

# Etude des transferts d'énergie en soudage profond par laser en régime impulsif

Massaud MOSTAFA, Jean-Marie JOUVARD, Simone MATTEI\*, Henri ANDRZEJEWSKI

Laboratoire Interdisciplinaire Carnot de Bourgogne, UMR 5209 CNRS / Université de Bourgogne  
IUT - 12, rue de la Fonderie – 71200 Le Creusot

\*(auteur correspondant : simone.mattei@u-bourgogne.fr.)

**Résumé** - Le soudage profond par laser est caractérisé par la formation dans le bain de métal liquide d'un capillaire de vapeur dans lequel l'énergie est guidée en profondeur par réflexions multiples. Une visualisation à l'aide d'une caméra rapide de l'évolution de la forme du capillaire réalisé par un impact laser Nd :YAG dans une lame de Zinc, nous a permis d'étudier le dépôt d'énergie à l'intérieur de ce capillaire, puis de prédire l'évolution de celui-ci. Les calculs réalisés donnent un bon accord modèle-mesures.

## Nomenclature

$r_l$	rayon de la tache de focalisation laser, $m$	$v_v$	vitesse de vaporisation, $m.s^{-1}$
$x$	coordonnée radiale, $m$	$v_m$	vitesse d'éjection latérale, $m.s^{-1}$
$z$	profondeur, $m$	$p_r$	pression de recul, $Pa$
$P$	puissance du faisceau laser, $W$	$T_s$	température de surface, $K$
$\rho$	masse volumique, $kg.m^{-3}$	$P_s$	pression de vapeur saturante, $Pa$
$a$	diffusivité, $m^2.s^{-1}$		
$v_d$	vitesse de perçage, $m.s^{-1}$		

## 1. Introduction

Lors du soudage profond par faisceau laser on constate la présence, au cœur de la zone de métal fondu, d'une cavité remplie de vapeur métallique surchauffée appelée capillaire. Cette vapeur métallique est éjectée du capillaire sous la forme d'un jet appelé plume. L'éjection de cette matière exerce une surpression sur la couche de métal fondu conduisant à la formation du capillaire. Le capillaire a comme effet de piéger l'énergie du faisceau et permettre un guidage de cette énergie en profondeur par un processus de réflexions multiples. Le faible diamètre de ce capillaire ( $450 \mu m$ ), la présence de la plume et l'importance du rayonnement thermique font que ce capillaire est difficilement observable. Les seules méthodes d'observations sont la radiographie X [1-3], l'utilisation de matériaux transparents [4] ou la visualisation du capillaire en accolant une lame métallique et une lame transparente [5]. Cependant lorsque l'on veut modéliser la dynamique du soudage, une des principales difficultés provient de la méconnaissance de la répartition de l'énergie à l'intérieur du capillaire. C'est pourquoi une méthode possible de détermination de cette répartition est de simuler, à partir d'une géométrie de capillaire donnée, le dépôt d'énergie par réflexions de Fresnel [2,5-8] sur la surface interne de ce capillaire.

## 2. Observation expérimentale du capillaire

Afin d'observer le profil du capillaire, nous avons choisi d'étudier l'effet d'un impact laser sur du zinc pur (sans déplacement). L'intérêt de ce matériau est qu'il a un faible point de fusion ( $419 \text{ }^\circ C$ ) et que ses propriétés thermophysiques sont bien connues. Une lame de zinc de dimensions  $100 \times 50 \times 1,5$  millimètres est accolée à une lame de quartz, le tout pris en

sandwich à l'intérieur d'une fenêtre d'acier (figure 1). Un faisceau laser Nd:YAG (TruDisk 6002) est utilisé en mode impulsif pour former une tache circulaire de diamètre 450  $\mu\text{m}$ . Le profil du capillaire est obtenu pour une durée d'impulsion de 10 ms et une puissance de 3 kW. Le faisceau laser arrive perpendiculairement à la ligne de contact entre les lames de Zinc et de Quartz. Grâce à une caméra rapide PHANTOM v4.0, utilisée à une cadence de 3500 images/s, placée perpendiculairement à la lame de quartz, on observe la formation et l'évolution du capillaire. On peut obtenir ainsi 35 images par impact. Les expériences sont faites dans les conditions normales de laboratoire, sans protection gazeuse.

