

# Simulation numérique de l'interaction d'un pulse laser Nd : YAG avec un alliage de magnésium AZ91

Kamel ABDERRAZAK<sup>1\*</sup>, Wassim KRIAA<sup>1</sup>, Wacef BEN SALEM<sup>2</sup>, Hatem MHIRI<sup>1</sup>, Georges LEPALEC<sup>3</sup>, Michel AUTRIC<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Unité de Thermique et Environnement, Ecole Nationale d'Ingénieurs de Monastir, Avenue Ibn Jazzar, 5019 Monastir, Tunisie

<sup>2</sup>Laboratoire de Génie Mécanique, Ecole Nationale d'Ingénieurs de Monastir, Avenue Ibn Jazzar, 5019 Monastir, Tunisie

<sup>3</sup>Institut de Mécanique de Marseille, 60, rue Joliot-Curie, Technopôle de Château-Gombert, 13453 Marseille cedex 13, France

\*(auteur correspondant : abderrazak\_kamel@yahoo.fr)

**Résumé** - Nous présentons ici les premiers résultats d'une étude numérique dont l'objectif est la simulation de l'interaction d'un pulse laser Nd : YAG avec un alliage de magnésium. La modélisation est très complexe dues aux forts gradients thermiques présents sur de courtes distances. La très forte intensité absorbée à la surface de la plaque engendre une fusion du matériau qui provoque à la surface du bain une tension de surface connu par l'effet de Marangoni. Ce dernier a un effet considérable sur les transferts thermiques dans le bain liquide et par conséquent sur l'élargissement de la zone fondue. Nous utilisons la méthode des éléments finis pour calculer les transferts thermiques et l'écoulement. Nous présentons les résultats pour deux cas de calculs. Nous réalisons d'abord un calcul instationnaire d'un point de vue purement thermique afin de déterminer les dimensions de la zone fondue. Un deuxième calcul hydrodynamique stationnaire non-linéaire est lancé avec comme solution de départ celle issue du premier calcul.

## Nomenclature

$I$	densité du laser, $W$	<i>Symboles grecs</i>	
$P$	puissance crête du laser, $W$	$\rho$	masse volumique, $kg\ m^{-3}$
$A$	facteur d'absorption	$\varepsilon$	émissivité
$R_F$	rayon de focalisation, $m$	$\mu$	viscosité dynamique, $kg\ (m\ s)^{-1}$
$C_p$	capacité thermique à pression constante, $J\ (kg\ K)^{-1}$	$\sigma$	tension de surface, $N\ m^{-1}$
$k$	conductivité thermique, $W\ (m\ K)^{-1}$	$\sigma_0$	tension de surface au point de fusion, $N\ m^{-1}$
$h_C$	coefficient d'échange combiné, $W\ (m^2\ K)^{-1}$	<i>Indices et exposants</i>	
$T$	température, $K$	L	liquidus
$T_m$	température au point de fusion, $K$	S	solidus
$T_{trans}$	température de transition, $K$	amb	ambiante
$\Delta H$	chaleur latente, $J\ kg^{-1}$		
$f$	fraction		
$A_\sigma$	gradient de la tension de surface, $N\ (m\ K)^{-1}$		

## 1. Introduction

La simulation numérique du soudage par éléments finis, même si elle est relativement récente, a fait l'objet de nombreux travaux. Depuis les premières simulations dans les années 70 [1], la complexité, la performance et la taille des modèles ont beaucoup évoluées, parallèlement au développement des puissances informatiques.

Depuis le début du siècle, de nombreux auteurs ont tenté de résoudre de façon analytique l'équation de la chaleur dans le cas du soudage. Pour cela, seule est considérée l'action d'une source de chaleur concentrée, ainsi que les lois de propagation de l'énergie calorifique à partir de l'endroit où agit la source. Il s'agit donc de résoudre l'équation gouvernant les transferts par conduction dans une pièce, éventuellement soumise à l'action d'une source en mouvement. Les travaux de Rosenthal [2], demeurent les plus complets et les plus importants sur le sujet. Par la suite, les formules établies ont subi plusieurs corrections afin de tenir compte de tel ou tel paramètre (épaisseur de la pièce, paramètres de soudages...), afin de mieux s'accorder à une large gamme d'expériences.

