



HAL
open science

Procédé d'assemblage multi-matériaux par fabrication additive in situ par projection à froid (Cold Spray) et texturation laser

Amela Kusuran, Ludovic Vitu, David Mercs, Marie-Pierre Planche, Geoffrey Darut

► To cite this version:

Amela Kusuran, Ludovic Vitu, David Mercs, Marie-Pierre Planche, Geoffrey Darut. Procédé d'assemblage multi-matériaux par fabrication additive in situ par projection à froid (Cold Spray) et texturation laser. Conference Manufacturing21, Ecole Normale Supérieure Paris-Saclay [ENS Paris Saclay], Oct 2022, Gif Sur Yvette, France. hal-04011654

HAL Id: hal-04011654

<https://hal.science/hal-04011654v1>

Submitted on 2 Mar 2023

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Procédé d'assemblage multi-matériaux par fabrication additive in situ par projection à froid (Cold Spray) et texturation laser

Amela KUSURAN^(a), Ludovic VITU^(a), David MERCS^(b), Geoffrey DARUT^(a), Marie-Pierre PLANCHE^(a)

a. ICB-PMDM, UMR 6303, CNRS, Univ. Bourgogne Franche-Comté, UTBM, 90010 Belfort, France

b. LISI Automotive, 2 rue Juvénal Viellard, 90600 Grandvillars, France

Mail : amela.kusuran@utbm.fr

Résumé : La fabrication additive par projection à froid (Cold Spray) couplée à la texturation laser (création de motifs micro-géométriques à la surface d'un matériau) permet de créer un point de fixation entre deux matériaux disjoints, l'acier et l'alliage d'aluminium par exemple, dans le but d'obtenir un assemblage multi-matériaux robuste et résistant. L'intérêt est de montrer la faisabilité et d'étudier les propriétés mécaniques pour différentes configurations d'assemblage. Les dépôts obtenus par Cold Spray possèdent des propriétés métallurgiques élevées du fait de la forte déformation des particules lorsqu'elles impactent le substrat. Cela induit une porosité et une rugosité faibles, une dureté élevée mais une rupture fragile. Comparativement à d'autres procédés d'assemblage multi-matériaux tels que le Friction Stir Spot Welding ou le Laser Welding, les résultats mécaniques en traction et cisaillement sont relativement similaires et permettent au procédé présenté ici d'être un concurrent émergent.

Mots clés : Assemblage multi-matériaux, Cold Spray, Texturation laser, Automobile.

1 Introduction

Ces dernières décennies, le secteur automobile a été contraint de s'impliquer très largement à la réduction des émissions de CO_2 , notamment sous la pression de

nombreuses restrictions européennes et internationales (Filière Automobile et Mobilités, 2018). L'électrification massive des véhicules ou la conservation d'une motorisation thermique sur des véhicules allégés permettraient de faire décroître considérablement ces gaz à effet de serre. Cet allègement est possible grâce à l'utilisation d'assemblages multi-matériaux. Les matériaux possédant des densités faibles mais de bonnes résistances mécaniques sont à privilégier comme l'alliage d'aluminium par exemple afin de remplacer en partie l'acier.

La majorité des assemblages entre acier et aluminium sont réalisés par des procédés mécaniques : vissage, rivetage ou clinchage pour les plus connus. D'autres procédés de type soudage sans passage à l'état liquide, tels que le soudage par friction par exemple, ont permis, en évitant la formation des composés intermétalliques qui fragilisent la liaison, d'obtenir des assemblages de qualité. En effet, l'assemblage de l'acier à l'aluminium avec passage à l'état liquide est problématique en raison des différences de coefficients de conductivité thermique, de températures de fusion, de faibles limites de solubilité et de la présence d'une couche d'alumine à la surface de l'aluminium. La faible solubilité du fer dans l'aluminium, voisine de zéro, entraîne la formation de phases intermétalliques : $FeAl_3$, Fe_2Al_5 , $FeAl_2$ et $FeAl$ qui sont des phases fragiles. Ces phases sont obligatoirement créées lors de l'interaction entre l'acier et l'aluminium, cependant leur présence, en fragilisant la liaison, rend l'assemblage difficile (Sierra, 2005).

