

# Formation du capillaire de vapeur lors de l'interaction de laser de puissance avec la jonction dissimilaire Al-Mg

Massaud MOSTAFA<sup>1</sup>, Iryna TOMASHCHUK<sup>2\*</sup>, Tobit CAUDWELL<sup>2</sup>, Pierre SALLAMAND<sup>2</sup>, Mélanie DUBAND<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Laser Tech. & Environment Lab, Faculty of Science, South Valley University, Qena, 83523 - Egypt

<sup>2</sup>Laboratoire Interdisciplinaire Carnot de Bourgogne, UMR 6303 CNRS - Université de Bourgogne-Franche Comté, 71200 - Le Creusot, France

\*(auteur correspondant : iryna.tomashchuk@u-bourgogne.fr)

**Résumé** - La visualisation du comportement du capillaire formé lors d'un soudage laser entre des alliages d'aluminium 5754 et de magnésium AZ31 a été réalisée au travers d'une lame de quartz. L'effet du décalage du faisceau laser par rapport au plan de joint sur le développement du capillaire a été étudié. L'observation par caméra rapide et l'analyse post-mortem ont permis de suivre la dynamique du creusement du capillaire et de quantifier l'effet de l'hétérogénéité de la jonction. Il a été trouvé que le capillaire formé présente une asymétrie et un décalage importants par rapport à la position du faisceau laser. La quantification de l'effet de la différence des propriétés physiques entre les deux alliages sur le comportement du capillaire doit permettre de faciliter le choix des conditions opératoires pour la réalisation d'assemblages.

## Nomenclature

$a$  coefficient d'absorption laser  
 $h$  pénétration du capillaire, mm  
 $L$  chaleur latente,  $\text{kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$   
 $P$  puissance laser, kW  
 $t$  temps, ms  
 $T$  température, K  
 $V_p$  vitesse du perçage,  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$   
 $\varnothing$  diamètre du faisceau laser,  $\mu\text{m}$   
*Symboles grecs*  
 $\alpha$  diffusivité thermique,  $\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$

$\Delta d$  décalage du capillaire par rapport au plan de joint,  $\mu\text{m}$   
 $\Delta h$  incrément de la pénétration du capillaire durant le temps  $\Delta t$ , mm  
 $\Delta x$  décalage du laser par rapport au plan de joint,  $\mu\text{m}$

### *Indices et exposants*

f fusion  
l liquide  
s solide  
v vaporisation

## 1. Introduction

Lors du soudage de métaux par laser de puissance, il se forme un capillaire de vapeur dont la géométrie et la dynamique influencent fortement la zone fondue. Si les deux matériaux considérés sont dissemblables, la différence de leurs propriétés physiques peut provoquer de part et d'autre, une asymétrie du capillaire et un décalage par rapport au plan de joint [1]. Cela a des conséquences immédiates sur la forme et la composition du cordon. Très peu d'études expérimentales ou théoriques sont dédiées à la compréhension de ce phénomène. La visualisation en profondeur du capillaire laser formé entre des matériaux de nature différente n'a jamais été réalisée auparavant.

Il existe quelques méthodes d'analyse d'une forme du capillaire. Schneider [2] a mis au point une méthode d'analyse post-mortem qui consiste à réaliser un perçage laser à l'interface entre deux plaques polies, les séparer et mesurer la cavité laissée par le capillaire. De nombreux auteurs ont utilisé la radiographie X [3,4,5] pour visualiser le comportement du

capillaire lors de soudage continu. Cependant le contraste et la résolution d'image sont souvent insuffisants avec cette méthode. L'imagerie rapide (HSI) est de plus en plus utilisée pour l'observation de la surface libre de la zone fondue. La zone d'interaction est éclairée par diode laser et la caméra rapide (HSC) acquiert les images à la longueur d'onde du laser diode grâce à un filtre interférentiel (810 nm). Ceci permet d'éviter la saturation de l'image par le panache lumineux. Fabbro [6] a ainsi décrit les différents régimes du capillaire laser en fonction de la vitesse de soudage. Erikson et al [7] ont appliqué un traitement d'image pour extraire la forme du capillaire. Torkamany et al [1] ont également utilisé la HSI pour quantifier l'asymétrie du capillaire par rapport au plan de joint lors de l'assemblage titane-niobium. Cette méthode ne permet cependant, que d'observer l'ouverture supérieure du capillaire. Mostafa et al [8] ont proposé une méthode d'observation du capillaire au travers d'une lame de quartz pour étudier son comportement lors du perçage du zinc pur. Mostafa [9] a démontré que la présence d'une lame de quartz transparente au rayonnement laser diminue la profondeur du capillaire d'environ 20% mais ne change pas la dynamique des phénomènes.

