

ETUDE THERMIQUE DE COMPORTEMENT DU BAIN DE FUSION LORS DU SOUDAGE TIG – ÉVOLUTION 2D TRANSVERSALE-

*Zitouni abdel halim*¹, *Aissani mouloud*² et *Benkedda younes*³

1: Division Mécanique et Métallurgie, Centre de recherche scientifique en Soudage et Contrôle, CSC
Route de Delly Ibrahim, BP 64, Chéraga, ALGER, halim0580@yahoo.fr

2 : Division Mécanique et Métallurgie Centre de recherche scientifique en Soudage et Contrôle, CSC
Route de Delly Ibrahim, BP 64, Chéraga, ALGER, aissani_mld@yahoo.fr

3: Départ. Mécanique, Fac.Sci.Ing, Université de Blida, Route de soumaa Bp270, y_benkedda@yahoo.fr

Résumé :

Dans ce travail nous nous intéressons à la modélisation et la simulation thermique du comportement du bain de fusion lors le soudage TIG (Tungstène Inert Gaz). Dans un premier temps, nous décrivons un modèle mathématique du transfert du flux thermique créé par l'arc électrique du procédé sans métal d'apport. Ce modèle tient compte l'effet du changement de phases et néglige les effets convectifs dû au mouvement du fluide dans une première approche.

Dans un second temps, une simulation numérique (2D axisymétrique) par la méthode des éléments finis du soudage TIG d'une tôle en acier inoxydable 304L est menée. Donc, nous avons implanté notre modèle dans le code du calcul Comsol®4.2. Les résultats obtenus concernent les champs thermiques à de différents instants décrivant la progression en profondeur et l'évolution de la fonction d'interface liquide/solide (fraction liquide). Selon la littérature nos résultats montrent une bonne concordance.

Mots clés : Modélisation thermique, soudage TIG, Comsol®, acier inoxydable.

1 Introduction

Le soudage TIG est un procédé utilisé pour des réalisations délicates qui requièrent des qualités d'assemblage optimales. Lors du soudage, plusieurs phénomènes physiques interviennent, tels que le transfert de chaleur, l'hydrodynamique et les phases métallurgiques qui ont une grande importance sur la microstructure finale et la morphologie de la zone soudée. Par conséquent, la connaissance approfondie de ces phénomènes est primordiale pour obtenir une soudure de bonne qualité, et faire une simulation numérique du soudage la plus proche de l'expérience.

Le bain de fusion lors du soudage TIG 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 la température proche à la vaporisation du métal au centre du bain. Cette variation de température, d'ordre de 1300 à 1500 °C, s'étale sur une distance égale à quelques millimètres par rapport au centre du bain [1].

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 [2].

Dans ce travail, on s'intéresse à une étude thermique du soudage TIG à travers une simulation 2D axisymétrique, telle que la surface libre du bain est supposée plane et la source de chaleur a une distribution du flux Gaussienne. Donc, on présente dans la suite la modélisation du problème puis nos résultats numériques avec discussions.

2 Modélisation mathématique

2.1 Formulation mathématique

En tenant compte 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 :

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

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

Où ρ , c sont la masse volumique et la chaleur spécifique massique respectivement.

λ 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.

2.2 Hypothèses de la modélisation

La simulation thermique du procédé de soudage TIG sans métal d'apport s'effectue sur une plaque d'acier inoxydable 304L d'épaisseur $e = 0,01$ m et d'une largeur de $L = 0,02$ m, (figure 1). L'apport d'énergie de l'arc électrique est modélisé par une source de chaleur ayant une distribution surfacique gaussienne. Ce flux de chaleur q est transmis à la pièce par la frontière supérieure (AB) du domaine. Les fonctions inconnues de notre problème sont le champ de température dans la plaque et la fonction fraction du liquide. Les hypothèses de base récapitulées sont :

- Les effets convectifs sont négligés.
- Domaine bidimensionnel axisymétrique (l'axe de symétrie est le z).
- Les propriétés physiques du matériau sont considérées constantes.
- Prise en compte seulement du problème thermique du soudage avec un flux Gaussien de la source.