Dans le cadre de cette étude, l'objectif est de réaliser des assemblages multi-matériaux à l'aide d'un nouveau procédé innovant, LISI μ -MACH-AP® (LISI micro-Mechanical Anchoring Cold Hybrid Assembly Process®), afin de permettre à l'acier et à l'aluminium, deux matériaux disjoints, d'être assemblés sans modifier leur nature métallurgique de base. La faisabilité et les propriétés mécaniques des assemblages ainsi créés sont décrits dans cet article. Ce procédé combine la texturation laser et la projection thermique de type Cold Spray, deux grands procédés qui seront expliqués plus en détail par la suite.

2 Matériaux et moyens expérimentaux

2.1 Matériaux

Les matériaux utilisés pour cet assemblage sont couramment employés en industrie automobile. Les propriétés mécaniques de ces alliages sont données dans le tableau 1 (Euralliage – Icaunaise, 2016) :

Tableau 1 : Propriétés mécaniques des alliages

Alliage	Acier	Alliage d'aluminium
$\sigma_{0.2}$ (MPa)	160	145
σ_m (MPa)	410	225
ε (%)	37	13

L'acier utilisé dans cette étude est un acier DC04, faible en carbone (ou ferritique), obtenu par laminage à froid. Il est particulièrement apprécié en emboutissage. La composition chimique standard de l'acier DC04 est donnée dans le tableau 2 :

Tableau 2 : Composition chimique de l'acier DC04

Élément chimique	C	Mn	P	S
DC04 (en % de masse)	0.08	0.4	0.03	0.03

L'alliage d'aluminium utilisé ici est un alliage d'aluminium 2017, également laminé. La composition chimique de cet alliage est donné dans le tableau 3 :

Tableau 3 : Composition chimique de l'alliage d'aluminium 2017A

Élément chimique	Cu	Mg	Mn	Si	Fe	Zn	Cr	Ti+Zr
2017A (en % de masse)	4.2	0.75	0.6	0.6	0.3	0.18	0.03	0.04

La poudre utilisée pour élaborer les cordons d'assemblage est une poudre d'alliage d'aluminium AlSi10Mg, de granulométrie comprise entre 25 et 45 μm . La répartition granulométrique est donnée en figure 1a. C'est une poudre à particules sphériques (figure 1b), atomisée à l'argon, de base aluminium (plus de 80%), contenant environ 10% de silicium et 0.3% de magnésium.

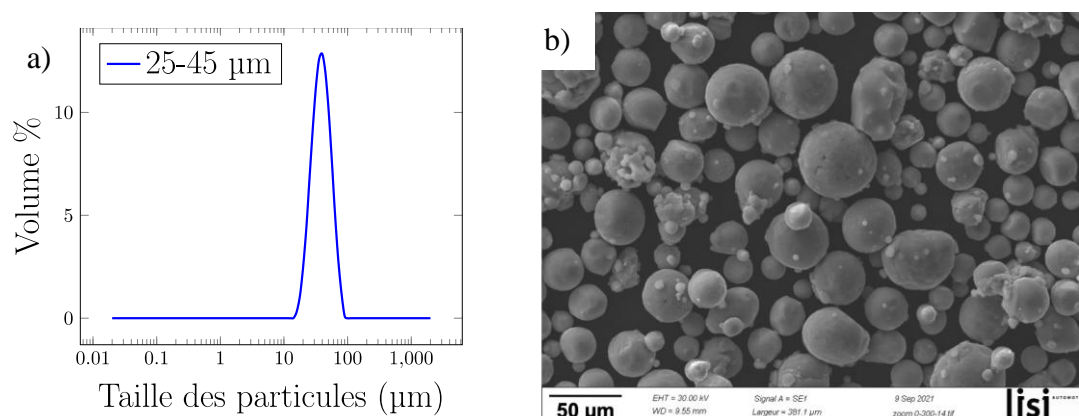


Figure 1. Répartition granulométrique de la poudre d'alliage d'aluminium AlSi10Mg (a) et image MEB de la poudre (b)

2.2 Texturation laser

Le procédé de texturation laser consiste en l'utilisation d'un faisceau d'énergie concentré en spot très fin qui permet de modifier la surface d'un matériau par un processus d'ablation de matière afin de lui donner un aspect de surface spécifique (Jouvard, 2007). Les motifs les plus souvent utilisés sont les matrices de trous pour d'autres applications comme la lubrification ou le mouillage réactif. D'autres motifs sont réalisables tels que des lignes, des hachures, des cercles concentriques ou encore des chevrons (la liste n'étant pas exhaustive). Le laser utilisé est un laser nanoseconde, impulsionnel, de longueur d'onde 1064 nm, à fibre optique avec une répartition gaussienne de l'énergie. La puissance maximale du laser est de 20 W associée à une

fréquence variant de 20 à 100 kHz. La distance focale du laser est de 160 mm. Pour un jeu de paramètres impliquant la puissance et la fréquence du laser ainsi que le nombre d'impulsions (ou d'impacts), il est possible de créer des cavités plus ou moins profondes, permettant d'accueillir les particules projetées.

