

# Influence des forces d'entrainements sur la pénétration de bain de fusion lors le soudage TIG

Zitouni Abdel Halim<sup>1</sup>, Aissani Mouloud<sup>1</sup>, Boukraa Moustafa<sup>1</sup>

1. Mechanical and Metallurgical Division  
Welding and NDT Research Center (CSC)  
BP.64, Cheraga – ALGERIA  
a.zitouni@csc.com

Younes BENKEDDA<sup>2</sup>

2. Départ. Mécanique, Fac. Sci. Ing, Université de Blida, Route de soumaa Bp270

**Résumé**— Dans ce travail nous nous intéressons à l'étude du comportement thermohydraulique du bain de fusion lors du soudage TIG sans métal d'apport. L'influence des forces d'entrainements sur la morphologie et la pénétration de bain de fusion sera mise au point. Le modèle intègre trois forces prédominantes indépendantes, la force de tension de surface (effet de Marangoni), la force de convection naturelle (flottabilité) et la force électromagnétique. Une simulation numérique 2D de soudage TIG d'une tôle en acier inoxydable 304L est donc menée, en utilisant le code du calcul Comsol 4.2

**Mots clefs** : Modélisation thermohydraulique, soudage TIG, forces d'entrainements, bain de fusion.

## INTRODUCTION

De nos jours, le soudage à l'arc électrique TIG est l'un des processus les plus utilisés lors de l'assemblage. Ce procédé est utilisé pour assurer la continuité métallique entre les deux pièces soudées. Lors du soudage, plusieurs phénomènes physiques interviennent, entre autres le transfert de chaleur, l'hydrodynamique et les changements de phases métallurgiques. Ces phénomènes ont un grand effet sur la microstructure finale et la morphologie de la zone soudée.

Lors du soudage TIG, le bain de fusion est le siège d'un fort gradient thermique dont la variation de température s'échelonne entre la température de fusion du métal sur les bords du bain et celle proche à la vaporisation du métal au centre du bain. Cette variation de température s'étale sur une distance égale à quelques millimètres par rapport au centre du bain. Ainsi, la morphologie de la zone soudée est conditionnée par les mouvements du liquide dans le bain de fusion, qui sont initiés par des forces d'origines physiques différentes et selon leur orientation on obtient l'allure mouillante ou pénétrante du joint soudé [1].

Dans ce travail, on se base sur l'étude thermohydraulique du soudage TIG à travers une simulation 2D. Les forces d'entrainements considérées dans notre modèle sont la force de tension de surface, la force électromagnétique (Lorentz) et la force de convection naturelle. Les différents résultats obtenus par le calcul numérique concernant les champs thermiques, vitesses, l'évolution de la fonction fraction liquide d'interface

liquide/solide, sont présentés pour le cas mouillant et pénétrant, selon le signe du gradient de la tension de surface.

## MODELISATION THERMO HYDRAULIQUE 2D

### Thermique

En tenant compte de l'hypothèse d'équilibre thermique local du mélange (solide/ liquide) et la présence d'un changement de phase solide-liquide, le bilan d'énergie s'écrit sous la forme de l'équation de la chaleur suivante

$$\rho c \left( \frac{\partial T}{\partial t} + v \nabla T \right) - \lambda \Delta T = -\rho L \frac{\partial g_l}{\partial t} \quad (1)$$

$$g_l = \frac{1}{2} \left( \tanh \left( \frac{T - T_f}{\Delta T} \right) + 1 \right) \quad (2)$$

Où  $\rho$ ,  $c$  sont la masse volumique et la chaleur spécifique massique respectivement.  $v$  est la vitesse d'écoulement dans le bain.  $\lambda$  est la conductivité thermique du matériau.  $g_l$  représente la fraction du liquide au point considéré du domaine de calcul, et  $L$  est la chaleur latente.

$T$ ,  $T_f$  sont la température calculée et la température de fusion du matériau respectivement.

### Dynamique

#### Origines principales de l'écoulement

Le modèle intègre trois forces indépendantes qui sont la force de convection naturelle, la force électromagnétique et la force de tension de surface.

- Force de flottabilité (Convection naturelle) :

La force motrice de ces mouvements est définie à partir de l'approximation de Boussinesq :

$$\vec{F}_f = \rho_0 (1 - \beta(T - T_0)) \vec{g} \quad (3)$$

Où :  $\beta$  désigne le coefficient de la dilatation thermique,  $\vec{g}$  est le vecteur de la pesanteur et  $\rho_0$ ,  $T_0$  sont la masse volumique et la température de référence respectivement.