Dans la présente étude, cette méthode est appliquée au cas de la jonction dissimilaire aluminium-magnésium, afin de suivre l'évolution en profondeur du capillaire à la jonction. Ces deux alliages ont été choisis à cause de leurs températures de fusion et de vaporisation relativement faibles, ce qui permet de limiter la dégradation thermique du quartz. L'effet d'un décalage du laser par rapport au plan de joint sur la forme du capillaire et la dynamique de perçage est étudié.

## 2. Partie expérimentale

Un faisceau laser Nd:YAG gaussien ( $\varnothing = 400 \mu\text{m}$ ) a été focalisé à la surface entre des plaques polies d'aluminium 5754 et de magnésium AZ31 positionnées bord à bord et une lame de quartz, pour que la moitié du faisceau soit située sur le quartz (Figure 1). La caméra HSC Phantom V9.0 a été positionnée perpendiculairement à la surface latérale de la plaque de quartz, afin d'obtenir une image non-déformée de l'interaction. La résolution d'image était de  $480 \times 480$  px, avec  $1 \text{ mm} = 66 \text{ px}$ . La fréquence d'acquisition était de  $6400 \text{ img/s}$  et le temps d'exposition de  $3 \mu\text{s}$ . Pour le traitement de données, 10 images par condition expérimentale ont été analysées.

Les paramètres du laser (Tableau 1) ont été choisis de manière à s'approcher du régime de perçage, ce qui permet de bien suivre le développement du capillaire et d'observer post-mortem la cavité laissée par le capillaire à la fin de la solidification. On a fait varier le décalage du faisceau laser par rapport au plan de joint ( $\Delta x$ ) de  $300 \mu\text{m}$  (décalage complet du faisceau sur l'alliage de Mg, échantillon A) jusqu'à  $-300 \mu\text{m}$  (décalage complet sur l'alliage d'Al, échantillon G). Afin d'observer le comportement du capillaire dans les matériaux homogènes, les joints Al-Al et Mg-Mg ont été testés dans des conditions identiques à l'échantillon D.

La lame de quartz a été retirée de la jonction soudée et des observations au microscope électronique à balayage avec sonde EDX ont été réalisées pour obtenir les dimensions finales de la cavité laissée par le capillaire et la position exacte de sa racine par rapport au plan de joint.

<i>Echantillon</i>	<i>A</i>	<i>B</i>	<i>C</i>	<i>D</i>	<i>E</i>	<i>F</i>	<i>G</i>	<i>Al-Al</i>	<i>Mg-Mg</i>
P (kW)	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5
t (ms)	6	6	6	6	6	6	6	6	6
$\Delta x$ ( $\mu\text{m}$ )	300	200	100	0	-100	-200	-300	0	0

Tableau 1 : Conditions expérimentales des essais laser

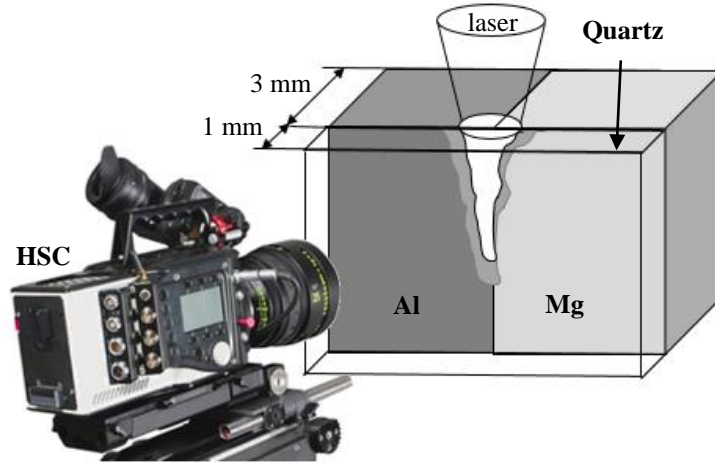


Figure 1 : Configuration expérimentale

### 3. Résultats et discussion

Les alliages de magnésium AZ 31 et d'aluminium 5754 ont des facteurs d'absorption et des températures de fusion proches, mais des températures de vaporisation et des chaleurs latentes de vaporisation très différentes (Tableau 2). Ces écarts, comme il sera démontré plus loin, entraîne l'asymétrie importante du capillaire par rapport au plan de joint. Le quartz est pratiquement transparent au rayonnement laser Nd:YAG et possède une température de fusion beaucoup plus grande que celle des deux alliages, ce qui permet de limiter sa détérioration lors des expériences de visualisation du capillaire.

