

## CONTRIBUTION À L'ÉTUDE DU SOUDAGE PROFOND PAR LASER À GRANDE VITESSE : PHÉNOMÈNE DE HUMPING

El-Hachemi AMARA

*Centre de Développement des Technologies Avancées, Division Milieux Ionisés & Lasers,  
Équipe Traitement des Matériaux par Laser, B.P. 17, Baba-Hassen, 16303 Alger*

E-mail : [amara@cda.dz](mailto:amara@cda.dz)

**RÉSUMÉ :** On développe une modélisation tridimensionnelle basée sur une résolution numérique des équations d'écoulement de fluide, et de transfert de chaleur, pour l'étude du soudage laser par pénétration profonde à grande vitesse induisant le phénomène dit 'humping'. Les mécanismes physiques inclus dans notre modèle concernent la fusion de la matière, la pression de recul induite par vaporisation, et la re-solidification. La mise en œuvre de procédures de calcul appelées UDF (User Defined Functions), fonctionnant interactivement avec le code de dynamique des fluides (CFD) Fluent, et d'une approche par maillage dynamique, a permis de traiter le problème avec des conditions aux limites spécifiques et complexes, et aussi de prendre en compte la pression de recul et la dépendance en fonction de la température des propriétés physiques. Comme résultat, on observe l'apparition de bosses (humps) régulières après la re-solidification du joint de soudure.

**MOTS-CLÉS :** soudage laser, joint de soudure, humping, modélisation

### 1. Introduction

Le soudage par laser menant à la formation d'une cavité 'keyhole' constitue ce que l'on appelle le soudage laser par pénétration profonde. C'est un procédé efficace qui permet d'obtenir des cordons de soudure profonds et de très faibles zones affectées thermiquement à des vitesses de déplacement assez élevées. L'intérêt économique primant, l'utilisation de machines automatisées a acquis un intérêt croissant dû à l'efficacité, la répétabilité et le taux de production élevé comparé au soudage manuel effectué par des opérateurs. Les observations expérimentales [1-2] ont démontré qu'à des vitesses de soudage par laser se situant entre 12 et 19 m/min, un keyhole rallongé est obtenu et la surface du bain fondu se caractérise par de légères fluctuations. Cependant, au-delà de 20 m/min, le régime dit 'humping' est atteint, et l'on observe alors la formation de protubérances sous forme de bosses régulières. Celles-ci se caractérisent par de larges enflures de forme quasi ellipsoïdales, séparées de petites vallées. Cette instabilité de type Rayleigh-Taylor constitue un inconvénient majeur pour aller vers le soudage laser profond à grande vitesse, et plusieurs théories ont été proposées pour expliquer le phénomène de humping, pour lequel des données expérimentales ont été compilées pour vérifier ces théories [3] développées pour différents procédés de soudage (TIG, laser,...).

De ce fait, un effort pour la compréhension du phénomène est nécessaire afin de trouver les moyens d'améliorer la qualité du joint soudure, tout en allant plus vite. Notre contribution à cet effort est une approche basée sur une résolution numérique des équations d'écoulement de fluide et de transfert de chaleur. Nous nous sommes intéressés au soudage profond par laser, dans ses différents aspects, par différentes approches, augmentant régulièrement la difficulté en passant des études bidimensionnelles [4-9] aux études tridimensionnelles [10,11]. Aussi, la complexité du problème est due au fait que plusieurs mécanismes physiques doivent être pris en compte, tels que la fusion du matériau, sa vaporisation, l'interaction entre phases, et la re-solidification [11]. Dans le présent travail, où une simulation 3D transitoire est développée, on

