relation avec les propriétés d'assemblage souhaitées. Ceci permet d'étendre le champ d'application de l'assemblage mécanique aux matériaux légers haute résistance parce qu'il sera possible de les assembler plus efficacement avec d'autres matériaux et composants. Dans le cadre de ce projet, l'IBS travaille sur la caractérisation du comportement de fissure des assemblages en fonction des paramètres de processus: l'emplacement de l'initiation des fissures, le sens de propagation des fissures et la taille finale des fissures. En premier lieu, on effectue une recherche non-destructive et métallographique pour caractériser les fissures visibles. Ensuite, un nombre limité d'assemblages clinchés

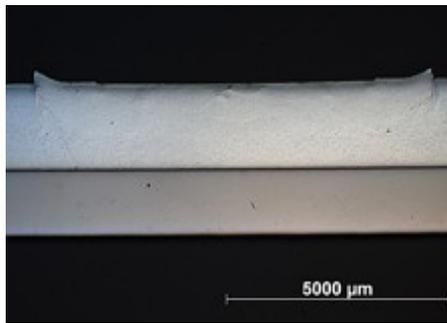


Figure 12: (a) Coupe métallographique d'un assemblage soudé aluminium-acier sans attaque chimique

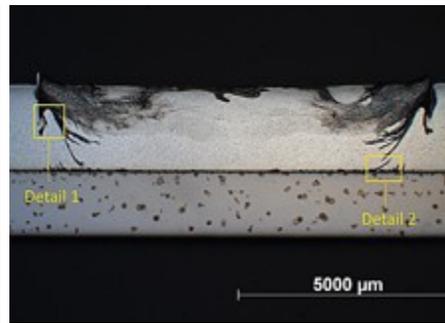


Figure 12: (b) Coupe métallographique d'un assemblage soudé aluminium-acier avec attaque chimique (Source: Institut Belge de la Soudure)

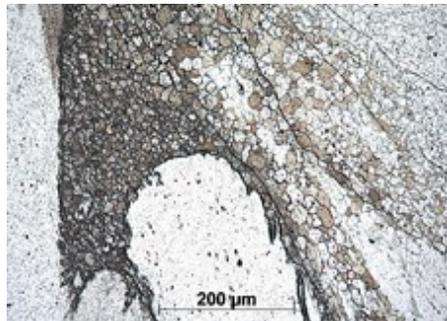


Figure 12: (c) Détail Figure 12b: partie gauche de la lentille de soudage

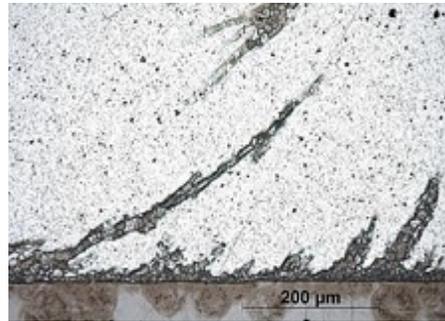


Figure 12: (d) Détail Figure 12b: surface de séparation entre aluminium et acier

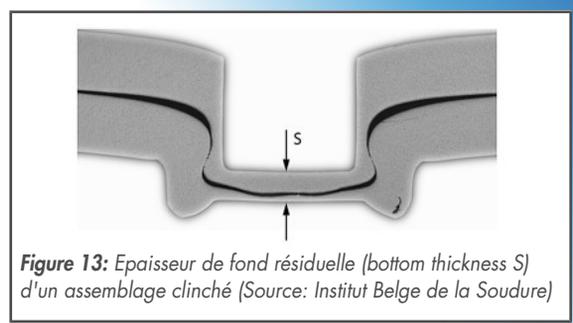


Figure 13: Epaisseur de fond résiduelle (bottom thickness  $S$ ) d'un assemblage clinché (Source: Institut Belge de la Soudure)

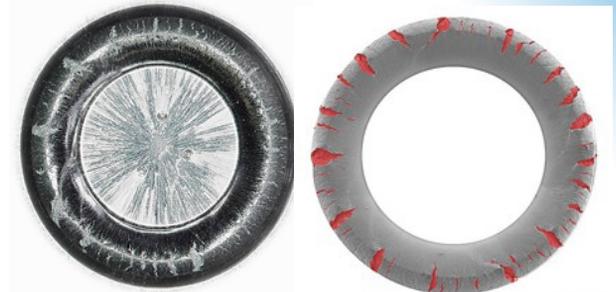


Figure 14: Vue macroscopique d'un assemblage clinché aluminium: vue inférieure de Figure 13 (Source: Institut Belge de la Soudure)

Figure 15: Fixation de l'épaisseur de fond résiduelle d'un assemblage clinché aluminium (bottom thickness  $S = 0,98$  mm (Source: Institut Belge de la Soudure)

subit des tests mécaniques. Ces résultats fourniront des connaissances précieuses sur l'influence des paramètres de processus et la géométrie matricielle du comportement de fissures, afin d'éviter les phénomènes de fissure sur ces matériaux fragiles. Cet article approfondira en particulier les résultats obtenus jusqu'ici sur les assemblages clinchés de l'aluminium. Le consortium MECHJOIN comprend l'IBS, KU Leuven Campus Gent, Fraunhofer Institute for Machine Tools and Forming Technology (Dresden, Allemagne), l'Université Technique de Dresden (Allemagne) et l'EFB (Europäische Forschungsgesellschaft für Blechverarbeitung, Hannover, Allemagne). Le projet bénéficie de l'appui de l'IWV (Agentschap voor Innovatie door Wetenschap en Technologie).