Matériaux	Mg AZ 31	Al 5754	Quartz
$a_s$	0,3	0,3	<0,05 (transmission =0,95)
$T_s - T_l$ (K)	878-903	883-902	1830
$T_v$ (K)	1380	2792	2473
$L_f$ (kJ·mol <sup>-1</sup> )	8,95	10,79	14,23
$L_v$ (kJ·mol <sup>-1</sup> )	127	294	283
$\alpha$ (m <sup>2</sup> /s)	$87,9 \cdot 10^{-6}$	$98,8 \cdot 10^{-6}$	$0,83 \cdot 10^{-6}$

Tableau 2 : Propriétés physiques des matériaux

#### 3.1. Analyse post-mortem

Les paramètres du tir laser qui permettent une bonne visualisation du capillaire compte tenu de la résolution d'image actuelle sont proches du régime de perçage. La forme du capillaire n'est pas modifiée au cours de la solidification, ce qui indique que les deux alliages se sont vaporisés dans la zone d'interaction. Cependant, aucune ablation notable du quartz n'est visible. Il est donc possible de réaliser l'observation post-mortem des dimensions (et de la position de la racine) du capillaire par rapport au plan de joint ( $\Delta d$ ). La cartographie EDX (Figure 2) indique un très faible mélange entre les deux matériaux. La présence de Si révèle une fonte partielle du quartz autour du capillaire. Le Mg est souvent observé autour du capillaire du côté de l'aluminium, alors que l'inverse se produit uniquement lors d'un décalage important du faisceau sur aluminium.

Les dimensions et la position du capillaire par rapport au plan de joint varient de manière importante en fonction de la position du faisceau. La largeur moyenne et la section transversale du capillaire sont plus importantes si le faisceau laser est décalé vers le magnésium AZ31 ( $\Delta x > 0$ ), celui-ci ayant une température de vaporisation et une chaleur

latente de fusion plus faibles que celles de l'aluminium 5754 (Figure 3 a-b). La largeur moyenne du capillaire lorsque le faisceau est décalé sur aluminium ( $\Delta x < 0$ ) est proche du diamètre de la tache laser (400  $\mu\text{m}$ ), alors que du côté du magnésium (qui s'évapore plus facilement), la largeur du capillaire dépasse 600  $\mu\text{m}$ .

Pour un faisceau centré (échantillon D) la largeur moyenne du capillaire est deux fois plus importante du côté du magnésium que du côté de l'aluminium (Figure 3.a), et 80% de la section du capillaire se situe dans le magnésium (Figure 3 a-b). Cette condition donne également la pénétration maximale (Figure 3 c) : l'alignement du faisceau sur l'interface semble faciliter le processus de creusement du capillaire. Ceci est confirmé par le fait que la racine de la soudure est également centrée sur le plan de joint (Figure 3.d). L'évolution du capillaire pour cette condition est illustrée sur Figure 4.