-Tension de surface :

Force surfacique dont le coefficient de tension superficielle dépend de la température.

$$\gamma(T) = \gamma_0 + \frac{\partial \gamma}{\partial T} (T - T_0) \quad (4)$$

Où  $\gamma$  est la tension de surface.

-Force électromagnétique :

Les forces électromagnétiques dans le bain de fusion sont créées par le champ magnétique induit par l'arc électrique, ces forces sont appelées également forces de Lorentz (5). Ces forces sont déduites de la résolution des équations de Maxwell [2].

$$\vec{F}_{EM} = \vec{j} \wedge \vec{B} \quad (5)$$

Avec  $\vec{j}$  la distribution de la densité de courant électrique et  $\vec{B}$  le champ magnétique.

*Les équations de l'hydrodynamique*

Dans l'hypothèse d'une phase solide fixe et rigide (la fraction solide a une vitesse nulle). Les équations générales qui régissent le mouvement d'un fluide réel sont :

- Équation de conservation de la quantité de mouvement :

$$\rho \left( \frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + \vec{v} \nabla \vec{v} \right) = \vec{\nabla} \left( -P + \mu \left( \nabla \vec{v} + (\nabla \vec{v})^T \right) \right) + \vec{F}_V \quad (6)$$

Où  $\vec{F}_V = \vec{F}_{EM} + \vec{F}_f \quad (7)$

- Équation de conservation de la masse :

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{v} = 0 \quad (8)$$

*Effet Marangoni*

Les gradients de tension superficielle dus à des variations de température ou de concentration de solutés (tensio-actifs par exemple) peuvent créer des contraintes en surface et induire des mouvements dans les fluides. Cette contrainte est une condition supplémentaire qui est imposée sur la surface supérieure du bain et elle s'oppose au cisaillement dynamique.

$$-\mu \frac{\partial v_r}{\partial z} = \frac{\partial \gamma}{\partial T} \frac{\partial T}{\partial r} \quad (9)$$

Où  $\gamma$  est la tension de surface.

*Application*

Une simulation numérique (2D axisymétrique) du soudage TIG d'une tôle en acier inoxydable 304L d'épaisseur  $e = 0,003m$  et d'une largeur  $L = 0,006m$  est menée. Pour cela, on a implanté notre modèle dans le code de calcul Comsol@-4.2 basé sur la méthode des éléments finis. Les inconnues de ce problème sont le champ de température, le champ de vitesse dans le bain liquide. Les hypothèses de travail sont :

- Étude bidimensionnelle symétrique (l'axe de symétrie z).
- Toutes les propriétés physiques sont constantes, sauf la tension de surface qui dépend continuellement de la température.
- surface libre indéformable,
- métal liquide incompressible newtonien,
- écoulement laminaire.

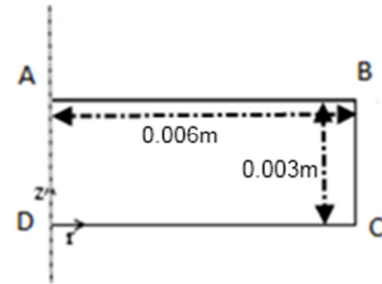


Figure 1 Schéma descriptif du problème

Les valeurs des propriétés physiques du matériau utilisé dans cette étude (acier inoxydable 304L) sont représentées dans le tableau 1 :

Grandeur	Symbole	Valeur	Unité
Chaleur spécifique du liquide	$c_l$	695	J/(kg.K)
Chaleur spécifique du solide	$c_s$	602	J/(kg.K)
Gravité	$g$	9.81	m/s <sup>2</sup>
Chaleur latente de fusion	$L_f$	272	kJ/kg
Température de fusion	$T_f$	1713	K
Température de référence	$T_0$	293	K
Coefficient de dilatation thermique	$\beta$	1e-4	1/K
Gradient de tension de surface	$\frac{\partial \gamma}{\partial T}$	-1 e-4	N/(m.K)
Intervalle de solidification	$\Delta T$	30	°C
Viscosité dynamique du liquide	$\mu_l$	6e-3	Kg/(m.s)
Conductivité thermique du liquide	$\lambda_l$	20	W/(m.K)
Conductivité thermique du solide	$\lambda_s$	24	W/(m.K)
Masse volumique du liquide	$\rho_l$	6350	Kg/m <sup>3</sup>
Masse volumique du solide	$\rho_s$	7500	Kg/m <sup>3</sup>
quantité de chaleur maximale	$q_{max}$	200	W