La résolution par la méthode des éléments finis a été débutée par Mazumder et Steen dans les années 80 [3]. Elle permet en comparaison avec celle analytiques, de prendre en compte les nombreuses non linéarités qui interviennent dans l'équation de la chaleur (propriétés thermophysiques dépendant de la température, chaleur latente, échanges de chaleur avec le milieu extérieur...). Ce pendant, une analyse tridimensionnelle transitoire d'une opération de soudage complète nécessite encore des temps de calcul et de capacités mémoires relativement importants. C'est pourquoi certaines stratégies de résolution sont parfois adoptées, qui consistent par exemple à réduire la dimension du problème.

Le présent travail a pour objet principal la simulation de l'interaction d'un pulse laser avec une tôle d'alliage de Magnésium de type AZ91 (Tableau 1). Nous utilisons pour la résolution du problème notre code de calcul basé sur la méthode des éléments finis. Plusieurs phénomènes coexistent dans ce type de processus : La convection de Marangoni, due aux gradients de tension superficielle, l'apparition d'une pression de recul initié par la fusion du métal et l'apparition d'une zone pâteuse comprise entre les températures du solidus et de liquidus du matériau. Pour toutes ces raisons la modélisation est délicate.

De plus ce type de problème est très fortement non-linéaire et ceci pour plusieurs raisons. La plupart des paramètres thermophysiques, comme la densité du fluide et la conductivité thermique dépendent de la température et présentent un changement plus au moins brutal de leurs valeurs à la température de fusion du matériau. De forts mouvements de convection apparaissent dans le bain liquide. Ceux-ci influent d'une manière significative sur les transferts thermiques. Ce phénomène est appelé effet Marangoni et a une importance capitale sur la pénétration et l'élargissement de la zone fondue. Son origine est liée aux gradients de tension superficiels induits par les gradients de température le long de la surface libre. On dénote des vitesses d'écoulement en surface de plusieurs mètres par seconde. Le changement de phase liquide-solide modifie localement l'écoulement dans la zone pâteuse. Les équations de Navier-Stokes sont modifiées en conséquence. Les caractéristiques de l'écoulement peuvent être défini en fonction des fractions de liquide et de solide dans un milieu considéré comme poreux. Une autre particularité du soudage laser est la présence de forts gradients thermiques sur des faibles distances. La finesse du maillage est plus importante dans la zone d'interaction laser-matière.

	$T_f$	$T_v$	$H_f$	$H_v$	$C_p$	$\rho$	$\lambda$
	K	K	Jkg <sup>-1</sup>	Jkg <sup>-1</sup>	Jkg <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup>	Kgm <sup>-3</sup>	Wm <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup>
AZ91	883	1380	362000	5260000	1000	1600	84

Tableau 1 : Propriétés physiques de l'alliage de Magnésium AZ91

## 2. Description du modèle

Nous voulons simuler l'interaction de seulement un pulse laser. Le problème est donc axésymétrique. Nous avons choisi alors de travailler sur un modèle à deux dimensions, *figure 1*.

### 2.1. Densité laser et répartition

Pour la répartition du flux laser, elle est de forme Gaussienne.

$$I = A \frac{P}{2\pi R_F^2} \exp\left(-\frac{x^2}{2R_F^2}\right) \quad (1)$$

### 2.2 Mise en équation

L'équation de la chaleur avec addition d'un terme supplémentaire pour la prise en compte de la chaleur latente de fusion. Celle-ci est introduite comme une source.

$$\rho(C_p + N(\Delta H_F)) \frac{\partial T}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot (-k \vec{\nabla} T) = 0 \quad (2)$$

$N$  est une normalisation autour de la température de transition  $T_{trans}$ , elle est de forme gaussienne.

$$N = \frac{\exp\left(-\frac{(T - T_{trans})^2}{(\delta T)^2}\right)}{\sqrt{\pi(\delta T)^2}} \quad (3)$$

Avec  $\delta T = 50$  dans le calcul. La valeur de  $\delta T$  est très importante pour la convergence du modèle.