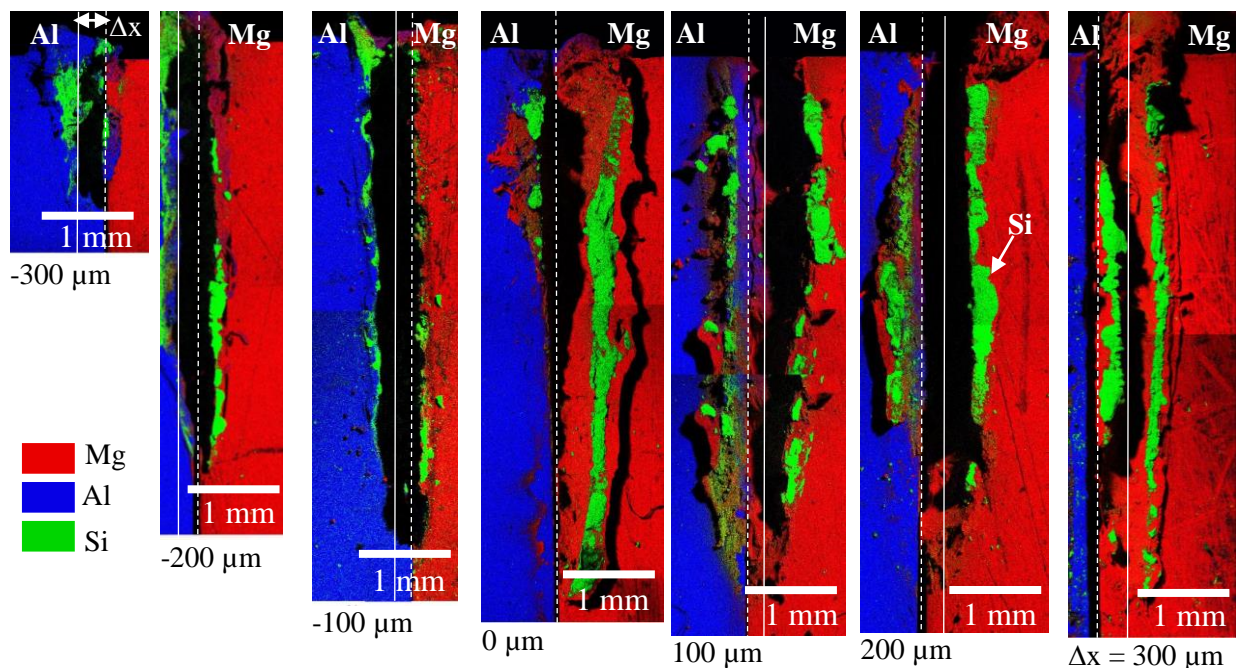


Figure 2 : Cartographie EDX des échantillons Al-Mg séparés de la lame de quartz (la ligne discontinue correspond au plan de joint et la position du centre du faisceau est matérialisée par la ligne continue).

Le décalage du laser sur le magnésium ( $\Delta x > 0$ ) ne produit que de faibles variations de la pénétration, de la largeur et de la section du capillaire par rapport à la condition du faisceau centré. La section du capillaire coté aluminium augmente légèrement avec  $\Delta x$ , et tombe à zéro quand le faisceau est positionné totalement sur le magnésium ( $\Delta x > \varnothing/2$ ). La position de la racine du capillaire est décalée vers le magnésium 100  $\mu\text{m}$  au-delà de la position du faisceau.

Le décalage du laser sur l'aluminium ( $\Delta x < 0$ ) conduit à une diminution importante de la largeur du capillaire coté magnésium. Pour  $-\varnothing/2 \leq \Delta x < 0$  la section du capillaire se situe à 65% sur l'aluminium, et elle atteint 100% quand le faisceau quitte le magnésium ( $\Delta x < -\varnothing/2$ ). La pénétration du capillaire diminue avec le décalage sur l'aluminium et diminue fortement sous  $\Delta x < -\varnothing/2$ . La position de la racine du capillaire stagne sur le plan de joint et se recentre soudainement sur le faisceau ( $\Delta d = \Delta x$ ) quand ce dernier quitte l'interface dissimilaire ( $\Delta x = -300 \mu\text{m}$ ).