Tableau 1 Paramètres de la simulation numérique

*Conditions aux limites*

*Thermiques*

Sur la frontière AB (1) : source de chaleur surfacique.

$$Q = \frac{3q_{max}}{\pi R_0^2} \cdot e^{-\frac{3r^2}{R_0^2}} \quad (10)$$

Tel que  $q_{max}$  est la chaleur maximale,  $R_0$  le rayon caractéristique [3].

Sur les frontières BC et CD: échange de la chaleur par rayonnement et par convection.

$$Q_{ray} = \epsilon \sigma (T^4 - T_0^4) \quad (11)$$

$\sigma$  : Est la constante de Stefan-Boltzmann.

$$Q_{con} = h(T - T_0) \quad (12)$$

$h$  : Est le coefficient de transfert thermique par convection.

Sur la frontière DA : condition de symétrie.

$$\vec{q} \cdot \vec{n} = 0 \quad (13)$$

**Dynamiques**

Deux types de conditions sont imposés aux limites du domaine

Sur la frontière AB (1) : Condition de glissement

$$\vec{v} \cdot \vec{n} = 0 \tag{14}$$

Sur la frontière DA : condition de symétrie

$$\vec{v} \cdot \vec{n} = 0 \tag{15}$$

Sur les frontières BC,CD : Condition de non glissement

$$\vec{v} = 0 \tag{16}$$

**Maillage**

Pour le calcul on a utilisé un maillage quadratique libre qui est constitué de 357 éléments représentés sur la figure 2. La région du bain liquide est maillée beaucoup plus finement, en raison des gradients de température et de vitesse très importants [4].

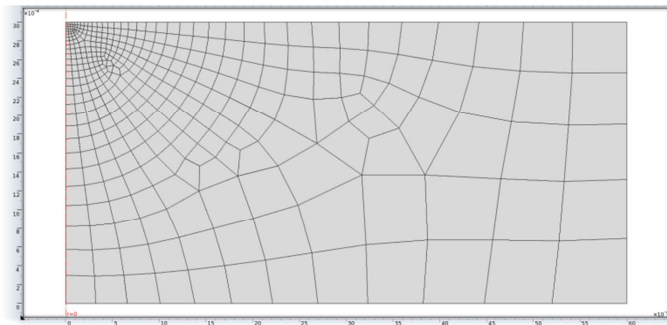


Figure 2 Maillage opté du domaine de calcul.

**RESULTATS ET DISCUSSIONS**

La figure 3 représente le flux de chaleur en fonction de la longueur d'arc utilisé pendant l'opération de soudage, ce flux est de forme gaussienne avec une valeur maximale de  $4.7 \times 10^7 \text{ W/m}^2$ .

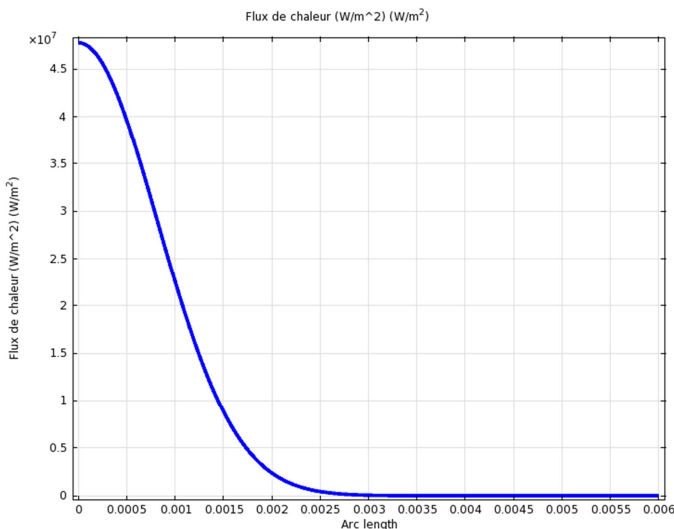


Figure 3 flux de chaleur utilisé pendant le soudage

La Figure 4 représente la distribution du champ de température et les isothermes calculées à  $t=5 \text{ s}$  pour une valeur négative de gradient de tension de surface  $\frac{\partial \gamma}{\partial T} = -1^{-4}$ , ce qui donne un bain de fusion mouillant. La température maximale au sommet (point A de la Figure1) atteint  $2484 \text{ K}$  environ.