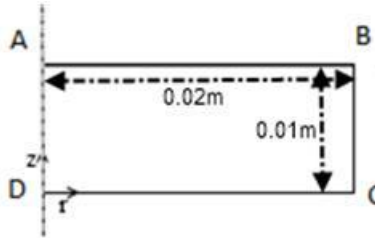


Figure 1 : Schéma descriptif du problème

Les valeurs des propriétés physiques du matériau utilisées (l'acier inoxydable 304L) et les paramètres de la simulation numérique sont représentés dans le tableau 1 ci-dessous :

Tableau 1- Paramètres de la simulation numérique

Grandeur	Symbole	Valeur	Unité
Chaleur spécifique massique	c	602	J/(kg.K)
Gravité	g	9.81	m/s ²
Chaleur latente de fusion	L_f	272	kJ/kg
Température de fusion	T_f	1713	K
Température de référence	T_{ref}	293	K
Conductivité thermique	k	24	W/(m.K)
Masse volumique	ρ	7500	Kg/m ³
quantité de chaleur maximale	q_{max}	200	W
Intervalle de solidification	ΔT	44	K

2.3 Conditions aux limites

- Sur la frontière AB (figure 1) : la source de chaleur est de la forme Gaussienne, [3].

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

Tel que : q_{max} est la chaleur maximale et R_0 le rayon caractéristique ($R_0=0.003m$).

- Sur les frontières BC et CD: on a la chaleur échangée par rayonnement et convection. Elle est donnée comme suit :

$$Q_{rayonnement} = \varepsilon\sigma(T^4 - T_0^4) \quad (4)$$

$$Q_{convection} = h(T - T_0) \quad (5)$$

σ : Est la constante de Stefan-Boltzmann.

h : Est le coefficient de transfert thermique par convection.

- Sur la frontière DA : c'est la symétrie.

$$\vec{q} \cdot \vec{n} = 0 \quad (6)$$

2.4 Maillage

On a utilisé dans nos calculs un maillage quadratique libre qui est constitué de 554 éléments finis. Il est représenté sur la figure 2. La région du bain liquide est maillée beaucoup plus finement que d'autres régions, en raison des forts gradients de température et de la vitesse de l'écoulement apparente [4].

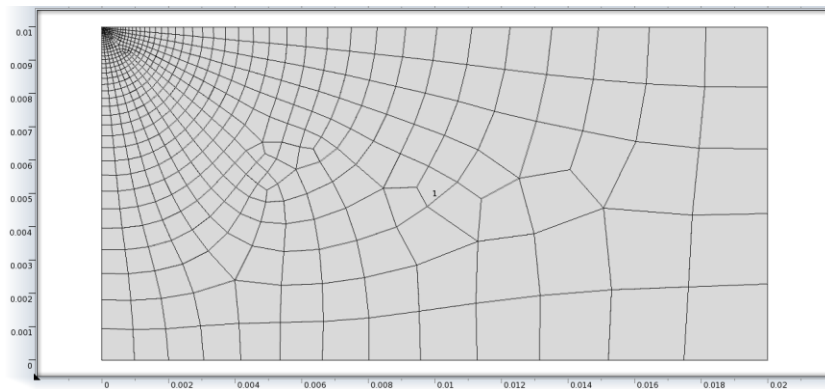


Figure 2 : Maillage opté du domaine de calcul.

3 Résultats et discussions

Les résultats de la simulation numérique calculée en utilisant le code Comsol® 4.2 sont représentés dans cette partie. La figure 3 (a et b) illustre la distribution du champ de température et les isothermes calculées dans le bain de fusion et aussi bien dans toute la pièce en fonction du temps. On a choisi donc, deux instants différents pour l'illustration $t=1s$ et $3s$. Pour la première seconde (figure 3a) la température maximale au sommet (correspond au point A de la figure 1) atteint les 1756 K environ. Cette valeur est légèrement supérieure à la température de fusion de l'acier inoxydable qui égale à 1713K. Donc, on a le début de la fusion en ce point. La température continue son accroissement en fonction du temps pour atteindre une valeur d'ordre de 2193 K à la troisième seconde (figure 3b) [5]. Cette valeur est largement supérieure à la température de fusion de l'acier, cela entraîne l'élargissement de la zone fondue, ce qui permet aussi au soudeur de commencer à déplacer sa torche de soudage afin de réaliser le cordon de soudure.