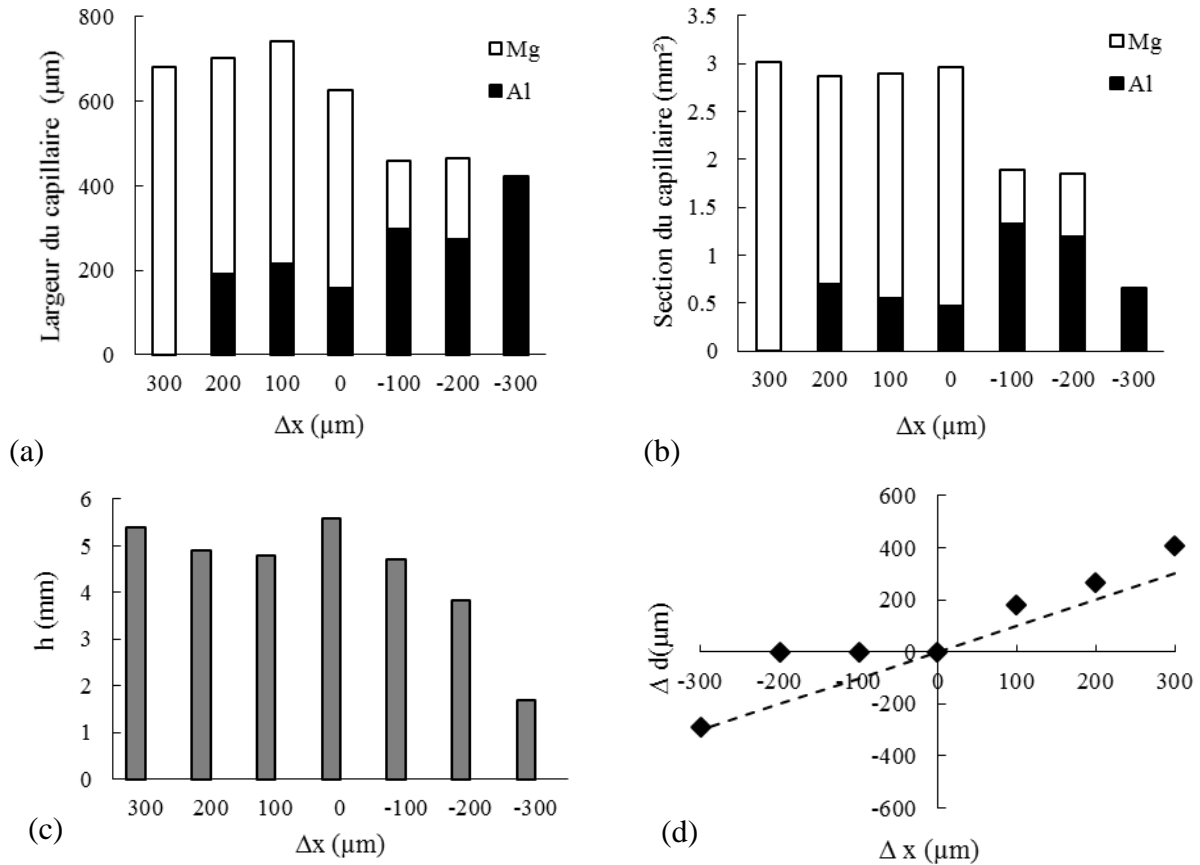


Figure 3 : Evolution de la dimension finale du capillaire (d'après les mesures de la cavité formée) en fonction du décalage du laser du plan de joint ( $\Delta x$ ) : largeur (a), section (b), pénétration (c) et la position de la racine du capillaire (d).

### 3.2. Analyse de vidéos rapides

L'analyse des vidéos rapides a permis de suivre l'évolution du capillaire et de calculer sa vitesse du perçage définie comme  $\Delta h/\Delta t$ . L'observation de l'interaction au travers de la lame de quartz permet de voir les bords du capillaire (qui sont assez nets) et la zone fondue aux bords irréguliers dus aux phénomènes thermiques à l'interface métal-quartz (Figure 4).

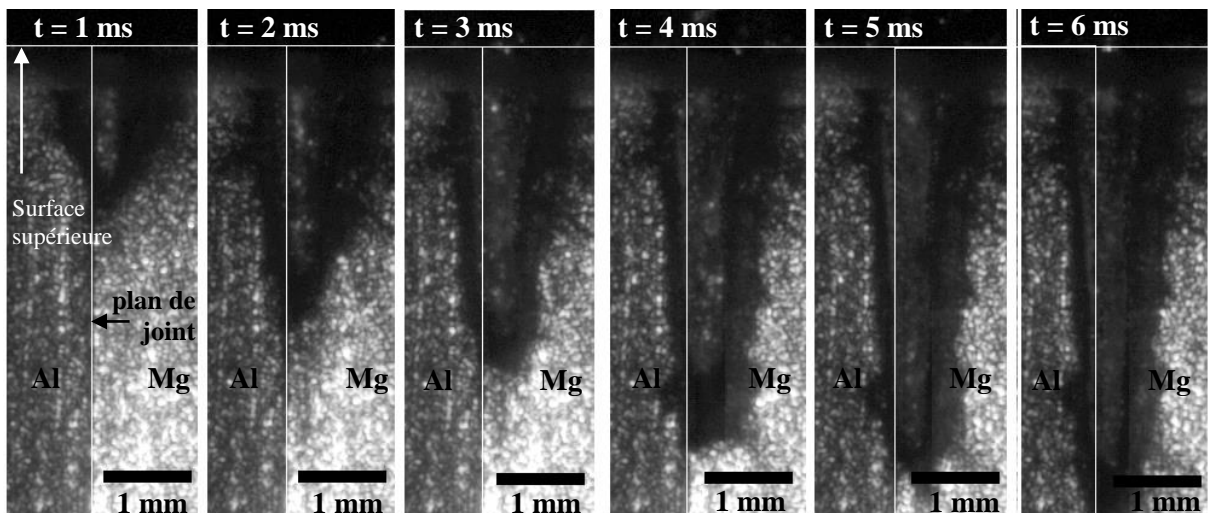


Figure 4: Evolution du capillaire pour la position centrée du faisceau (échantillon D).