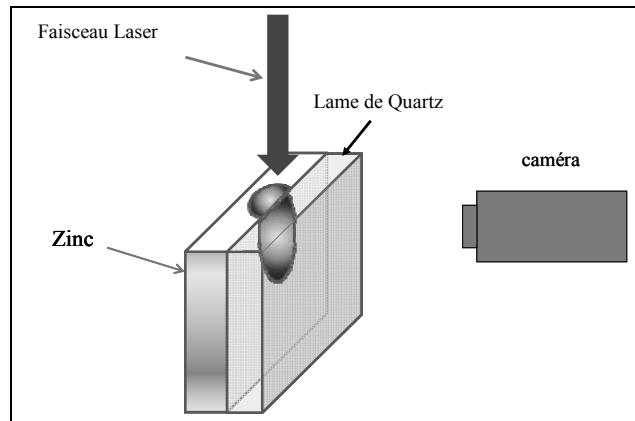


Figure 1 : Dispositif expérimental

Après traitement des images, nous pouvons en déduire l'évolution de la profondeur du capillaire. Par la suite nous approximerons ce capillaire par un paraboloidé de révolution. Le choix de cette forme géométrique simple est justifié par le fait qu'elle ne nécessite que deux paramètres pour être définie : diamètre supérieur et profondeur. L'erreur liée à ce choix est inférieure à l'incertitude de détermination de la géométrie exacte du contour du capillaire. La modification de la forme du capillaire due à la présence de la lame de quartz n'est à ce jour pas quantifiée et constitue un des travaux futur.

La figure 2 présente différentes observations et les profondeurs du capillaire durant un impact de 3 kW et pour une durée totale de 10 ms.

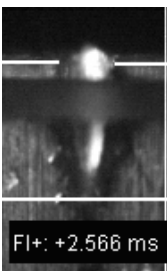

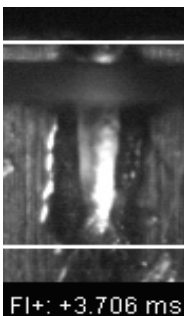
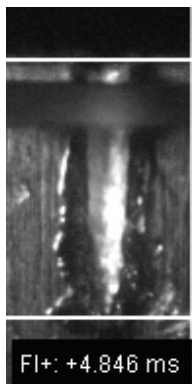
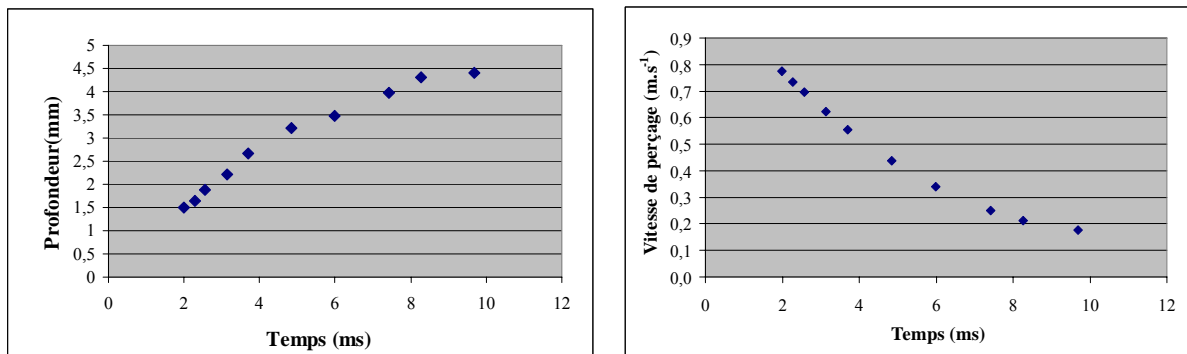
 Fl+: +2.566 ms	 Fl+: +3.136 ms	 Fl+: +3.706 ms	 Fl+: +4.846 ms
Profondeur : 1,88 mm	2,22 mm	2,67 mm	3,22 mm

Figure 2 : Profils du capillaire observé en différents instants ( $P= 3 \text{ kW}$ , durée totale d'impulsion 10 ms) et profondeur du capillaire.

