

SOUDAGE PAR IMPULSION ELECTRO-MAGNETIQUE D'ASSEMBLAGES ALU-CUIVRE

LE PROJET DE RECHERCHE INNOJOIN ETUDIE LES TECHNOLOGIES DE SOUDAGE POUR L'ASSEMBLAGE THERMIQUE DE MATERIAUX DISSEMBLABLES

Les produits multimatériaux représentent d'énormes défis au niveau de la technologie d'assemblage en raison des propriétés de matériau très différentes des parties à assembler. Une des technologies de soudage novatrices pour relever ces défis est le soudage par impulsion électromagnétique. Ce procédé permet de réaliser des assemblages entre des métaux et des alliages très différents, difficiles à souder avec les procédés de soudage conventionnels. Cet article présente d'abord brièvement le projet de recherche INNOJOIN, étudiant différentes technologies de soudage pour l'assemblage thermique de matériaux dissemblables. Nous nous attarderons ensuite sur le soudage par impulsion électromagnétique d'assemblages d'aluminium-cuivre sous forme de tôle, utilisés entre autres dans les barres de distribution dans les systèmes de câblage et les nouvelles batteries pour les véhicules électriques.

ir. Irene Kwee et Dr. ir. Koen Faes, Institut Belge de la Soudure (IBS)

PROJETS MULTIMATERIAUX

Dans l'industrie, on cherche constamment à améliorer les éléments structuraux: dans le transport, on vise une réduction de poids, dans la construction de machines des pièces de machine plus performantes et pour les produits de consommation et de construction, une intégration accrue de fonctionnalités offre un avantage compétitif. La combinaison des matériaux classiques (acier de construction, aluminium) avec d'autres matériaux classiques (acier inoxydable) ou même de nouveaux matériaux (composites, aciers haute résistance) offre des solutions aux concepteurs, là où un seul matériau n'aurait pas convenu. Les produits multimatériaux utilisent pour chaque sous-structure un matériau avec des propriétés optimales. L'application se heurte toutefois à

des défis au niveau de la technologie d'assemblage. Différentes combinaisons de matériaux et d'épaisseurs rendent l'assemblage robuste de plus en plus complexe. Pour répondre aux besoins actuels en matière d'assemblage de matériaux dissemblables, l'IBS a lancé un certain nombre de projets de recherche, se concentrant sur de tels assemblages. Un de ces projets de recherche qui seront mis en avant dans cet article, est le projet de recherche INNOJOIN, étudiant l'assemblage thermique de métaux dissemblables sous la forme de tôle.

PROJET INNOJOIN

Contenu et objectif du projet

Le projet Cornet européen INNOJOIN englobe un large éventail de technologies de

soudage: soudage par impulsion électromagnétique, soudage par points par friction, soudage par résistance avec élément, soudage par résistance avec bande process et soudage par friction avec élément. Ces techniques sont fournies par le consortium IBS, KU Leuven (Campus De Nayer), CEWAC, SLV (Halle, Allemagne) et LWF (Paderborn, Allemagne). Une large palette de matériaux sous la forme de tôle est également étudiée. Des solutions novatrices pour les applications industrielles peuvent ainsi être attendues. Ce projet est financé avec le soutien de l'IWV (Agentschap voor Innovatie door Wetenschap en Technologie).

Objectifs

Il n'est pas évident d'estimer l'applicabilité des techniques de soudage précédentes pour les