## Clinchage

### Principe de fonctionnement général et avantages

Le clinchage est une technique d'assemblage très fiable pour matériaux ductiles en tôle. Il s'utilise de plus en plus dans le secteur du transport, la construction de machines et appareils, et dans les produits métalliques. Dans le clinchage, les tôles à assembler subissent une forte déformation plastique

locale, ce qui crée une connexion mécanique. Celle-ci est réalisée à l'aide d'outils simples: un poinçon, une matrice et éventuellement un couvre-joint. Les avantages du clinchage sont les faibles coûts d'achat et coûts opérationnels, les travaux préparatoires peu importants, le caractère sécurisant et écologique, et la reproductibilité.

### Assemblages clinchés aluminium-aluminium

La première phase consiste à étudier de façon non-destructive les assemblages clinchés (EN AW-6082-T6) en étudiant des macroscopies (Figure 14) et en utilisant un microscope électronique à balayage (Figure 15), pour caractériser la densité de fissure en fonction de la déformation. Cinq échantillons ont été étudiés pour chacun des différents réglages de déformation. L'épaisseur du fond résiduel (bottom thickness ( $S$ )) dans la Figure 13) est inversement proportionnelle à la déformation imposée durant le processus. Les résultats de l'étude non-destructive permettent de conclure que la densité de fissure augmente et que l'épaisseur de fond résiduelle diminue pour une empreinte croissante (Figure 16). Pour une épaisseur de fond résiduelle de 1,04 et 1,38 mm, on a mesuré une

densité de fissure moyenne de respectivement 8,64 et 5,58%. Quand l'empreinte augmente, la densité de fissure augmente moins vite à partir d'une valeur seuil de l'épaisseur de fond résiduelle (ici: 0,98 mm). A l'avenir, on étudiera aussi de façon métallographique si la profondeur de fissure n'augmente pas drastiquement à partir d'une valeur seuil de l'épaisseur de fond résiduelle. Différents assemblages clinchés seront étudiés dans le sens longitudinal et transversal, pour caractériser la profondeur de fissure et la présence de fissures internes en fonction de l'épaisseur de fond résiduelle. □

## APPEL A LA PARTICIPATION A CES PROJETS DE RECHERCHE

Il ressort clairement de ce qui précède que ces développements dans le soudage offrent de nouvelles possibilités pour la réalisation d'assemblages hétérogènes qualitatifs. Le choix de la technique la plus adéquate est fonction de l'application, de la taille de la série et de la nature de l'assemblage (soudure par points, recouvrement ou bout à bout). Pour l'heure, les connaissances objectives disponibles sur la faisabilité technique de l'utilisation de ces procédés pour certaines combinaisons de matériaux ou produits, sur la qualité de soudage à atteindre, ou sur l'avantage économique que peut signifier la mise en œuvre de ces processus innovants pour l'industrie sont insuffisantes. Ces projets procureront des compréhensions de ces technologies d'assemblage pour matériaux hétérogènes et permettront aux entreprises d'identifier la technologie d'assemblage adéquate pour leur produit. Au cours de ces projets, des cas représentatifs sont élaborés, sur base de l'apport des entreprises participantes. Ces projets peuvent être suivis par les entreprises intéressées. La prochaine journée d'information est prévue le 9 octobre prochain. Si vous êtes intéressé par ces projets de recherche, vous pouvez contacter l'Institut Belge de la Soudure: Koen Faes, 09/292.14.00 – [Koen.Faes@bil-ibs.be](mailto:Koen.Faes@bil-ibs.be)

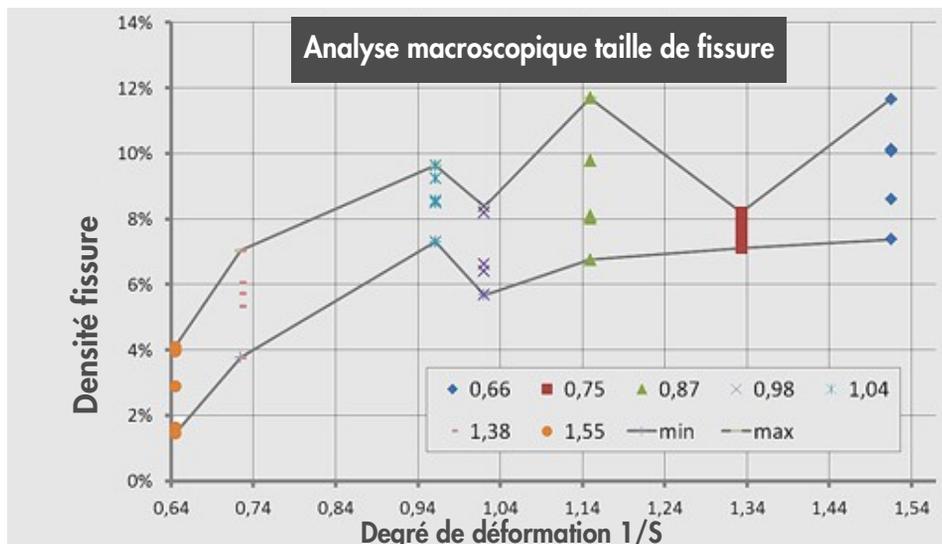


Figure 16: La densité de fissure face au degré de déformation ( $S$ : bottom thickness) (Source: Institut Belge de la Soudure)