utilise des paramètres expérimentaux [2] du faisceau laser, et les propriétés thermophysiques dépendants de la température dans le cas du Fer. On prend en compte, dans notre modélisation, l'effet de la pression de recul (initiation d'un mouvement latérale du liquide allant du front vers l'arrière du keyhole), et l'effet de la fusion-resolidification du matériau (à  $t=0$  la surface de l'échantillon est plate et est à  $T=300$  K sur tout le domaine). L'effet du creusement de la surface est introduit en calculant une vitesse de perçage provoquant, au-delà du seuil d'absorption permettant d'atteindre la vaporisation, l'enfoncement de la surface sous l'effet du faisceau laser. La variation de la tension de surface, due à la variation de la température, joue également un rôle important dans l'écoulement du bain fondu, et est prise en compte dans cette modélisation. La technique de maillage dynamique mise en œuvre par le logiciel de dynamique des fluides Fluent-CFD et les procédures spécifiques de calcul (UDF) développées, permettent d'obtenir la forme 3D du keyhole. Le logiciel Fluent est constitué essentiellement du pré-processeur Gambit utilisé pour élaborer la géométrie du problème, et la génération du maillage, et du solveur Fluent qui permet de résoudre les équations du problème en tenant compte de la personnalisation à travers les UDF. La prise en compte de la re-solidification qui est calculée par une méthode enthalpique est essentielle, car c'est grâce à ce mécanisme que la visualisation des bosses (humps) peut être obtenue.

## 2. Modélisation

### 2.1. Déformation de la surface et mouvement du bain fondu

La formation du keyhole et le mouvement induit du métal en fusion en présence de la phase solide, sont traités en considérant l'énergie laser absorbée, la fusion, la vaporisation, et la re-solidification. Ces mécanismes sont introduit en tenant compte du fait qu'à l'instant initial la surface de l'échantillon est plate, et sa température égale à 300K. On simule la déformation de surface sous l'effet du faisceau laser en considérant la vitesse de perçage locale décrite par Semak *et al.* [12], obtenue quand l'énergie laser absorbée est au-delà du seuil de vaporisation du matériau traité. Le déplacement de surface produit est donné en fonction de la vitesse de perçage par:

$$\Delta d = v_d \Delta t \quad (1)$$

Où

$$v_d = K I_{abs} \cos(\alpha) \quad (2)$$

$\Delta t$  est le pas de temps de la simulation,  $K$  un facteur de proportionnalité,  $I_{abs}$  l'intensité laser absorbée, et  $\alpha$  l'angle local d'incidence du faisceau laser sur la surface de l'échantillon. L'intensité absorbée est calculée en fonction de  $\alpha$  et du coefficient d'absorption du matériau pour la longueur d'onde laser utilisée.

Fabbro *et al.* [13] ont proposé une approche en 2-D pour le calcul de profils du keyhole. On applique cette approche en 3-D pour le calcul de la déformation de la surface due à l'absorption de l'énergie laser.

On procède premièrement en calculant l'angle d'incidence local  $\alpha$  du faisceau laser sur les parois du keyhole. Ces parois en 3-D constituent une enveloppe, et pour le calcul de  $\alpha$  la connaissance du vecteur normale à chaque élément de surface de l'enveloppe est nécessaire. Le module de ce vecteur ainsi que ses composantes sont des données accessibles fournies par le solveur Fluent. On représente sur la figure (1), le vecteur normal  $\vec{A}_N$  à l'élément de surface sur la paroi du keyhole,  $A_x$ ,  $A_y$  et  $A_z$  sont les composantes du vecteur.

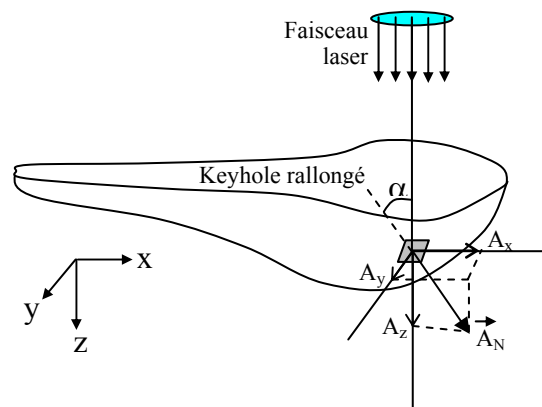


Figure 1: Représentation 3-D du keyhole, et de l'élément de surface

On peut connaître à chaque instant  $t$ , à partir du maillage courant, l'angle  $\alpha$  tel que :