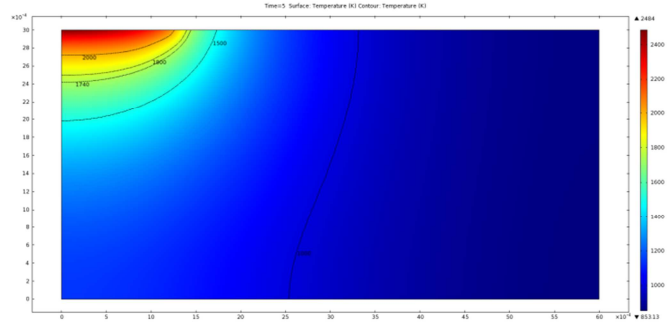


Figure 4 Distribution du champ de température et les isothermes calculées à  $t=5 \text{ s}$  (avec  $\frac{\partial \gamma}{\partial T} < 0$ ).

Les forces d'entrainements dans le bain de fusion tels que les forces de tension de surface, les forces de convection naturelle (flottabilité) et les forces électromagnétiques sont examinées individuellement afin de comparer leurs effets sur la pénétration du bain de fusion.

La figure 5 illustre l'écoulement dans le bain de fusion dû à la force de tension de surface, qui est provoquée par les gradients de température à la surface du bain de fusion et éventuellement, par la présence des éléments tensioactifs à la surface dans le bain de fusion.

Les résultats ont été calculés en utilisant une valeur négative de gradient de tension de surface  $\frac{\partial \gamma}{\partial T} = -1^{-4}$ . Pour cela on obtenus un écoulement radial dirigé vers l'extérieur, ce qui donne un bain de fusion mouillant. Les vitesses maximales en surface sont de l'ordre de  $8,5 \text{ Cm/s}$ , ces résultats sont très proches de la littérature [5].

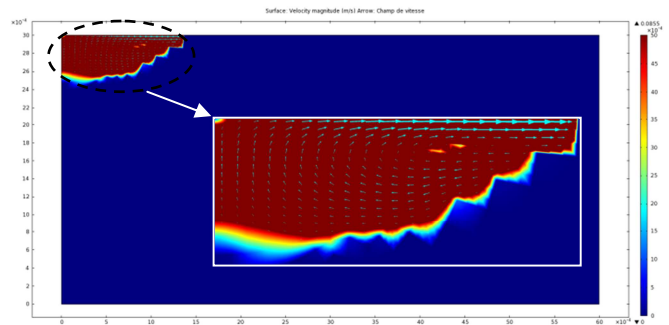


Figure 5 champ de vitesse dans le bain de fusion dû à la force de tension de surface lorsque  $\frac{\partial \gamma}{\partial T} < 0$

La Figure 6 montre l'écoulement et le champ de vitesse dans le bain de fusion dû à la force de flottabilité (convection naturelle), qui est causé par le gradient de température dans le

bain de fusion. La convection induite par la force de flottabilité est faible, elle provoque un écoulement global dirigé vers l'extérieur ce qui favorise un bain mouillant. La vitesse est relativement faible, avec un maximum de 0,014 cm/s. La force de flottabilité ne joue pas un rôle important affectant la forme du bain de fusion.

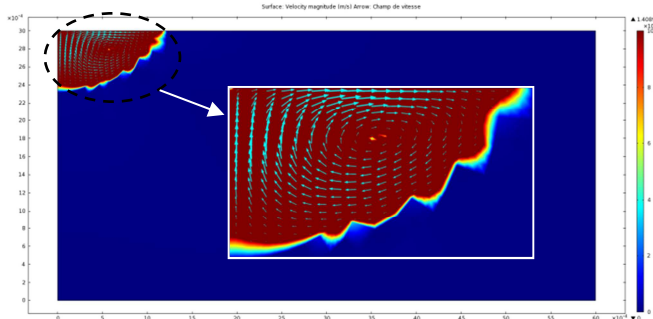


Figure 6 champ de vitesse dans le bain de fusion dû à la force de flottabilité (convection naturel)

L'écoulement et le champ de vitesse dans le bain de fusion dû à la force électromagnétique sont représentés par la Figure 7, qui est causée par l'interaction entre le courant dans le bain de fusion et le champ magnétique qu'il génère. L'écoulement de fluide sur la surface du bain de fusion est radial et dirigé vers l'intérieur. La forme de pénétration en raison de la force électromagnétique est très similaire à que de la force de flottabilité et la vitesse maximale est très faible, elle de l'ordre de  $0.054 \text{ e}^{-6} \text{ m/s}$ .