Les figures 3a) et 3b) représentent respectivement les évolutions de la profondeur de pénétration et de la vitesse de perçage en fonction du temps pour ces mêmes paramètres opératoires.



Figures 3 : a) Évolution de la profondeur du capillaire en fonction du temps ( $P= 3 \text{ kW}$ , durée totale d'impulsion 10 ms)- b) évolution de la vitesse de perçage pour ces mêmes paramètres.

### 3. Modélisation du dépôt d'énergie

A partir du profil de capillaire déterminé expérimentalement, nous pouvons déterminer le profil de dépôt d'énergie à la surface de celui-ci. Puis, à partir du modèle analytique de Semak [10], nous déterminons la vitesse de perçage en différents points de la surface du capillaire, afin de prédire l'évolution de la géométrie du capillaire à un instant ultérieur.

#### 3.1. Détermination de la puissance surfacique par la méthode du lancer de rayon

Le dépôt d'énergie à l'intérieur du capillaire se fait par réflexion multiple des rayons à l'intérieur de celui-ci. Afin de déterminer la distribution d'énergie à l'intérieur du capillaire, nous avons utilisé la méthode de lancer de rayons [2,8].

Au point de focalisation le faisceau laser a une répartition spatiale d'énergie gaussienne indépendante de la profondeur  $z$  (la zone de Rayleigh est supérieure à la profondeur du capillaire). La méthode consiste à discrétiser le faisceau en rayons auxquels on associe une puissance proportionnelle à la densité de puissance du faisceau laser et à l'intervalle entre deux rayons. De même, on divise la surface du capillaire en segments. Pour chaque rayon, nous calculons le trajet résultant des réflexions multiples dans le capillaire (Figure 4). A chaque réflexion de ce rayon, nous calculons l'angle d'incidence, la nouvelle direction du rayon, les portions d'énergie absorbée et réfléchi. Le coefficient d'absorption est calculé en fonction de l'angle d'incidence (nous ne prenons pas en compte la polarisation) en utilisant les relations de Fresnel [9]. Nous reproduisons ce cycle jusqu'à la sortie du rayon hors du capillaire ou une puissance négligeable.

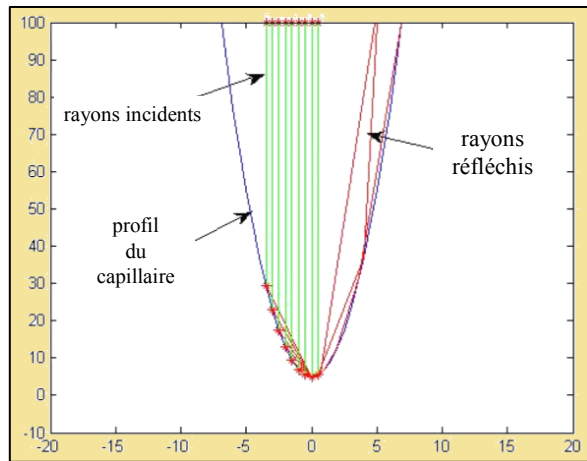


Figure 4 : Illustration de la méthode de lancer de rayons

Après une succession de calculs des trajectoires pour les différents rayons, nous pouvons obtenir pour chaque segment la puissance surfacique incidente, la proportion d'énergie absorbée, l'absorption moyenne totale (rendement d'interaction). La figure 5 représente un exemple de la répartition de la puissance surfacique calculée à partir de la méthode du lancer de rayon pour un instant donné au cours de l'impact.