Il convient d'optimiser ces paramètres pour chaque matériau afin de comprendre la réponse de ce dernier lorsqu'il est soumis à un impact laser.

Pour l'acier et l'alliage d'aluminium, la plage des diamètres obtenus est comprise entre 30 et 100 μm . Concernant les profondeurs, celles-ci varient de 5 à 200 μm pour l'acier et de 5 à 720 μm pour l'alliage d'aluminium. Les comportements de l'acier et de l'alliage d'aluminium sont différents à paramètres égaux. En effet, les propriétés thermiques n'étant pas similaires, la propagation de la chaleur est plus importante pour l'aluminium que pour l'acier, entraînant des cavités plus profondes. L'étude complète de ces deux matériaux permet de prédire leur comportement selon les sollicitations du laser (Kusuran, 2020). Outre des propriétés thermiques différentes entre l'acier et l'alliage d'aluminium, la question de la réflectivité/absorptivité de chacun de ces matériaux est en jeu et nécessite un ajustement des conditions de texturation. Les paramètres pour ces deux matériaux ne sont donc pas les mêmes malgré l'utilisation du laser ayant la même longueur d'onde. L'analyse complète de l'absorption est en cours de réalisation.

Les deux matériaux ont été texturés en matrice de trous comme le montre la figure 2 (a) pour l'acier et b) pour l'alliage d'aluminium).

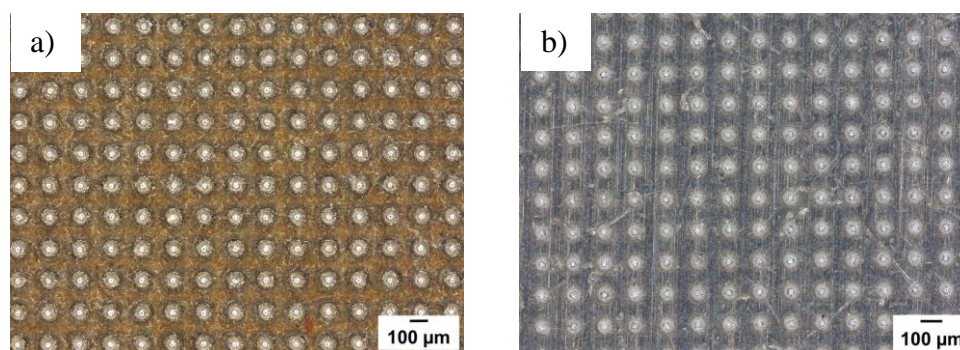


Figure 2. Texturation laser en matrice de trous sur l'acier (a) et sur l'alliage d'aluminium (b)

Les cavités texturées sont analysées en surface et en coupe au microscope numérique et optique afin de permettre de déterminer les profondeurs et les diamètres des trous.

2.3 Projection thermique à froid (Cold Spray)

Le procédé Cold Spray consiste en la création d'un dépôt sur une surface (substrat) avec une grande diversité de matériaux (métaux, céramiques, cermets, polymères, etc.). La poudre précurseur, ici d'alliage d'aluminium AlSi10Mg, est injectée dans une chambre sous pression (entre 10 à 60 Bars) et préchauffée (20 à 1100°C) en amont d'une buse convergente/divergente, dite De Laval, orientée

perpendiculairement à la surface (Jeandin, 2020). Les particules ainsi chauffées et accélérées s'étalent sur la surface à une distance comprise entre 20 et 25 mm. Au fur et à mesure que les particules impactent la surface, elles se déforment les unes sur les autres et forment un dépôt dense comme le montre la figure 3, micrographie en coupe transverse d'un revêtement de poudre AlSi10Mg déposé sur de l'acier.