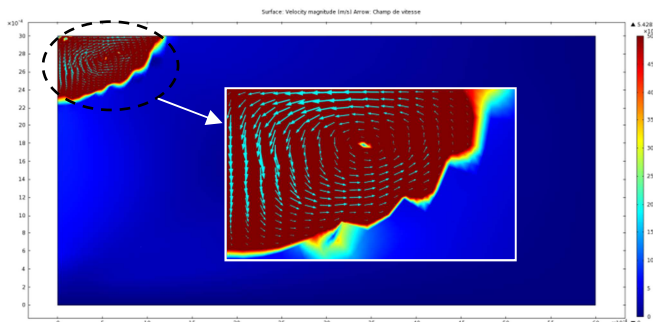


Figure 7 champ de vitesse dans le bain de fusion dû à la force électromagnétique (Lorentz)

Dans la Figure 8 qui représente la forme de bain de fusion et le champ de vitesse calculé dans le bain de fusion avec la force résultante. Comme on peut le constater, le champ de vitesse est constitué d'un écoulement radial dirigé vers l'extérieur avec une vitesse maximale de l'ordre de 8,5 cm/s.

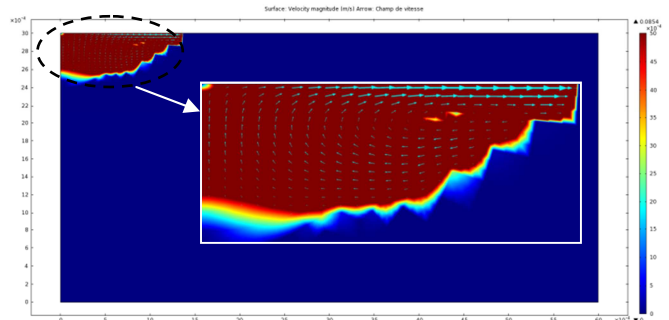


Figure 8 champ de vitesse dans le bain de fusion dû à la résultante des forces

### CONCLUSION

Dans cette étude nous avons présenté un modèle 2D axisymétrique du comportement thermohydraulique du bain de fusion. Les calculs des champs de vitesse dans le bain de fusion pour chaque force d'entraînement nous a permis de comparer l'influence de ces forces sur la morphologie et la pénétration de bain de fusion lors du soudage TIG. À partir des résultats trouvés, on constate que la tension de surface joue un rôle major sur la détermination du sens d'écoulement du métal fondu dans le bain de fusion ainsi sur la morphologie et pénétration du bain de fusion, par rapport à la force de convection naturelle et la force électromagnétique.

Nous envisageons dans nos perspectives de maître au point une modélisation thermohydraulique du soudage TIG en 2D, en tenant compte l'effet d'une surface libre déformable du bain, voir son effet sur la morphologie finale de ce bain de fusion. Puis dans une seconde étape, faire une modélisation thermohydraulique du soudage TIG en 3D.

### RÉFÉRENCES

- [1] K.Mills and B. Keene, Factor affecting variable weld penetration, International Materials Reviews, Vol.35, 1990, 185-216.
- [2] C. Tsai, C. Tso, Welding brazing and soldering, volume 6 de ASM Handbook, chapter Heat Flow in Fusion Welding, 1993,7-18.
- [3] J.Goldak, A. Chakravarti and M.Bibby, A new finite element model for welding heat sources. Metallurgical and Materials Transactions B Vol. 15, N°2, 1984, 299-305.
- [4] M.Médale and M.Jaeger, Modélisation par éléments finis d'écoulements à surface libre avec changement de phase solide-liquide International Journal of Thermal Sciences, Vol.38, 1998, 3267-276.
- [5] W.H. Kim, H. G. Fan & S.-J. Na, Effect of various driving forces on heat and mass transfer in arc welding, Numerical Heat Transfer, Part A: Applications, 1997, 32:6, 633-652.