$$\cos(\alpha) = \frac{A_z}{|\vec{A}_N|} \quad (3)$$

et on peut alors calculer l'intensité laser absorbée localement à partir de (pour un faisceau gaussien) :

$$I_{abs} = A (2P/\pi r_l^2) \cos^{1.2}(\alpha) \exp(-2r^2/r_l^2) \quad (4)$$

Où  $A$  est le coefficient d'absorption,  $P$  la puissance du faisceau laser, et  $r_l$  le rayon de la tâche focale du faisceau. Dans notre cas, comme montré sur la figure (2), c'est le faisceau laser qui se déplace au-dessus de l'échantillon, et  $r$  est donné par :

$$r = \sqrt{(l-x)^2 + (y-y_0)^2} \quad (5)$$

avec  $l = x_0 + v_w t$ , où  $(x_0, y_0)$  est la position initiale du faisceau sur la surface de l'échantillon, et  $v_w$  la vitesse de déplacement du faisceau laser. Quand  $r \leq r_l$ ,  $I_{abs}$  est calculé à partir de l'équation (4), sinon si  $r > r_l$ , alors  $I_{abs}$  est nulle. Ainsi, connaissant l'intensité absorbée localement, à chaque élément de surface, on déduit la vitesse de perçage  $v_d$  qui est utilisée pour calculer le déplacement de l'élément de surface à chaque instant  $t$ , et on obtient ainsi la déformation en géométrie 3-D de l'enveloppe.

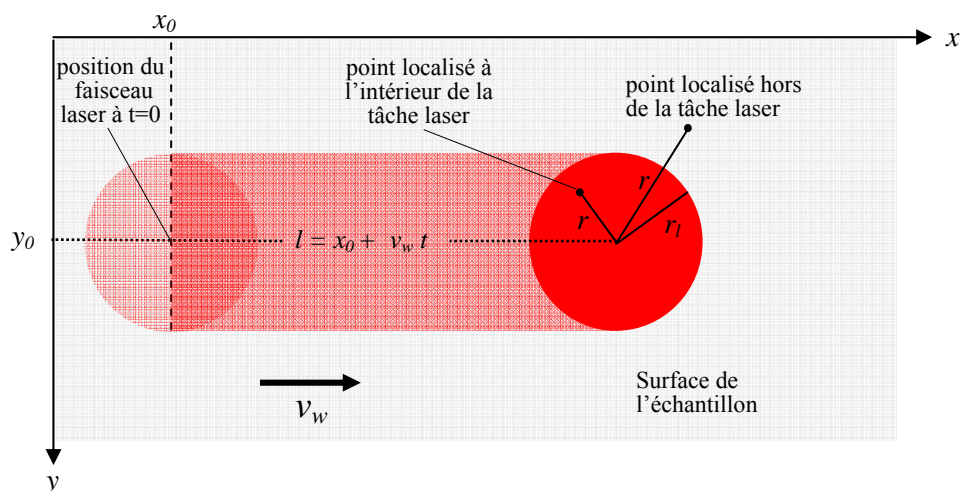


Figure 2: Déplacement du faisceau laser sur la surface de la cible

La fusion du matériau et sa re-solidification sont calculés par une méthode enthalpique, où la re-solidification permet de montrer la formation de bosses. La variation de la tension de

surface dûe à la différence de température produit une contrainte sur la paroi qui est prise en compte dans notre modèle. Cette contrainte dite de Marangoni, est donnée par  $\tau = (d\sigma/dT)\nabla_s T$ , où  $d\sigma/dT$  est le gradient de tension de surface et  $\nabla_s T$  est le gradient de surface. Dans le cas du Fer, on prend  $d\sigma/dT = -10^4$  N/m/K [14]. On a remarqué que l'inclusion des effets de tension de surface à travers ce gradient, est d'une très grande importance pour l'observation des bosses.

## 2.2. Dépendance des propriétés physiques en fonction de la température

Les propriétés physiques du matériau telles que la densité, la capacité calorifique, et la conductivité thermique sont considérées comme variant avec la température. Leurs expressions sont déduites à partir des données reportées par Duley [15] concernant le Fer, comme montré sur le tableau (1).