La distribution de la fonction de 'fraction du liquide' à ces deux instants (1s et 3s) sont représentées dans la figure 4(a,b). En comparant l'isotherme délimitant la zone fondue figure 3 (a et b) avec la courbe de la fonction fraction liquide g_l (lors $g_l \geq 0.1$), on constate que cette fonction délimite bien l'interface solide-liquide de la zone fondue, ceci est montré pour les courbes de la première et la troisième seconde.

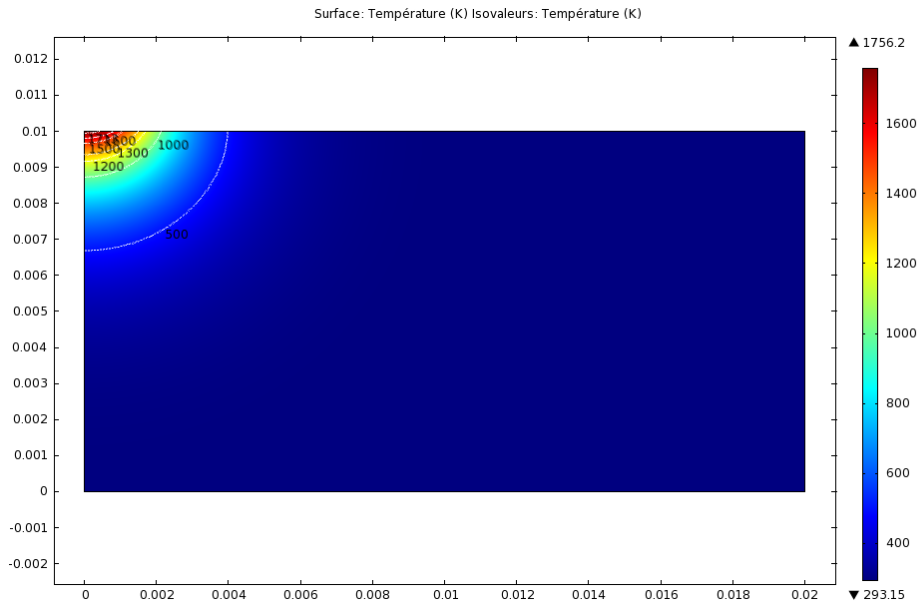


Figure 3a : Distribution de champ de température et isothermes calculées à $t=1s$.

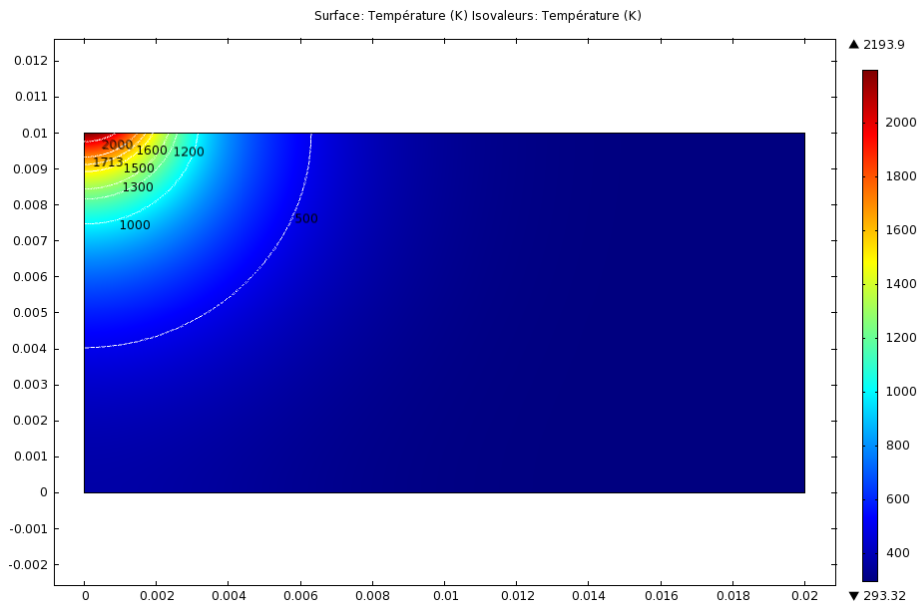


Figure 3b : Distribution de champ de température et isothermes calculées à $t=3s$.