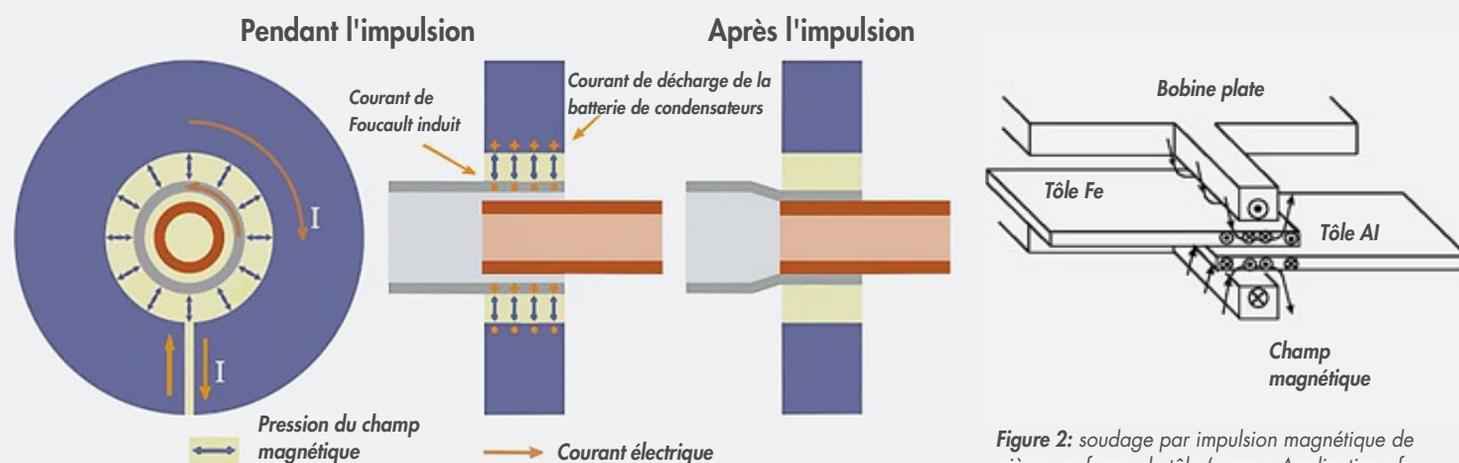


Figure 2: soudage par impulsion magnétique de pièces en forme de tôle (source: Application of magnetic pulse welding for aluminium alloys and SPCC steel sheet joints. T. Aizawa et al)

Figure 1: soudage par impulsion magnétique de pièces en forme de tube

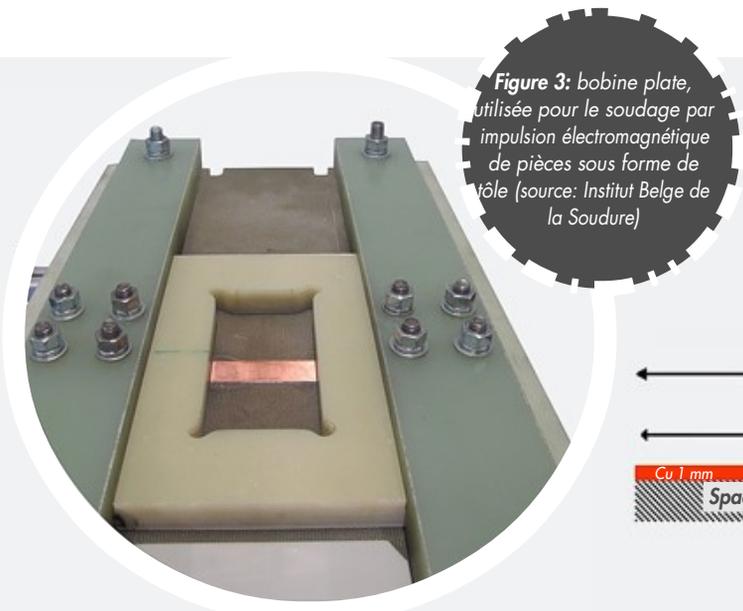
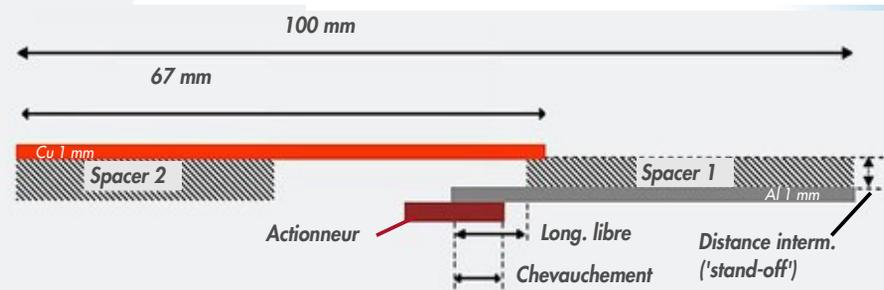