**Tableau 1**

T (K)	K (W/m/K)	C <sub>p</sub> (J/kg/K)	κ (m <sup>2</sup> /s)
273	83.5	420	2.8 10 <sup>-5</sup>
500	61.5	540	1.54 10 <sup>-5</sup>
1000	32.5	980	-
2000	42.5	-	-

où  $\kappa$  est la diffusivité thermique du matériau, elle est relié à la densité  $\rho$ , la conductivité thermique  $k$ , et la capacité calorifique  $C_p$ , à travers la relation:

$$k = \kappa/\rho C_p \quad (6)$$

Une expression dépendant de la température est déduite pour ces quantités telle que:

$$\rho(T) = -0.4522T + 7755.7 \text{ in } [kg/m^3] \quad (7)$$

$$k(T) = -0.0218 T + 76.307 \text{ in } [W/m/K] \quad (8)$$

Pour prendre en compte les effets de la chaleur latente sur la distribution de température, on applique l'accroissement de la capacité calorifique donné par Toyerskani *et al.* [16] tel que:

$$C_p^*(T) = \frac{1}{T_m - T_a} \left[ L_f + \int_{T_a}^{T_m} C_p dT \right] \quad (9)$$

O  $L_f$  est la chaleur latente de fusion du matériau (2.76 10<sup>5</sup> J/kg pour le Fer), et  $C_p^*$  la capacité calorifique modifiée. En développant l'expression (9), on obtient une approximation de la capacité calorifique  $C_p^*$  [J/kg/K] en fonction de la température telle que:

$$C_p^*(T) = 2.6137 \cdot 10^{-4} T^2 + 0.12034621 T + 124 \quad (10)$$

### 3. Résultats

Nous avons utilisé dans le présent travail des conditions opératoires liés au faisceau laser donnés dans la référence [2]. La puissance du laser est de 4kW, le diamètre du faisceau est de 600 $\mu$ m, et la longueur d'onde est 1.06  $\mu$ m (laser Nd\_YAG). Pour un échantillon de Fer, soumis à un faisceau laser Nd\_YAG continu, le coefficient d'absorption A donné dans l'équation (4) est égal à 0.3, et le coefficient de proportionnalité K de l'équation (2) est pris égal à  $3 \cdot 10^{-11}$  (m/s) / (W/m<sup>2</sup>) [17,18]. On considère une vitesse de déplacement du faisceau laser égale à 0.8 m/s (~50 m/min) sur un échantillon parallélépipédique en Fer de dimensions: 15 mm x 2 mm x 1 mm. Un maillage structuré 3-D constitué de cellules triangulaires sur les parois et tétraédriques dans le volume est utilisé pour la discrétisation par volumes finis. La géométrie de l'échantillon, le maillage du domaine et la réservation de conditions aux limites sont réalisés par le pré-processeur GAMBIT du logiciel FLUENT. Le solveur FLUENT est utilisé pour résoudre les équations de Navier-Stokes correspondantes par discrétisation par volumes finis en tenant compte de la spécificité du problème. Ainsi, les conditions aux limites et les propriétés physiques du matériau, dépendantes de température, sont introduites dans le processus de calcul au moyen d'UDF écrites en langage C++. Ces UDF sont utilisées pour personnaliser FLUENT et l'adapter aux besoins particuliers requis par la modélisation.

Dans cette modélisation, des UDF ont été développées pour introduire des conditions opératoires liées au faisceau laser, à l'environnement, aux mécanismes physiques impliqués tels que l'absorption de l'énergie laser et la génération de la pression de recul, ainsi que des conditions aux limites spécifiques.