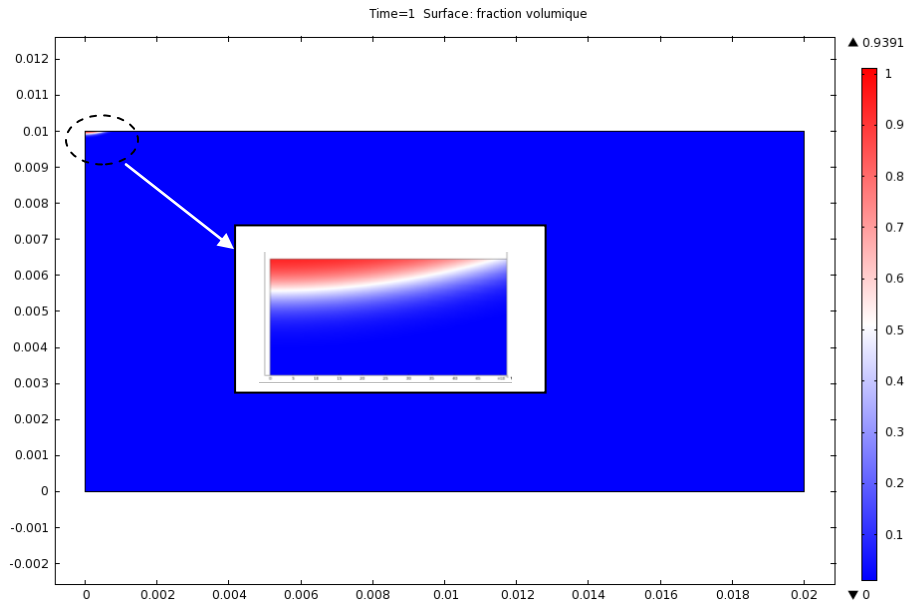


Figure 4 a: Fraction du liquide à $t=1s$

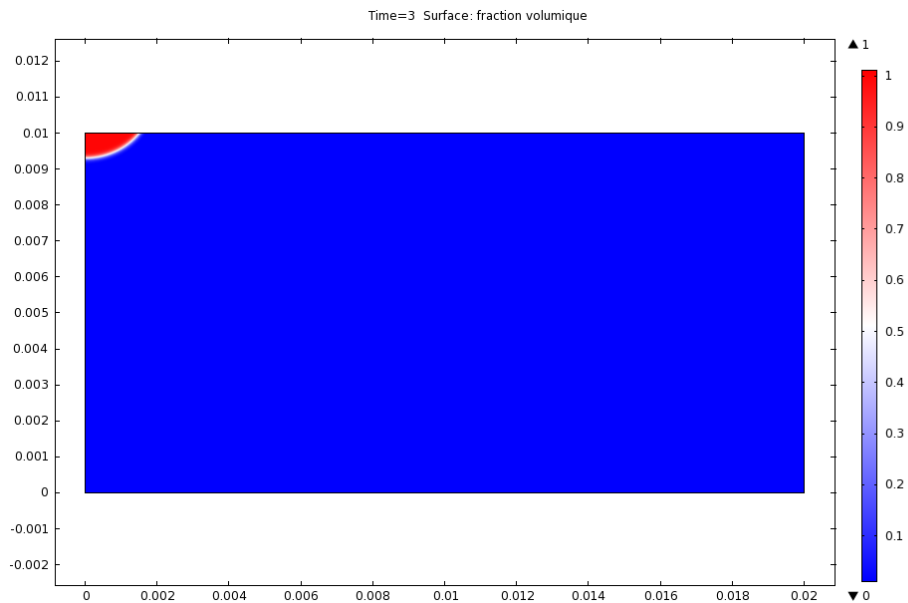


Figure 4 b: Fraction du liquide à $t=3s$

Les profils de la température radiale de la face supérieure de la tôle pour trois instants différents 1s, 2s et 3s sont montrés dans la figure 5. Les résultats obtenus montrent que l'ordre de grandeur est comparable avec celles trouvées dans la référence [1]. Donc, la température passe d'un pique au milieu du bain vers la température de la fusion à la limite de ce bain puis vers la température des frontières d'ordre 350 à 400K pour cet exemple d'application.