La modélisation de fluide dans le bain fondu est basée sur la résolution des équations de Navier-Stokes :

On traduit la convection forcée par l'implémentation de conditions en surface et les forces de volume par une approximation de Boussinesq.

*Conservation de la masse:*

$$\nabla \cdot \vec{u} = 0 \quad (4)$$

*Equation de mouvement:*

$$\rho \left( \frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + (\vec{u} \cdot \vec{\nabla}) \vec{u} \right) = -\vec{\nabla} p + \mu \Delta \vec{u} + \vec{F} - \frac{\mu}{K} \vec{u} \quad (5)$$

Le dernier terme dans l'équation représente la résistance de l'écoulement dans la zone pâteuse. Il est directement inspiré de la relation de Darcy. La perméabilité  $K$  dépend de la fraction volumique liquide d'après la relation de Kozeny-Carman [4] :

$$\frac{1}{K} = \frac{D(1 - f_L)^2}{f_L^3} \quad (6)$$

Où  $D$  dépend de la morphologie de la zone pâteuse. Ici il prend la valeur de  $10^{-10} \text{ m}^2$ . La fraction liquide est déduite de la température et varie linéairement entre le solidus et le liquidus. On définit la fraction liquide  $f_L$  et solide  $f_S$  comme suit :

$$T > T_L, \quad f_L = 1, \quad (7)$$

$$T_S \leq T \leq T_L, \quad f_L = \frac{(T - T_S)}{(T_L - T_S)} \quad (8)$$

$$f_S = 1 - f_L \quad (9)$$

## 2.3 Condition aux limites

- Les conditions aux limites de point de vue thermique sont :

*En surface supérieure :*

$$-k(T)\vec{\nabla}T\vec{n} = I + h_C(T - T_{amb}) \quad (10)$$

Avec  $h_C$  le coefficient de transfert thermique global calculer par la relation donnée par Goldak [5]:

$$h_C = 24.1 \times 10^{-4} \varepsilon T^{1.61} \quad (11)$$

*Sur les bords et la face inférieure :*

$$-k(T)\vec{\nabla}T\vec{n} = h_C(T - T_{amb}) \quad (12)$$

- Les conditions aux limites de point de vue écoulement sont :

La condition imposée en surface libre du bain fondu est la suivante :

$$-\mu \frac{\partial u}{\partial z} = \frac{\partial \sigma}{\partial T} \frac{\partial T}{\partial x} \quad (13)$$

Dans notre étude, la tension de surface,  $\sigma$ , est une fonction linéaire de la température [29]:

$$\sigma(T) = \sigma_0 - A_\sigma(T - T_m) \quad (14)$$

*Sur les bords et la face inférieure:*  $u = 0$  (15)

## 3. Approche numérique

### 3.1 Maillage de la géométrie

Afin d'améliorer l'exactitude du calcul, un système de maillage triangulaire a été employé, c.-à-d., un maillage fine près de la source de chaleur (zone 1) et plus grand loin du point d'interaction laser-plaque (zone 2), *figure 2*. La finesse du maillage est réalisée avec 6958 éléments et 3706 noeuds.

### 3.2 Procédure de la résolution

Pour obtenir plus d'information de la simulation numérique afin de bien identifier le flux et le mécanisme de transfert thermique dans le bain fondu, comment la force de Marangoni et le poussée d'Archimède influencent la forme et le développement du bain de fusion, deux cas de simulation ont été effectués dans notre calcul.