Figure 3: bobine plate, utilisée pour le soudage par impulsion électromagnétique de pièces sous forme de tôle (source: Institut Belge de la Soudure)

Figure 4: vue latérale de la configuration expérimentale du soudage par impulsion électromagnétique d'aluminium à des tôles de cuivre (source: Institut Belge de la Soudure)



entreprises transformant les métaux et les matériaux non ferreux. Outre la notoriété limitée, il n'y a pas de connaissances concernant la faisabilité technique des différents procédés de soudage pour les applications concernées, ni sur l'augmentation éventuelle de la productivité, et donc sur l'avantage économique que pourrait représenter leur utilisation. Les résultats techniques et scientifiques visés dans cette étude sont donc:

- Connaissance des propriétés des matériaux soudés (structure métallographique, dureté, propriétés mécaniques, qualité);
- Examen des possibilités des nouveaux procédés (soudabilité de matériaux, limites, ...);
- Etudes de faisabilité et analyses de coûts/avantages pour différentes applications, avancées par l'industrie;
- Publications traitant des techniques disponibles, avec les avantages et les inconvénients par rapport aux procédés conventionnels, les propriétés attendues, le domaine d'application, les coûts d'investissement, les économies possibles, etc.;
- Stimulation de l'utilisation des nouveaux procédés, via la production de pièces de démonstration représentatives pour des applications industrielles potentielles.

SOUDEGE PAR IMPULSION ELECTROMAGNETIQUE

Cet article va à présent s'attarder en détail sur le soudage par impulsion électromagnétique et l'utilisation de cette technique pour la réalisation d'assemblages d'aluminium-cuivre sous la forme de tôle.

Principe de fonctionnement général

Le soudage par impulsion magnétique appartient au groupe des procédés de soudage par pression, permettant de réaliser un assemblage entre deux surfaces en les pressant l'une contre l'autre. Le soudage par impulsion magnétique est un procédé de soudage par pression où la déformation se produit à une très grande vitesse, comme lors du soudage par explosion. La force explosive est toutefois générée d'une manière sûre, via une bobine à induction. Les forces de pression magnétiques sont générées par la décharge d'une grande quantité d'énergie électrique par la bobine pendant une durée très brève, l'impulsion. Il

s'agit également d'un procédé de soudage à l'état solide, ce qui signifie que les matériaux ne sont pas mis en fusion durant le cycle de soudage. On a ainsi la possibilité d'assembler des matériaux dissemblables. Le soudage par impulsion magnétique permet de souder des produits tubulaires (figure 1) et des tôles plates (figure 2), selon la bobine utilisée.

Configuration expérimentale pour le soudage de tôles

Le soudage par impulsion électromagnétique de tôles constitue d'un point de vue général un plus gros défi que le soudage de produits tubulaires, en raison des champs magnétiques

non uniformes générés, en fonction de la position sur la tôle. Le contrôle du champ magnétique lors du soudage de produits sous la forme de tôle est, de ce fait, bien plus difficile que lors du soudage de composants tubulaires, lors duquel un champ magnétique uniforme est bien généré autour du contour de ces composants tubulaires. Le soudage par impulsion électromagnétique de tôles est donc un domaine relativement inconnu où de nombreuses avancées novatrices sont encore possibles. La figure 3 montre la bobine plate utilisée pour le soudage de pièces sous la forme de tôle.

La figure 4 illustre la vue latérale de la configuration expérimentale du soudage par impulsion électromagnétique d'aluminium à des tôles de cuivre. Lorsqu'un courant passe par la bobine, une force électromagnétique est générée qui provoque un impact à grande vitesse de la partie de la tôle d'aluminium se chevauchant avec la bobine contre la tôle de cuivre. Les deux tôles sont séparées au moyen de plaquettes d'isolation ('spacers'). Une distance intermédiaire est ainsi créée, qu'on appelle 'stand-off'. Cette distance détermine, avec la longueur libre, l'angle et la vitesse de l'impact de la tôle d'aluminium contre celle de cuivre. L'angle et la vitesse d'impact déterminent à leur tour la qualité de l'assemblage soudé entre les deux tôles.