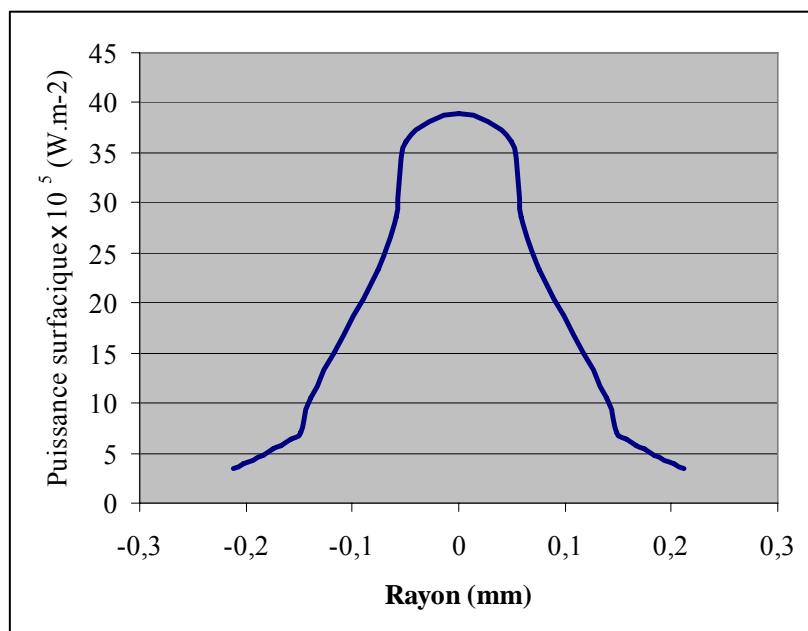


Figure 5 : Exemple de répartition de la puissance surfacique injectée sur les parois du capillaire ( $P = 3 \text{ kW}$ ,  $t = 3,13 \text{ ms}$ )

### 3.2. Modèle analytique de perçage

L'étape suivante est de déterminer la vitesse de perçage du capillaire à un instant donné. Pour cela nous utilisons le modèle analytique 2D axisymétrique de perçage de Semak [10]. Ce modèle est fondé sur une analyse globale du phénomène de perçage. Le principe est de considérer que lors de l'interaction, le processus de perçage résulte de deux effets : la vaporisation en surface du métal fondu et l'éjection latérale du métal fondu sous l'action de la pression de recul due à la vaporisation. On définit ainsi la vitesse  $v_d$  du front de fusion

(équation 1), la vitesse du front d'évaporation,  $v_v$  (équation 2) et la vitesse  $v_m$  d'éjection latérale du métal liquide sous l'action de la pression de recul (équation 3).

Dans ce modèle la vitesse du front de fusion est donnée par l'équation :

$$v_d = \frac{1}{2} \left\{ \frac{\rho_m}{\rho_s} v_v + \left[ \left( \frac{\rho_m}{\rho_s} v_v \right)^2 + 4 \frac{\rho_m}{\rho_s} \frac{a_m}{r_l} v_m \right]^{1/2} \right\} \quad (1)$$

Où  $\rho_s$  et  $\rho_m$  sont les masses volumiques des phases solides et liquides,  $a_m$  est la diffusivité thermique du métal liquide,  $r_l$  le rayon du faisceau laser.

La vitesse du front de vaporisation est estimée à partir de la température de surface  $T_s$  [11, 12] :

$$v_v = V_0 \exp\left(\frac{-U}{T_s}\right) \quad (2)$$

Où  $U = M_a L_v / R$ , avec  $M_a$  la masse atomique,  $L_v$  la chaleur latente de vaporisation,  $R$  la constante des gaz parfaits et  $V_0$  la vitesse du son dans la phase condensée.

La vitesse d'éjection latérale du métal liquide sous l'action de la pression de recul est obtenue à l'aide de l'équation de Bernoulli :

$$v_m = \sqrt{\frac{2p_r}{\rho_m}} \quad (3)$$

D'après l'expression d'Anisimov et Khoklov [11], la pression de recul peut s'écrire :

$$p_r = AP_s(T_s) = AB_0 T^{-1/2} \exp\left(\frac{-U}{T_s}\right) \quad (4)$$

où,  $A$  et  $B_0$  sont des constantes dépendant du matériau [12].

A partir de la puissance surfacique calculée par la méthode du lancer de rayon, on peut donc calculer la puissance moyenne en fond de capillaire et en déduire en chaque instant, à partir du modèle analytique de Semak décrit précédemment, la température de surface et la vitesse d'avancée de front de fusion (vitesse de perçage). La vitesse calculée à partir de ce modèle est comparée aux valeurs expérimentales de la figure 3b) (tableau 1).