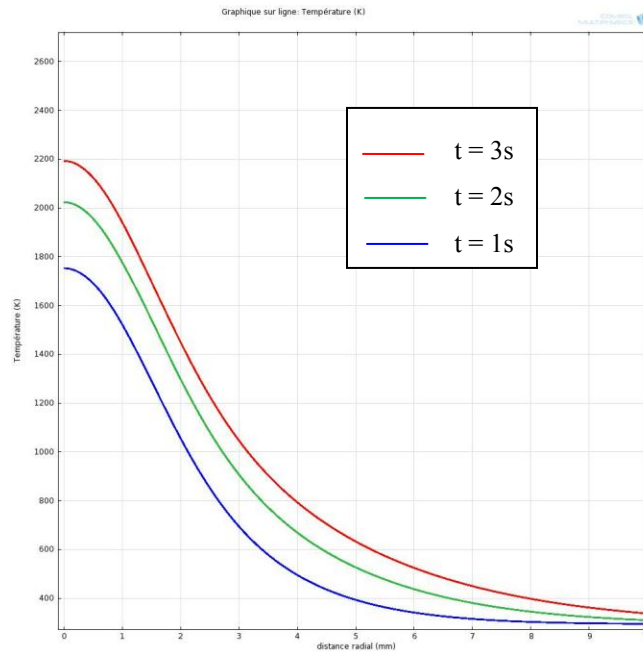


Figure 5 : Profils de température $T(r)$ pour $z=0.01$ m à trois instants : $t=1s$, $2s$ et $3s$.

4 Conclusion

Dans cette étude nous avons présenté un modèle 2D axisymétrique qui décrit le transfert thermique avec le suivi du changement de phases dans une opération de soudage TIG d'un acier inoxydable 304L sans métal d'apport. On a utilisé un calcul basé sur les éléments finis (Comsol®). Malgré les hypothèses simplificatrices de la modélisation du procédé du soudage, les résultats obtenus concernant le profil de température radiale $T(r)$ dans la face supérieure de la pièce pour trois instants 1s, 2s et 3s montrent un accord acceptable en comparant avec la littérature.

La comparaison de la fonction fraction du liquide g_l avec l'isotherme délimitant la zone fondue confirme que cette fonction g_l représente bien le changement de phase solide-liquide et elle positionne bien cette interface de changement.

Nous envisagerons dans nos perspectives de recherches de maitre au point une modélisation 3D thermique, puis thermohydraulique du soudage TIG, voir l'effet de la tension de surface sur la



morphologie du bain de fusion et aussi tenir compte de l'effet de la déformation de la surface libre de ce bain fondu.

5 Références

- [1] Makhlouf Hamide " Modélisation numérique du soudage à l'arc des aciers" Thèse de Doctorat. Ecole supérieure des mines de Paris, France juillet 2008.
- [2] Mills, K., and Keene, B. "Factor affecting variable weld penetration" International Materials Reviews, Vol.35, 185-216 1990.
- [3] Goldak, J., Chakravarti, A. and Bibby, M "A new finite element model for welding heat sources" Metallurgical and Materials Transactions B Vol. 15, N°2, 299-305 1984.
- [4] Médale, M., Jaeger, M "Modélisation par éléments finis d'écoulements à surface libre avec changement de phase solide-liquide" International Journal of Thermal Sciences Vol.38, 3267-276 1998.
- [5] Aissani, M., Maza, H., Belkessa, B., et Benkedda, Y "Modélisation numérique du soudage TIG des tôles d'aciers inoxydables et caractérisation mécanique et métallurgique" 17^{ème} Congrès Français de Mécanique, Troyes, France 2005.