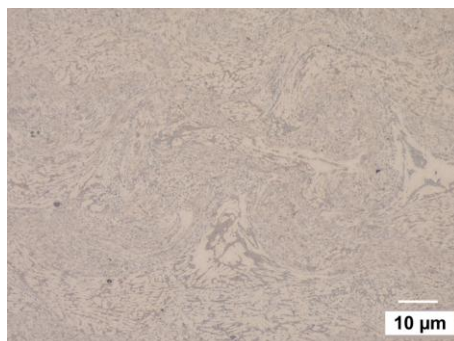


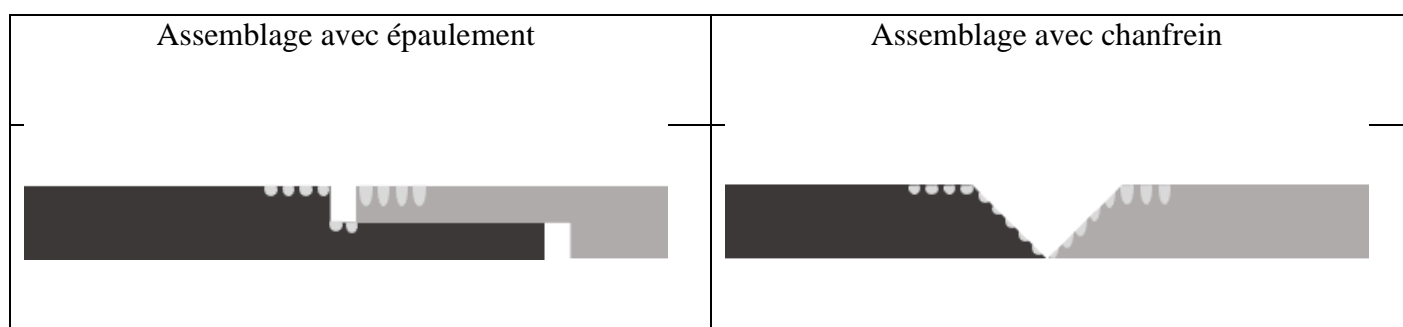
Figure 3. Microstructure des particules de AlSi10Mg déformées formant un revêtement par projection à froid

Pour une même poudre, il convient d'optimiser les paramètres de projection afin d'obtenir des dépôts de qualité. Les paramètres de projection sont donnés dans le tableau 4 :

Tableau 4 : Paramètres de projection

Gaz principal	Azote
Gaz porteur	Argon
Pression (Bar)	30-32
Température (°C)	450

L'épaisseur des plaques d'acier et d'alliage d'aluminium à assembler est de 2 mm. Il y a plusieurs configurations possibles pour l'assemblage dans le cadre de cette étude et sont représentés schématiquement en figure 4. Le cordon ou point d'assemblage est réalisé à la suite de la texturation par fabrication additive in situ et le robot permettant de créer l'assemblage se déplace à une vitesse de 50 mm.s⁻¹ et suit une trajectoire préalablement définie.



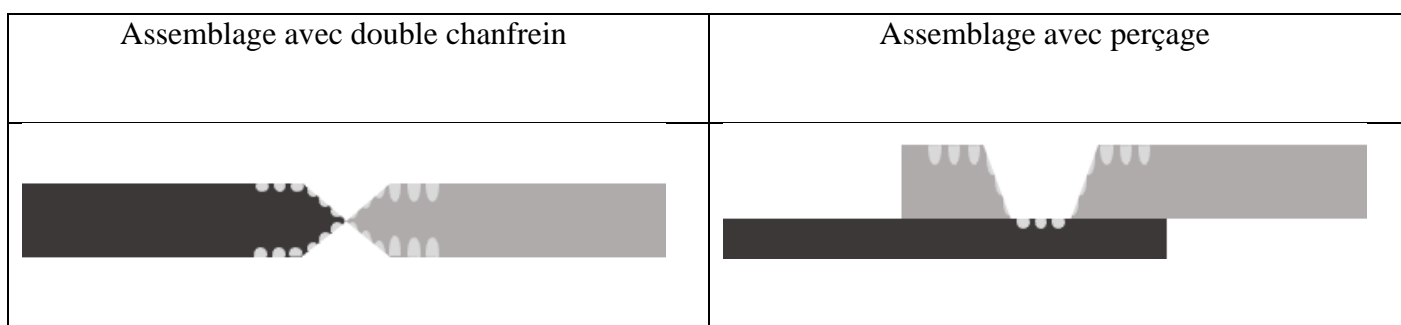


Figure 4. Schémas représentant les vues en coupe des configurations d'assemblage entre acier (noir) et alliage d'aluminium (gris) ; la zone texturée étant représentée en gris très clair