L'étude réalisée est relativement complexe puisque pour mettre en évidence le phénomène de humping, une approche 3-D est nécessaire. Et aussi, pour prendre en compte la formation de la cavité 'keyhole', on doit démarrer le calcul à partir des premiers instants de l'interaction lorsque le faisceau laser frappe la surface du matériau. L'énergie laser déposée sur la surface, conduit à un processus de déformation dû à la vaporisation de la matière, pendant que le faisceau laser se déplace sur la surface à la vitesse de soudage  $v_w$ . La méthode de maillage dynamique consistant en le remaillage du domaine après chaque pas de temps, est utilisée pour tenir compte de la déformation de la surface. Nous avons utilisé précédemment cette méthode pour la modélisation du rechargement par laser [19]. Dans le cas de la présente modélisation, le maillage a été difficile à stabiliser à cause de l'interpénétration des cellules menant à l'arrêt du calcul lorsque le critère de déformation (skewness) n'est plus respecté. Plusieurs configurations ont été testées avant de trouver celle qui présente le plus de stabilité.

Sur la figure (3), on montre des séquences représentant l'évolution temporelle de la surface et sa déformation due à la vaporisation induite par l'absorption de l'énergie déposée par le faisceau laser. On remarque sur ces séquences l'évolution du profil 3-D du keyhole, et sa forme allongée due à la vitesse de déplacement relativement élevée du faisceau laser. Un régime stationnaire s'établit, et une profondeur de pénétration maximale est atteinte pendant que le laser se déplace sur la surface de l'échantillon.

La quantité d'énergie laser absorbée est représentée sur la figure (4). Cette énergie produit la fusion et la vaporisation de la matière, sachant que le seuil de vaporisation pour le Fer se situe dans la plage  $4-8 \cdot 10^9$  W/m<sup>2</sup> [20,21]. La pression de recul induite par la vaporisation va pousser la fine couche de métal en fusion se situant à l'avant entre le keyhole et le matériau solide, celle-ci va contourner le keyhole pour aller alimenter en métal en fusion le bain fondu situé à l'arrière du keyhole. On montre sur la figure (5) la distribution des vecteurs vitesses indiquant le mouvement du métal en fusion.