Avantages

Vu que le soudage par impulsion électromagnétique n'utilise pas de chaleur, mais des forces de pression pour réaliser un assemblage, il comporte d'importants avantages par rapport aux techniques de soudage conventionnelles. Il n'y a, en effet, pas de zone affectée thermiquement et le matériau ne perd pas ses propriétés. Ce procédé permet également de réaliser des assemblages entre des métaux et des alliages avec un point de fusion très différent, comme du cuivre et de l'aluminium ou de l'aluminium et de l'acier. Cette nouvelle technologie offre donc un certain nombre d'atouts très intéressants:

- Par rapport aux procédés de soudage conventionnels, le soudage par impulsion magnétique est un procédé de soudage 'à froid'. La température reste limitée à environ 50 °C. Cela signifie qu'on peut desserrer les pièces et poursuivre leur usinage directement après le soudage.



Figure 5: soudage entre une tôle d'aluminium et une tôle de cuivre (source: Institut Belge de la Soudure)

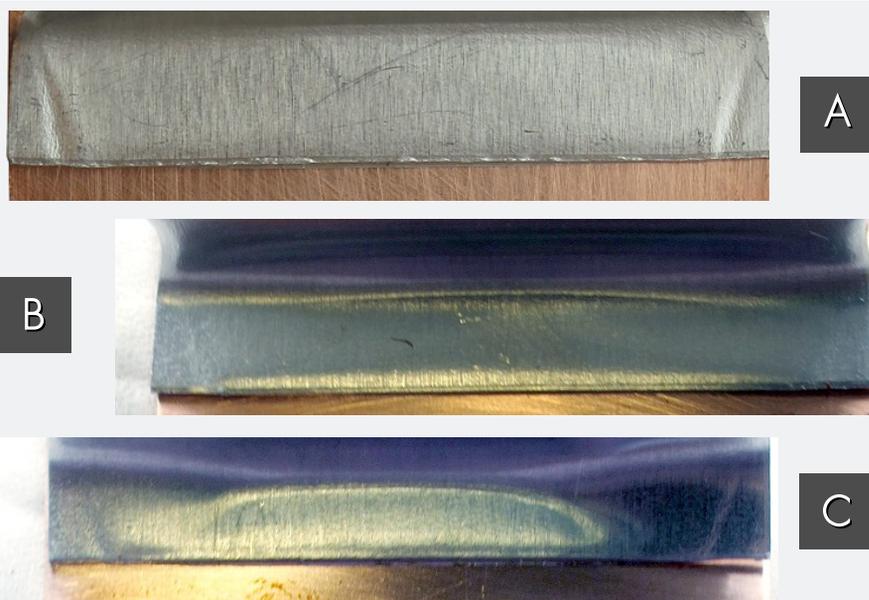


Fig. 6: zone de soudage obtenue après test 'peel': (A) 18 kJ, (B) 16 kJ, (C) 14 kJ (source: Institut Belge de la Soudure)

- Grande vitesse de production, parfois jusqu'à dix pièces par minute.
- Procédé de soudage écologique, vu l'absence de production de chaleur, de gaz ou de fumées de soudage.
- Des gaz de protection ou des matériaux d'apport ne sont pas nécessaires.
- Il ne faut pas de préparation spéciale des pièces avant le soudage.

ASSEMBLAGES D'ALUMINIUM-CUIVRE SOUS LA FORME DE TOLE

Les composants d'aluminium-cuivre peuvent constituer une bonne alternative aux pièces entièrement fabriquées en cuivre dans les applications comme les barres de distribution et les câbles pour les systèmes électriques. L'utilisation d'assemblages d'aluminium cuivre est également intéressante pour les nouvelles batteries dans les véhicules électriques, dans le cadre de la mobilité électrique.

Cet assemblage dissemblable est dicté par la réduction de poids et les économies et ce, sans perte de fonctionnalité, ni de performance.