3 Discussion et résultats

3.1 Propriétés métallurgiques et mécaniques des dépôts

Les propriétés métallurgiques des dépôts ont été déterminés au microscope numérique. Les cordons AlSi10Mg obtenus par projection à froid possèdent une porosité inférieure à 1 ± 0.5 %. L'angle d'impact des particules est primordial et doit s'approcher de 90° pour optimiser la densité du revêtement et le rendement d'utilisation de la poudre. Concernant la rugosité de surface après projection, elle est généralement faible, inférieure à 10 ± 2 μm .

Après projection du revêtement sur les surfaces texturées en matrice de trous, les micrographies des cavités vides et remplies sont observables en figure 5 pour une texturation sur l'acier (a) et sur l'alliage d'aluminium (b).

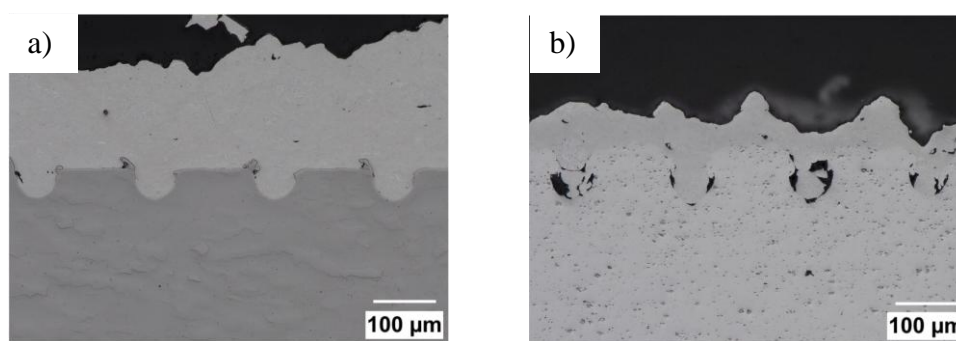


Figure 5. Micrographies des cavités remplies par projection à froid de poudre d'aluminium sur un substrat en acier a) et en alliage d'aluminium b).

Les taux de remplissage des cavités ont été déterminés au microscope numérique, de la même manière que cela a été réalisé pour la porosité. Les espaces non remplis sont considérés comme des porosités. Selon le motif de texturation, ici en matrice de trous, les taux de remplissage sont différents d'un matériau à l'autre pour un même nombre d'impulsions (ou impacts). Le taux de remplissage a été mesuré par microscope numérique. En effet, le taux de remplissage de l'acier est de 100% pour tous les types de motifs. Cependant, contrairement à l'acier, l'alliage d'aluminium possède un remplissage allant de 70% à 100% pour différents types de motifs. Ces taux de remplissage différents sont dus en grande partie à la dureté de chacun des matériaux.

En effet, après texturation laser, les trous formés ont subis une légère trempe (fonte et refroidissement rapide) et de ce fait, ne se déforment pas après impact de la poudre. En ce qui concerne l'alliage d'aluminium, le phénomène est similaire mais la dureté de la poudre est supérieure. Ainsi, après projection de poudre, les trous sont déformés en surface, fermant l'entrée du trou et ne permettent donc pas aux particules de poudre de pénétrer à l'intérieur.

Des tests de traction adhérence selon la norme ASTM C633 (ASTM, 2021) ont été effectués sur des substrats d'acier et d'alliage d'aluminium bruts, sablés et texturés avec le même nombre d'impulsions. Sur un substrat en acier, les valeurs des contraintes à rupture sont d'environ 80 MPa pour des matrices de trous et des lignes, pour des cercles concentriques cette valeur est de 25 MPa. Sur un substrat en alliage d'aluminium, pour tous les types de motifs, les valeurs des contraintes à rupture sont d'environ 80 MPa.

3.2 Propriétés mécaniques des assemblages

Deux éprouvettes rectangulaires (120x40x2 mm) sont utilisées pour créer un assemblage. Certaines éprouvettes présentent des géométries différentes, les schémas étant donnés en figure 4 et les sections transverses en figure 6 :

- un chanfrein à 45° dans le sens de la largeur (a),
- un perçage au diamètre variable de 7.5 mm à 15 mm (b),
- un épaulement (c),
- un double chanfrein à 45°, de part et d'autres des deux éprouvettes (d).