Temps (ms)	2,57	3,14	3,71	4,85
Vitesse de perçage mesurée (m.s <sup>-1</sup> )	0,70	0,62	0,56	0,44
Vitesse de perçage calculée (m.s <sup>-1</sup> )	0,65	0,53	0,57	0,45
Écart relatif (%)	-6	-15	3	3

Tableau 1 : Comparaison des vitesses de perçage mesurées et calculées,  $P= 3$  kW.

L'accord mesures/modèle est satisfaisant.

## 4. Conclusion

Dans cet article nous avons présenté une étude expérimentale et théorique de l'évolution de la profondeur d'un capillaire réalisé par un impact laser Nd :YAG dans une lame de Zinc. Une visualisation a été réalisée grâce à l'utilisation d'une caméra rapide, permettant d'observer l'évolution de la forme du capillaire en différents instants de l'impact. A partir d'une forme initiale de ce capillaire, la méthode de lancer de rayon est appliquée afin de déterminer l'énergie absorbée en chaque point de la surface du capillaire. En utilisant des relations issues du travail de Semak [10], nous avons pu calculer la vitesse d'avancée du front de vaporisation (vitesse de perçage) en chaque instant.

Ce travail constitue une première étape dans la modélisation de la dynamique de formation du capillaire. Une fois connue la répartition surfacique de puissance sur les parois du capillaire, le logiciel COMSOL permettra de modéliser simultanément la diffusion thermique, le mouvement du métal liquide et la déformation de la surface. C'est pourquoi nous travaillons actuellement à une simulation numérique auto consistante, dans laquelle la détermination de la pression de recul et des différentes vitesses peut être intégrée.

## Références

- [1] Y. Arata, Plasma, Electron and Laser Beam Technology (American Society for Metals, Metals Park, OH, (1986)
- [2] Jouvard JM, Girard K, Perret O, Keyhole formation and power deposition in Nd:YAG laser spot welding. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, vol. 34 Issue: 18 (2001) 2894-2901
- [3] A. Kaplan, A model of deep penetration laser welding based on calculation of the keyhole profile *J. Phys. D –Appl. Phys.*, vol. 27 (1994) 1805-1814
- [4] X. Jin, L. Li, An experimental study on the keyhole shapes in laser deep penetration welding, *Optics and Lasers in Engineering*, vol.41 (2004) 779–790
- [5] X. Jin, L. Li and Y. Zhang, A study on fresnel absorption and reflections in the keyhole in deep penetration laser welding *J.Phys.D: Appl. Phys*, vol. 35 (2002) 2304-2310
- [6] Ki H, Mohanty P S, Mazumder, Multiple reflection and its influence on keyhole evolution, 20th ICALEO 2001, vol. 92 & 93, *CONGRESS PROCEEDINGS*, 933-942
- [7] Milewski, J., and Sklar, E. 1995. Modeling and validation of multiple internal reflections using ultra-narrow gap laser welding. *Proceedings of ICALEO '95*, (San Diego, Calif., LIA, Orlando, 1995), 151–156
- [8] Pierron N., Sallamand P., Jouvard J.M., Cicală E., Mattei S., Determination of an empirical law of aluminium and magnesium alloys absorption coefficient during Nd : YAG laser interaction *J. Phys. D: Appl. Phys.*, vol. 40, (2007) 2096-2101
- [9] MODEST (M.F) – *Radiative Heat Transfer*, 832 p. McGraw-Hill International Editions 2 Penn Plaza New York (1993) 10121-2298
- [10] Semak V. and Matsunawa A., The role of recoil pressure in energy balance during laser materials processing *J. Phys. D: Appl. Phys.*, vol. 30 (1997) 2541-2552
- [11] Anisimov S.I, Khokhlov V., *Instabilities in Laser–Matter Interaction* (Boca Raton, FL: CRC) (1996)
- [12] Frenkel J., *Kinetic Theory of Liquids* (New York:Dover) (1955)