- *Cas 1* : seulement un calcul thermique prenant en compte uniquement le transfert de chaleur par conduction. L'équation de mouvement n'est pas résolue.
- *Cas 2* : les équations de Navier-Stokes, le phénomène de Marangoni et la conduction thermique existent ensemble.

Afin de comparer a prévu les résultats de deux cas, tous les paramètres calculateurs sont les mêmes, comme la puissance laser, le rayon de focalisation, le temps de calcul (*Tableau 2*).

	$P$	$R_F$	$T_{initiale}$	$Temps$	$Pas\ de\ temps$
	$W$	$\mu m$	$K$	$ms$	$ms$
AZ91	700	200	300	8	1

Tableau 2 : Paramètres de la simulation

#### 4. Résultats et discussions

Les figures 3 et 4 illustrent le contour de la température au niveau de la plaque. Le profil parabolique de la température est une conséquence de la distribution gaussienne de l'énergie. La position de la source de chaleur est symétrique par rapport à l'axe des abscisses. Les résultats de la simulation du « cas 1 », dans le cas du transfert thermique par conduction, donne une température maximale au centre de l'ordre de 1310 K, figure 3. Dans le cas 2 (figure 4) où la convection joue son rôle, on voit bien que la forme de la zone fondue est plus large et moins profonde. La température maximale dans ce cas est de l'ordre de 1120.

Pour le « cas 2 », la tension superficielle, l'effet de Marangoni et la force de poussée d'Archimède mettent en valeur le transfert thermique dans le bain en fusion en pilotant le flux du liquide fondu. La figure 5 décrit la distribution des vecteurs vitesse, elle montre l'existence des deux vortex dans le bain de fusion. En effet le liquide fondu sur la surface libre découle du centre vers l'extérieure. Cette distribution du flux provoquera un bain de fusion plus large et peu profonde.

#### 5. Conclusion

Une modélisation à base d'éléments finis des équations de transfert thermique et d'écoulements comportant un changement de phase a été développée pour simuler numériquement le processus d'interaction d'un pulse laser Nd : YAG avec un alliage de Magnésium AZ91.

1. Les caractéristiques de flux et de transfert thermique dans le traitement laser se sont analysées avec succès en utilisant des modèles développés et des techniques de simulation numériques. Ceci fournira un outil puissant pour étudier les processus de transport dans un bain de fusion ;
2. Le phénomène de Marangoni provoqué par la tension de surface modifie de manière significative les caractéristiques du procédé de fusion et de solidification, et rendent le bain fondu plus large et peu profond ;
3. Les propriétés thermiques du matériau ont des effets importants sur les phénomènes de transport dans le bain de fusion, et par conséquent sur sa formation et sa forme.

#### Références

- [1] Hibbitt, H.D., Marcal, P.V., A numerical, thermo-mechanical model for the welding and subsequent loading of a fabricated structure, *computers and Structures*, 3-5 (1973), 1145-1174.
- [2] Rosenthal D., Mathematical theory of moving sources of heat and its application to metal treatments, *Trans ASME*, 68, (1946), 849-866.
- [3] Mazumder, J., and Steen, W. M. 1980. Heat transfer model for CW laser material processing. *J. Appl. Phys.*, 51(2), 941-947.
- [4] V.R. Voller, C.R. Swaminathan, General source-based method for solidification phase change, *Numer. Heat Transfert*, Part B 19 (1991), 175-189.
- [5] J. Goldak, computer modeling of heat flow in welds, *Metall. Trans.*, (1986), 17-26.