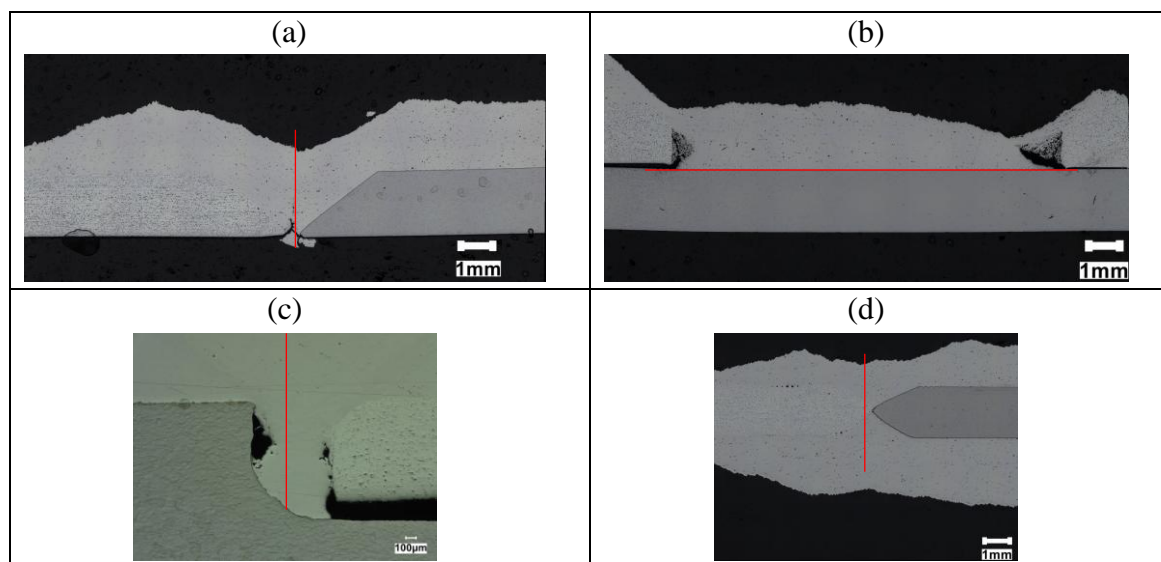


Figure 6. Sections transverses des points d'assemblage dans les différentes configurations (les lignes rouges représentent les zones de rupture lors des essais de traction/cisaillement)

Une fois les éprouvettes assemblées, celles-ci ont été disjointes par une machine de traction dans le cas d'une traction uni-axiale ou d'un cisaillement.

La rupture des assemblages s'effectue au niveau du cordon d'assemblage entre l'acier et l'aluminium dans le cas d'un point de fixation s'apparentant à un "cordon de soudure" (figures 6(a), 6(c), 6(d)). Dans le cas d'un point de fixation s'apparentant à un "rivet", la rupture s'effectue systématiquement au niveau des pieds d'ancrage (figure 6(b)) à la surface du matériau dans le cadre de ces essais. La rupture est de nature fragile. En effet, les particules de poudre "entières" sont observables. Elles sont plus ou moins déformées mais cela montre que la rupture est fragile (Giraud, 2014).

Les courbes de traction et cisaillement associées confirment le mode de rupture décrit précédemment. En effet, il est possible d'observer sur le graphe donné en figure 7 qu'il n'y a pas de plasticité, seulement une partie élastique.

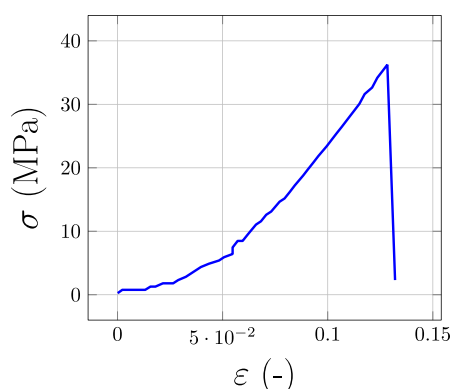


Figure 7. Courbe de traction dans le cas d'un assemblage avec chanfrein à 45°

Outre le fait que la ductilité du dépôt reste à être améliorée, il existe d'autres aléas quant à la faible résistance mécanique des cordons. Un mauvais alignement des éprouvettes lors de l'assemblage, des paramètres de projection trop faibles ou une traction mal réalisée engendrent un affaiblissement du cordon.