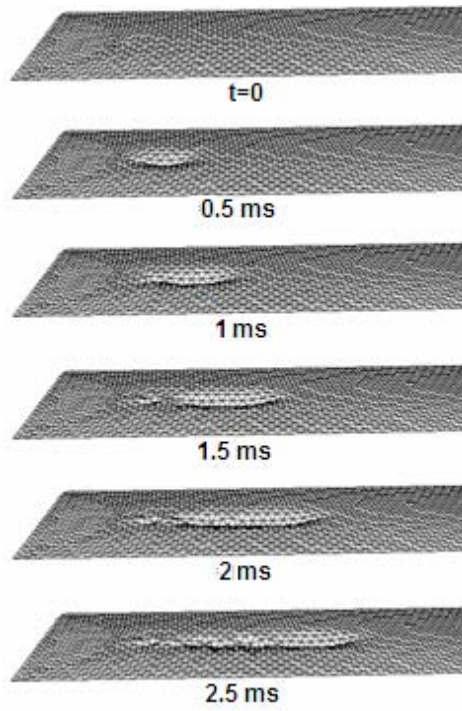


Figure 3: Séquences montrant la déformation de la surface de l'échantillon

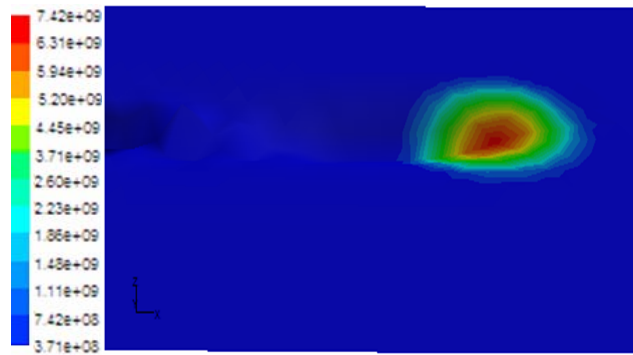


Figure 4: Densité de puissance ( $W/m^2$ ) de l'énergie laser déposée

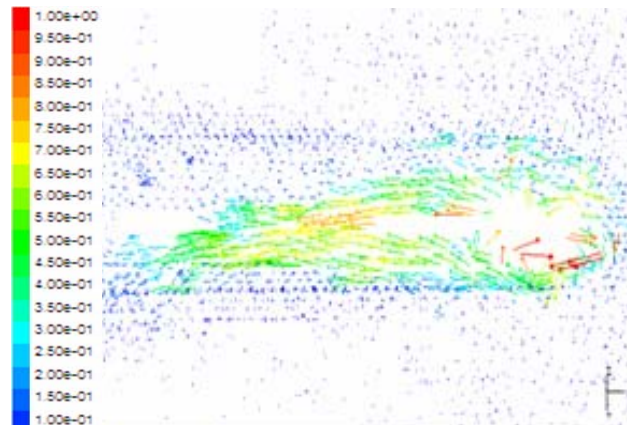
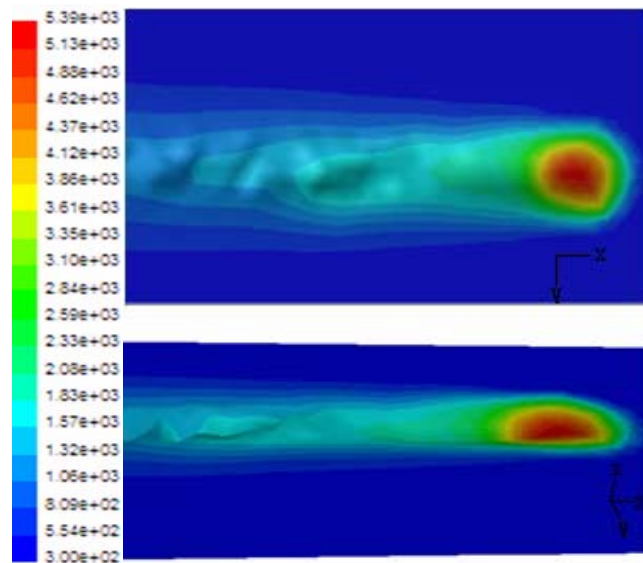


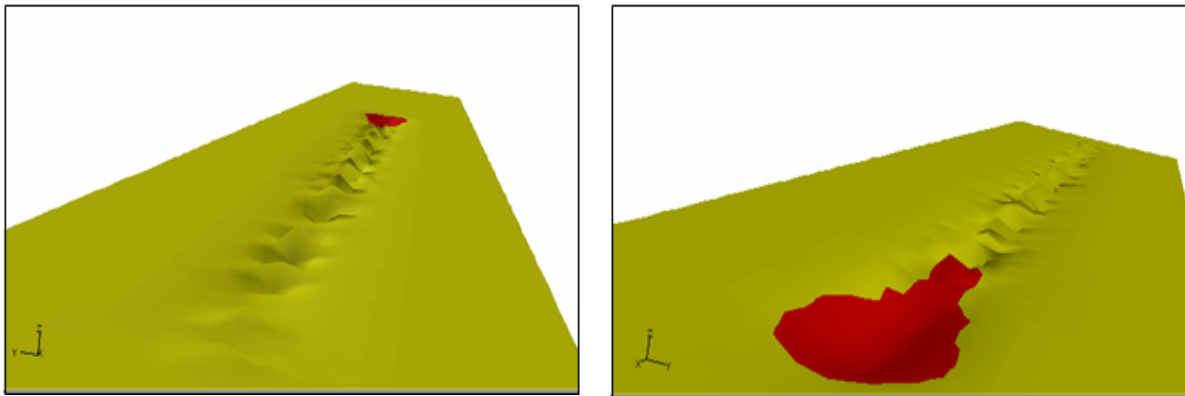
Figure 5: Velocity vectors (m/s) of the metal liquid at a depth of 0.1mm

La figure (6) représente la distribution de la température à partir de différents points d'observation. La vue plongeante montre clairement la forme allongée du keyhole et sa dimension.