Tous les comportements du capillaire dissimilaire observés (Figure 5) sont compris entre deux cas extrêmes : celui du magnésium seul et celui de l'aluminium seul. Le décalage du faisceau vers l'aluminium contraint progressivement la profondeur du capillaire quel que soit l'instant considéré, jusqu'à ce qu'on rejoigne, pour  $\Delta x = -300 \mu\text{m}$ , la condition de perçage à l'interface entre deux tôles d'aluminium (échantillon Al-Al). Le décalage du faisceau vers le magnésium donne des résultats proches pour les conditions de  $\Delta x = 100 \mu\text{m}$  et  $200 \mu\text{m}$  (zone de stagnation sur Figure 3.a-b), alors que la vitesse de perçage de la condition  $\Delta x = 300 \mu\text{m}$  s'approche de celle du faisceau centré. Ce décalage du faisceau conduit à la formation du capillaire dans le magnésium seul, plus facile à percer que la combinaison Al-Mg. La condition  $\Delta x = 0 \mu\text{m}$  s'approche de  $\Delta x = 300 \mu\text{m}$  parce que le centrage du faisceau sur le plan de joint facilite le processus de perçage. De même, en comparant la condition  $\Delta x = 300 \mu\text{m}$  avec la condition Mg-Mg et la condition  $\Delta x = -300 \mu\text{m}$  avec Al-Al, on constate que le plan de joint facilite le perçage.

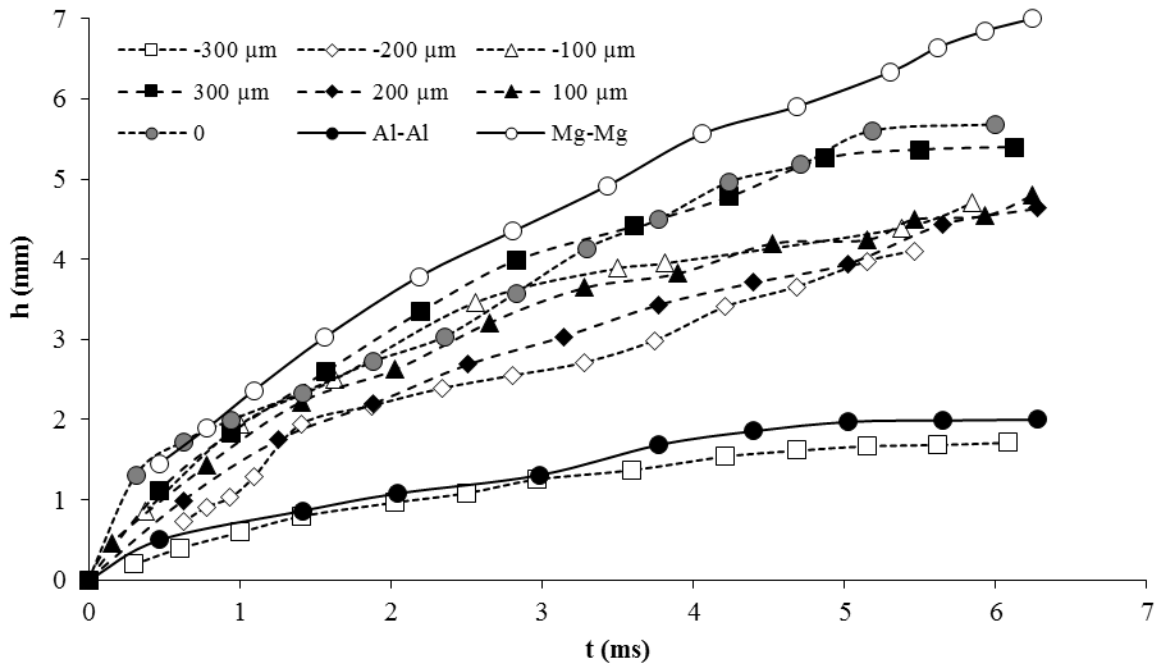


Figure 5: Evolution de la pénétration du capillaire.