La résistance mécanique du cordon d'assemblage peut être augmentée par une meilleure ductilité de ce dernier. Il est possible de donner de la ductilité au cordon ainsi obtenu en effectuant un traitement thermique post-projection. Lors d'une stratégie d'assemblage avec un perçage par exemple, un traitement thermique post-projection de 3h à 295°C a été appliqué. La figure 8 montre la courbe de cisaillement avant et après traitement thermique :

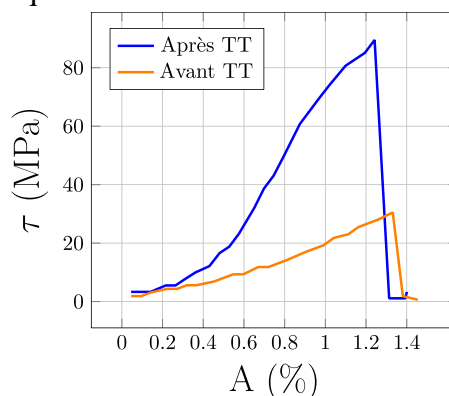


Figure 8. Courbe de cisaillement dans le cas d'un assemblage avec perçage de diamètre 15 mm

Il est à noter qu'il y a un début de plasticité lors du cisaillement de l'assemblage après traitement thermique comparativement à un assemblage brut de projection. De plus, la résistance mécanique est nettement améliorée, passant de 30 à 90 MPa.

Comparativement à d'autres procédés d'assemblage multi-matériaux tels que le Friction Stir Spot Welding, les valeurs obtenues en cisaillement grâce à l'association de la texturation laser et du Cold Spray d'un alliage d'aluminium sont similaires en termes de contrainte à rupture (70 MPa pour le procédé Friction Stir Spot Welding (Gullino, 2019)). Par analogie aux méthodes d'assemblages linéaires comme le Laser Welding ou le Friction Stir Welding et aux valeurs associées (190 MPa et 230 MPa respectivement (Meschut, 2014)), les valeurs obtenues en traction uni-axiale dans le cas du procédé LISI μ -MACH AP[®] sont inférieures (50 MPa) mais peuvent être expliquées par la nature du cordon d'assemblage qui est en alliage d'aluminium. La réalisation d'un cordon d'assemblage avec un acier faiblement allié par exemple permettrait de résoudre ce problème.

3.3 Mise en place d'un démonstrateur industriel

Cette étude est le point de départ d'un projet industriel mené par LISI Automotive, entreprise qui conçoit et fabrique des solutions d'assemblage rapides et composants de sécurité. L'allègement des véhicules est au cœur des problématiques et des besoins du marché automobile actuel avec des raisons énoncées en introduction.

Ainsi, l'allègement des véhicules et plus globalement la réduction de l'impact environnemental du marché automobile sont au cœur des innovations LISI Automotive.

Afin de répondre aux différents besoins du marché automobile, LISI Automotive a développé le procédé d'assemblage exposé dans cette étude et nommé LISI μ -MACH ASSEMBLY PROCESS[®].

En effet, un démonstrateur industriel (niveau 7 sur l'échelle TRL) a été mis en place dans la région Franche-Comté, à Delle (90). Ce démonstrateur comprend une cabine insonorisée (figure 9a) avec un robot permettant d'utiliser le laser de texturation et la torche Cold Spray (figure 9b). La table de travail de 1m² permet de traiter de larges pièces selon le besoin afin d'élaborer des assemblages mais également pour d'autres applications plus spécifiques selon le besoin de chaque client. Le procédé prend place dans le nouveau LISI Automotive Innovation Lab.