**Figure 6: Distribution de la température en Kelvin**

Finalement, comme principal résultat, on montre sur la figure (7) une vue générale, sous différents angles d'observation, de l'échantillon avec le bain fondu et la région resolidifiée. On peut voir clairement des excroissances sous forme de bosses apparaissant quasi régulièrement derrière le bain fondu, ce qui suggère la mise en évidence par notre modélisation du phénomène 'humping'.



**Figure 7: Surface de l'échantillon vue de l'arrière et à partir du front du bain fondu**

#### 4. Conclusion

Une modélisation du soudage laser par pénétration profonde, Elle permet de mettre en évidence la formation de bosse, à vitesse de déplacement située dans le régime 'humping' tel que défini par les observations expérimentales. Nous avons utilisé dans nos calculs des procédures permettant d'insérer d'une part des mécanismes physiques complexes en géométrie 3-D, et d'autre part des conditions aux limites spécifiques dans le processus de calcul utilisant le code de CFD Fluent. La déformation de la surface par l'utilisation d'une technique par maillage dynamique a été la voie adoptée pour simuler la formation du keyhole et celles des bosses.

**References**

- [1] Fabbro R., Slimani S., Doudet I., Coste F., and Briand F., *J. Phys.D: App. Phys.*, **39**, 394-400 (2006).
- [2] Fabbro R., Slimani S., Coste F., and Briand F., *PICALO 2008 Conf. Proc.*, 173-178 (2008).
- [3] Soderstrom E. and Mendez P., *Science and Technology of Welding and Joining*, **11**, 572-579 (2006).
- [4] Amara E.H., Bendib A., *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **35**, 272-280 (2002).
- [5] Amara E.H., Bendib A., *International Conference on Applications of Lasers and Electro-Optics ICALEO 2002*, Scottsdale, Arizona, USA (2002)..
- [6] Amara E.H., Fabbro R., Bendib A., *J. Appl. Phys.*, **93**, 4289-4296 (2003).
- [7] Amara E.H., Fabbro R., Achab L., Hamadi F., Mebani N., *International Conference on Applications of Lasers and Electro-Optics, ICALEO 2004*, San Francisco, USA, (2004).
- [8] Amara E.H., Fabbro R., Hamadi F., Achab L., Mebani N., *CLEO/EQEC Proc.*, Munich, Germany (2005).
- [9] Amara E.H., Fabbro R., Hamadi F., *J of Laser Appl.*, **18**, 1, 2-11 (2006).
- [10] Amara E.H., Fabbro R., *3rd Pacific International Conference on Applications of Lasers and Optics, PICALO 2008*, Beijing, China (2008).
- [11] Amara E.H. and Fabbro R., *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **41**, n°5, 055503 (2008).
- [12] Semak V. and Matsunawa A., *J. Phys.D: Appl. Phys.*, **30**, 2541-2552 (1997).
- [13] Fabbro R. and Chouf K., *J. Appl. Phys.*, **87**, 9, 4075-4083 (2000).
- [14] Cipriani F.D., *Etude numérique de la convection thermocapillaire dans un bain fondu créé par laser*, Thèse de Doctorat, p. 162, N° 207.91.93, Aix-Marseille II Univ. (1991).
- [15] Duley W.W., *CO<sub>2</sub> Lasers: Effects and Applications*, Acad. Press, New York (1976).
- [16] Toyerskani E., Khajepour A., and Corbin S., *International Conference on Applications of Lasers and Electro-Optics, ICALEO 2002.*, Scottsdale, Arizona, USA (2002).
- [17] Matsunawa A. and Semak V., *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **30**, 798-809 (1997).
- [18] Poueyo A., Dabezies B., and Fabbro R., *Proc. SPIE*, **2207**, 184 (1994).
- [19] Amara E.H., Achab L., Boumia O., *J. Achiev. Mat. Manuf. Eng.*, **16**, 1120-1122 (2006).
- [20] Cline H.E. and Anthony T.R., *J. Appl. Phys.*, **48**, 3900 (1977).
- [21] Beyer E., Bakowsky L., Loosen P., Propawe R., and Herziger G., *Proc. SPIE*, **455**, 80 (1984)