Tous les échantillons (Figure 6) démontrent une évolution semblable des vitesses de perçage. Deux stades distincts du développement du capillaire sont mis en évidence : pour  $t < 2\text{ms}$ , la vitesse de perçage diminue quasi-linéairement entre 3,5 et 1 m/s, alors que pour  $t > 2\text{ms}$ , elle est globalement constante. Les fluctuations observées reflètent une certaine instabilité du processus de perçage. Les vitesses de perçage moyennes estimées pour le capillaire déjà établi ( $t > 2 \text{ ms}$ ) sont illustrées à la Figure 7. La vitesse de perçage à la condition  $\Delta x = 0 \mu\text{m}$  est très proche de celle du cas Mg-Mg mais très différente du cas Al-Al. Les deux positions extrêmes du faisceau  $\Delta x = 300 \mu\text{m}$  et  $\Delta x = -300 \mu\text{m}$  montrent des vitesses de perçage inférieures aux cas Mg-Mg et Al-Al respectivement, à cause de l'absence de plan de joint. L'augmentation relative de la vitesse de perçage due à la présence d'un plan de joint est d'environ 30% pour Al et d'environ 20% pour Mg. Les conditions  $\Delta x = 100 \mu\text{m}$  et  $\Delta x = 200 \mu\text{m}$  montrent des vitesses de perçage légèrement inférieures à celles pour  $\Delta x = 300 \mu\text{m}$  et  $\Delta x = 0 \mu\text{m}$ , puisqu'elles ne bénéficient ni du centrage du faisceau sur le plan de joint ni d'un grand décalage vers le magnésium. Les conditions  $\Delta x = 100 \mu\text{m}$  et  $\Delta x = 200 \mu\text{m}$  affichent aussi des vitesses de perçage proches, mais bien supérieures à celles de  $\Delta x = -300 \mu\text{m}$ , alors

que le capillaire inclut toujours les deux matériaux. Il apparaît donc que le magnésium augmente la vitesse de perçage.

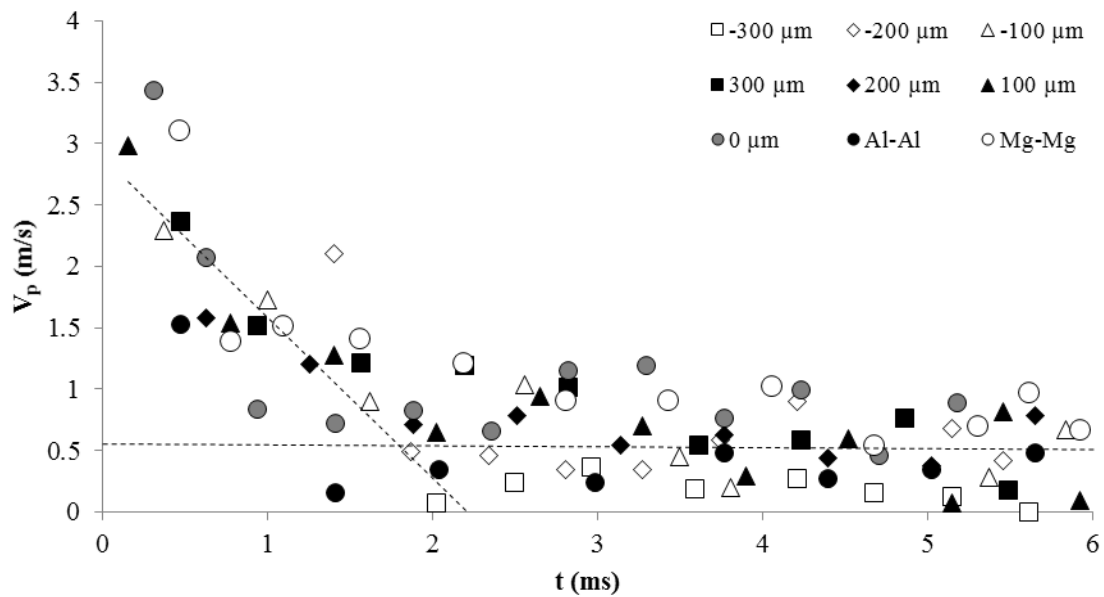


Figure 6 : Evolution de la vitesse de perçage du capillaire.

L'accentuation des paramètres de perçage (élargissement du capillaire, pénétration et vitesse de perçage) en présence de magnésium peut s'expliquer par le fait que la pression de vapeur du magnésium s'accroît beaucoup plus avec la température que la pression de vapeur d'aluminium, ce qui signifie que la pression de recul est plus importante dans un capillaire percé dans du magnésium (Kaidalov [10]).