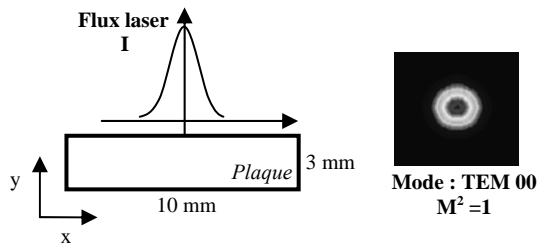


Figure 1 : Représentation du problème et du flux laser

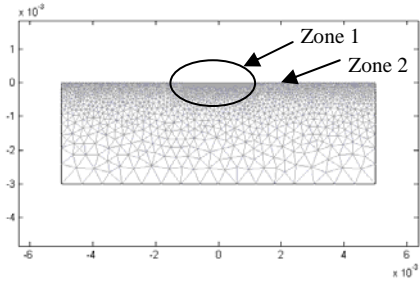


Figure 2 : Maillage de la géométrie

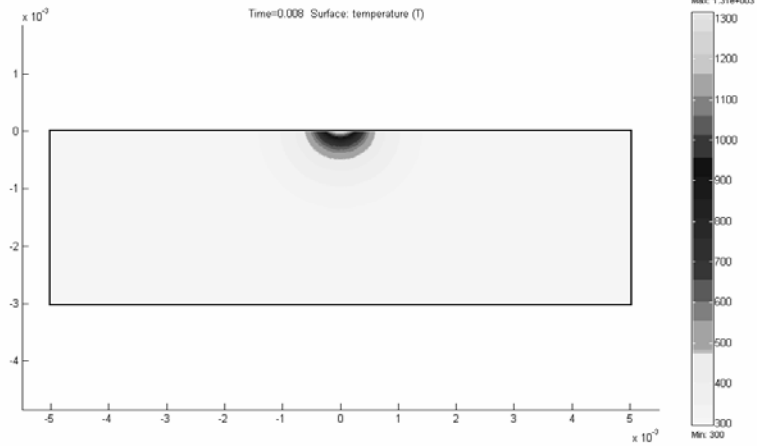


Figure 3: Contour de température dans le cas 1

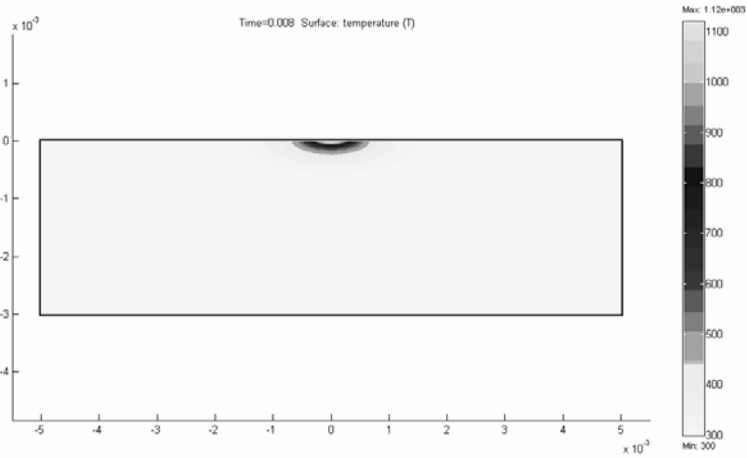


Figure 4 : Contour de température dans le cas 2

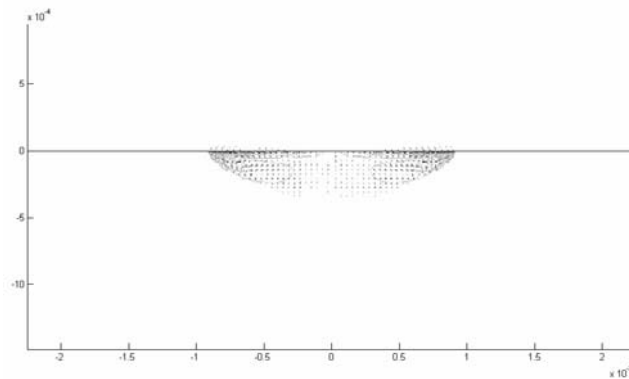


Figure 5 : Distribution des vecteurs vitesses dans le plan X-Y