Ces dernières années, le prix du cuivre a, en effet, explosé. Le remplacement de cuivre par de l'aluminium a dès lors une influence directe sur le coût de matériau d'un produit. Le projet INNOJOIN en cours étudie la réalisation d'assemblages d'aluminium-cuivre sous forme de tôle.

Ici, différentes séries de tests sont exécutées, en jouant sur trois paramètres: le niveau d'énergie, la distance intermédiaire entre les tôles à souder et le chevauchement entre la bobine et la tôle d'aluminium. Les assemblages soudés obtenus sont d'abord examinés visuellement, puis subissent une analyse métallographique, et les propriétés mécaniques sont, enfin, déterminées. Les résultats obtenus jusqu'ici sont présentés en détail dans la suite de cet article.

Forme de la zone de soudage

La fig. 5 montre un assemblage soudé entre une tôle d'aluminium et une tôle de cuivre, réalisé au moyen du soudage par impulsion électromagnétique. La zone de soudage présente une forme semi-elliptique, pouvant s'expliquer par l'évolution de la vitesse et de l'angle d'impact pendant le processus. Pour identifier les zones non soudées et distinguer la forme réelle de la zone de soudage, les tôles ont été séparées l'une de l'autre manuellement (test 'peel').

La figure 6 donne une vue d'ensemble de trois assemblages soudés testés, réalisés avec la même distance intermédiaire et le même chevauchement entre la bobine et la tôle d'aluminium, mais avec trois niveaux d'énergie différents: de bas en haut, 18 kJ, 16 kJ et 14 kJ. Une augmentation d'énergie donne lieu à un plus grand champ magnétique, ce qui se traduit par une plus grande surface de la zone de soudage.

Morphologie de l'interface de soudage

Une analyse métallographique montre qu'une interface plate ou ondulée est obtenue, ainsi que la formation de différentes liaisons intermétalliques dans l'interface de soudage. Celles-ci peuvent être causées par un mélange mécanique, une déformation plastique ou l'apparition de phénomènes de fusion. Une augmentation de l'énergie résulte en règle générale en des ondulations plus prononcées et en une couche intermétallique plus épaisse, dans laquelle surviennent aussi plus de porosités et de fissures.

La figure 7 illustre l'évolution générale de l'interface de soudage dans un assemblage d'aluminium-cuivre sous forme de tôle. Au début du soudage, il y a une interface à continuité complète et sans liaisons intermétalliques, ni défauts observables (figure 7a). Une liaison intermétallique gris clair relativement plate et fine (2-10 µm) avec de petits défauts se forme ensuite. Cette couche contient plus d'aluminium que de cuivre, étant donné qu'il y a environ 31-41 % poids de cuivre (figure 7b). Puis, des liaisons intermétalliques gris foncé plus épaisses (3-26 µm) se forment, en combi-