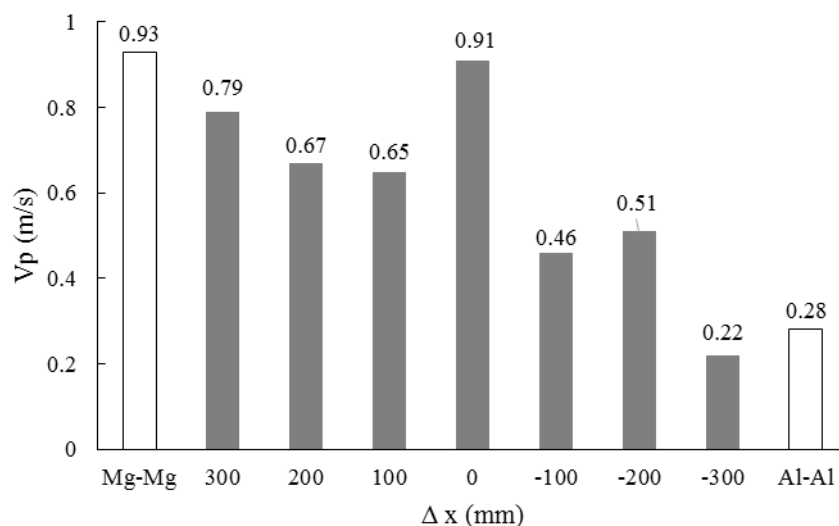


Figure 7 : Vitesses moyennes de perçage du capillaire.

#### 4. Conclusion

Dans la présente étude, l'asymétrie du capillaire laser induite par la différence des températures de vaporisation et des chaleurs latentes de vaporisation des deux alliages ayant une absorptivité proche a été démontrée. Lorsque le laser est centré sur l'interface dissimilaire, 85% de la section du capillaire se situe dans l'alliage de magnésium qui a une

température de vaporisation et une énergie latente de vaporisation plus faibles que celles de l'aluminium. Le décalage du laser coté magnésium modifie peu la forme du capillaire et la profondeur de pénétration. Le décalage vers l'aluminium conduit quant à lui à une réduction importante de la profondeur de pénétration et au rétrécissement du capillaire. L'analyse des vidéos rapides a permis de suivre la progression du capillaire et d'estimer la vitesse de perçage, qui s'avère maximale (0,91 m/s) pour les conditions qui favorisent la formation du capillaire dans le magnésium.

La méthode proposée est limitée par la stabilité thermique du quartz, mais l'utilisation d'autres céramiques transparentes au rayonnement laser pourrait rendre possible l'observation de couples de métaux ayant des températures de fusion et vaporisation plus importantes. Cette étude ouvre la voie à l'observation dans la profondeur de capillaires plus petits, proches de conditions de soudage des assemblages dissimilaires, alors que la phase liquide devient dominante dans la zone d'interaction.

## Références

- [1] M.J. Torkamany, F. Malek Ghaini, R. Poursalehi, An insight to the mechanism of weld penetration in dissimilar pulsed laser welding of niobium and Ti-6Al-4V, *Opt. & Las. Technol.*, 79 (2016) 100-107.
- [2] M. Schneider. Perçage profond par laser : Analyse des processus physiques, Thèse Université Pierre et Marie Curie - Paris VI, 2006.
- [3] Y. Arata, N. Abe, T. Oda, Dynamic behavior of laser welding and cutting, *Proceeding of the Seventh International Conference on Electron and Ion Beam Science and Technology*, 1976. p. 111-28.
- [4] S. Fujinaga, H. Takenaka, T. Narikiyo, S. Katayama, A. Matsunawa. Direct observation of keyhole behavior during pulse modulated high-power Nd:YAG laser irradiation. *J. Phys. D*, 33 (2000) 492-497.
- [5] A. Matsunawa, N. Seto, J. D. Kim, M. Mizutani, S. Katayama, Observation of Keyhole and Molten Pool Behaviour in High Power Laser, *Trans. of JWRI*, 30-1 (2001), 13-27.
- [6] R. Fabbro, Developments in Nd-YAG laser welding, in *Handbook of laser welding technologies* (Editor S. Katayama), Woodhead Publishing Limited (2013) Oxford, 47-72
- [7] Eriksson I., Powell J., Kaplan A.F.H., Melt behavior on the keyhole front during high speed laser welding, *Opt Las Engineer*, 51 (2003) 735-740.
- [8] M. Mostafa, J.-M. Jouvard, S. Matteï, H. Andrzejewski, Etude des transferts d'énergie en soudage profond par laser en régime impulsif, SFT 2010, 24-28 mai 2010 – Le Touquet.
- [9] M. Mostafa, Etude du perçage et du soudage laser : dynamique du capillaire, Thèse Université de Bourgogne, 2011.
- [10] A.A. Kaidalov, *Electron beam welding and annexed technologies* (in Russian), Kyiv, Technologia (2004).

## Remerciements

Les auteurs remercient le Gouvernement d'Egypte pour avoir financé le stage postdoctoral de M. Mostafa.

Les auteurs souhaitent exprimer leur gratitude au maître de conférences Alexandre Mathieu (Laboratoire ICB, Université Bourgogne-Franche Comté) pour son aide dans la réalisation du HSI.