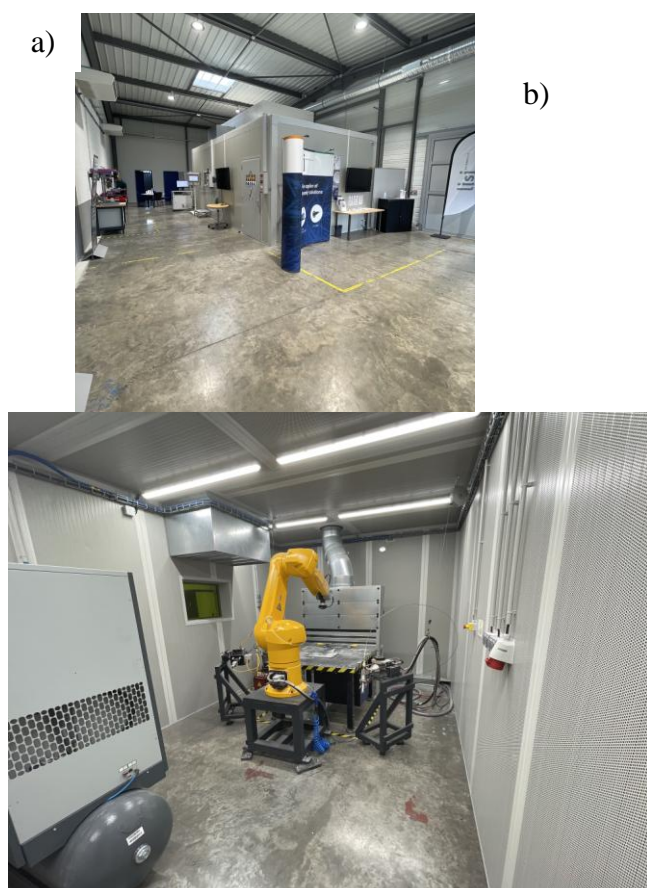


Figure 9. LISI Automotive Innovation Lab a) et intérieur de la cabine insonorisée avec le robot, le laser de texturation et la torche Cold Spray b)

4 Conclusion

Les premiers résultats obtenus pour les différentes stratégies de conception montrent la faisabilité de l'assemblage acier/alliage d'aluminium à l'aide d'un cordon d'assemblage également en alliage d'aluminium. En effet, ce nouveau procédé d'assemblage, sous certaines conditions, permet d'obtenir des résistances mécaniques voisines de celles obtenues par assemblage mécanique.

Ces résultats en termes de rupture en traction et en cisaillement permettent de conforter l'idée que ce procédé est tout à fait compétitif et pourrait, à terme, venir en complément ou en remplacement des procédés d'assemblage conventionnels. Des essais mécaniques tels que l'étude en fatigue, le vieillissement prématuré et le bain salant permettront de compléter ceux déjà étudiés.

Cependant, ce nouveau procédé est novateur, créant une rupture technologique, et permet donc de réaliser des assemblages multi-matériaux, robustes, qui à terme, pourraient remplacer les procédés conventionnels. L'utilisation d'autres matériaux métalliques mais également des matériaux composites ou thermoplastiques est envisagée pour des assemblages de ce type.

Références

ASTM C633-13, *Standard Test Method for Adhesion or Cohesion Strength of Thermal Spray Coatings*, American Society for Testing and Materials, 2021.

Euralliage (<https://www.euralliage.com/alliage.html>).

Filière Automobile et Mobilités, *Les matériaux pour l'allègement des véhicules*, 2018.

D. Giraud, *Étude des composantes mécanique et métallurgique dans la liaison revêtement-substrat obtenue par projection dynamique par gaz froid pour les systèmes «Aluminium/Polyamide6,6» et «Titane/TA6V»*, Thèse de doctorat, École Nationale Supérieure des Mines de Paris, 2014.

A. Gullino, P. Matteis, F. D. Aiuto, *Review of aluminum-to-steel welding technologies for car-body applications*, *Metals*, 2019.

ICAunaise des métaux, *Acier doux*, 2016.

D. H. James, *A review of experimental findings in surface preparation for thermal spraying*, *Journal of Mechanical Working Technology*, vol. 10, no 2, p. 221-232, juill. 1984.

M. Jeandin, M. Ducos, *Projection dynamique par gaz froid (ou cold spray)*, *Traitements Des Métaux*, 2020.

J.-M. Jouvard, A. Soveja, L. Lavisse, *Traitement de surface métallique induit par faisceau laser Nd :YAG q-switch de marquage : modélisation d'un impact laser*, p. 1-5, août 2007.

A. Kusuran, *Rapport interne sur la texturation de l'acier et de l'alliage d'aluminium*, 2020

G. Meschut, V. Janzen, T. Olferman, *Innovative and highly productive joining technologies for multimaterial lightweight car body structures*, *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2014.

G. Sierra, F. Deschaux-Beaume, P. Peyre, D. Stuart, G. Fras, *Assemblage hétérogène acier/aluminium par soudage TIG*, 2005