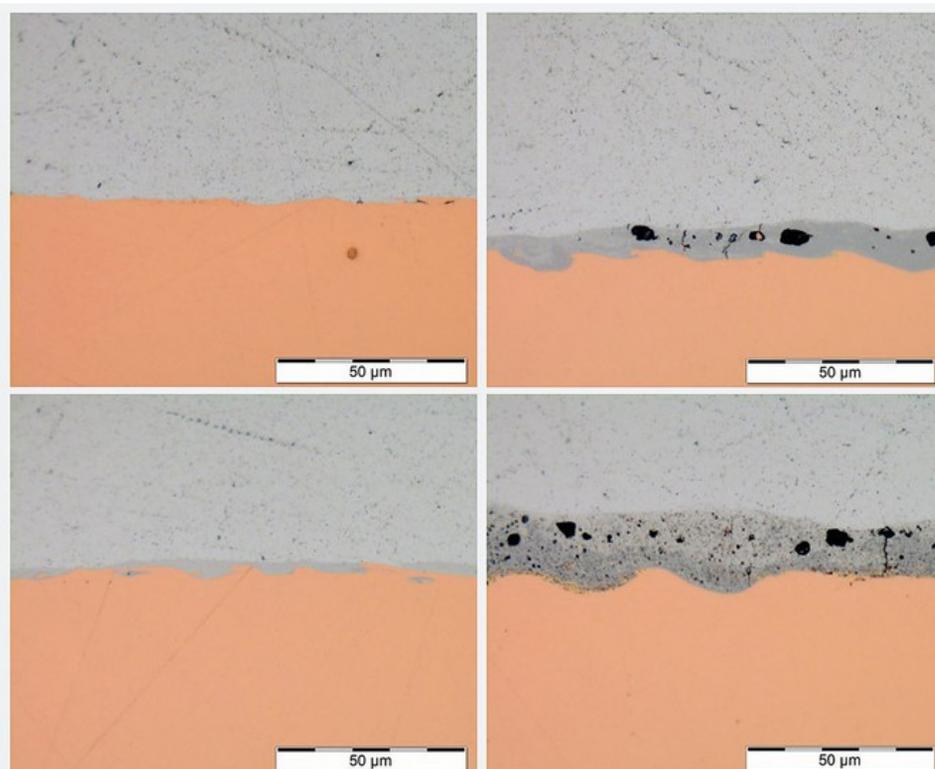


Figure 7: évolution de l'interface de soudage (A), continuité complète (B), liaison intermétallique gris clair: 31-41 % poids de cuivre (C), liaison intermétallique gris foncé: 54-62 % poids de cuivre (D), liaison intermétallique gris foncé et brun clair: 72-75 % poids de cuivre (source: Institut Belge de la Soudure)

raison ou non avec des zones gris clair. Ces couches présentent en règle générale plus de porosités et de fissures, et contiennent également plus de cuivre, à savoir 54-62 % poids (figure 7c).

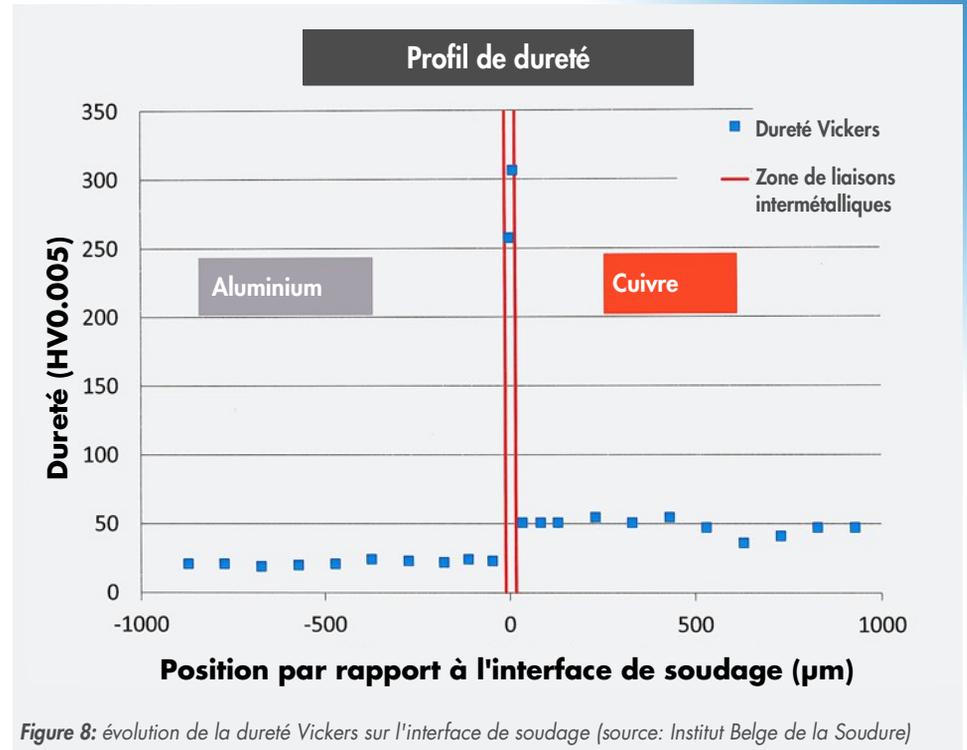
L'assemblage d'aluminium-cuivre se termine, enfin, par une interface de soudage épaisse (14-39 μm), présentant un mélange de liaisons intermétalliques gris clair, gris foncé et brun clair, avec une grande quantité de porosités et de fissures. Ce sont les liaisons intermétalliques brun clair qui contiennent la plus grande quantité de cuivre, c'est-à-dire 72-75 % poids (figure 7d).

Dureté

La figure 8 montre l'évolution de la dureté Vickers sur l'interface de soudage. Les liaisons intermétalliques possèdent une dureté clairement plus élevée ($\approx 283 \text{ HV}$) que le cuivre et l'aluminium voisins ($\approx 48 \text{ HV}$ et 22 HV respectivement), ce qui peut être dû à l'apparition d'une forte déformation plastique ou à un affinement de la microstructure par la fusion, puis une solidification rapide.

Résistance à la traction

La figure 9 illustre la force de traction en fonction du niveau d'énergie et pour différents niveaux de distance intermédiaire et de chevauchement. Des résistances à la traction plus élevées ont été obtenues avec des niveaux d'énergie plus élevés et des distances intermédiaires plus petites. Une augmentation d'énergie se traduit, en outre, par une plus grande largeur de la zone de soudage restante après le test de traction (figure 10). Cette largeur de soudage peut par consé-



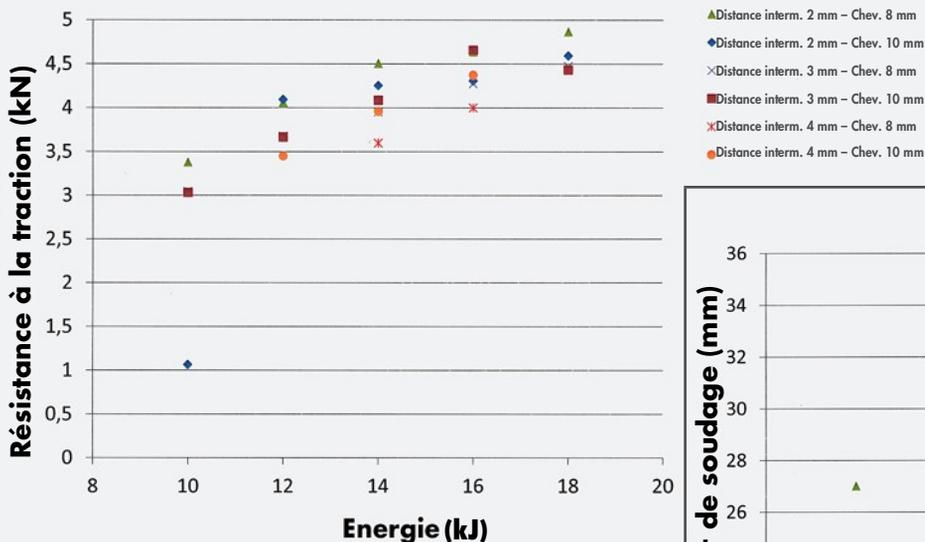
quent contribuer à la résistance à la traction pouvant être atteinte: en règle générale, une plus grande largeur de soudage a une plus grande résistance à la traction.

CONCLUSION

Le soudage par impulsion électromagnétique est un procédé d'assemblage novateur utilisant des forces électromagnétiques pour déformer et souder des pièces. Ce procédé permet de réaliser des assemblages entre des métaux et des alliages très différents, difficiles à assembler avec les procédés de soudage par fusion conventionnels. Des composants hybrides

peuvent ainsi être fabriqués, garantissant une réduction de poids et des économies. Les assemblages d'aluminium-cuivre sous forme de tôle, lors desquels différents types et différentes quantités de liaisons intermétalliques surviennent dans l'interface de soudage, constituent un exemple. Ceux-ci présentent une plus grande dureté que l'aluminium et le cuivre purs. La présence de ces liaisons intermétalliques dures, ainsi que la largeur de la zone de soudage obtenue, peuvent éventuellement contribuer à une résistance à la traction suffisante des assemblages d'aluminium-cuivre sous forme de tôle. □

Résistance à la traction versus énergie



Largeur de soudage versus énergie

