

Modélisation thermique 3D du comportement du bain de fusion lors du soudage TIG -source de chaleur mobile-

Abdel Halim ZITOUNI^{1*}, Mouloud AISSANI¹, Younes BENKEDDA²

1: Centre de recherche scientifique en Soudage et Contrôle, CSC Route de Delly Ibrahim, BP 64, Chéraga, ALGER,

2 : Départ. Mécanique, Fac.Sci.Ing, Université de Blida, Route de soumaa Bp270
halim0580@yahoo.fr,y_benkedda@yahoo.fr,aiissani_mld@yahoo.fr

Résumé : Dans ce travail nous nous intéressons à la modélisation thermique à la simulation numérique du comportement du bain de fusion lors du soudage TIG (Tungstène Inert Gaz) des tôles d'acier inoxydable 304L. Nous décrivons un modèle mathématique de transfert du flux thermique créé par l'arc électrique du procédé sans métal d'apport. Ce modèle tient compte de l'effet du changement de phase et néglige dans une première approche les effets convectifs dus au mouvement du métal liquide dans le bain. Ce dernier est supposé ayant une surface libre plane. Une simulation numérique en 3D du soudage avec une source de chaleur mobile de forme Gaussien est menée par la méthode des éléments finis. Notre modèle est implanté dans le code du calcul Comsol@4.2.

Les résultats obtenus concernent les champs thermiques à différents instants décrivant la progression de la température et la fonction d'interface liquide/solide (fraction liquide). Les résultats obtenus sont en bonne adéquation avec la littérature.

Mots clés : Soudage TIG ; modélisation thermique ; bain de fusion.

1. 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. Delà, la connaissance approfondie de ces phénomènes est primordiale afin de pouvoir obtenir des cordons de soudure de bonne qualité et d'autre part, de faire une simulation numérique du soudage la plus proche de l'expérience qui reste jusqu'aujourd'hui un grand challenge.

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 s'intéresse à une étude thermique du soudage TIG à travers une simulation 3D où la surface libre du bain est supposée plane. La source de chaleur a une distribution Gaussienne qui se déplace avec une vitesse U . On présente dans la suite la modélisation du problème puis nos résultats numériques avec discussions.

2. MODELISATION 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 :

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

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

Où ρ , c sont la masse volumique et la chaleur spécifique massique respectivement. k est la conductivité thermique du matériau. g_l représente la fraction volumique du liquide au point considéré du domaine de calcul, L est la chaleur latente. T , T_f sont respectivement la température calculée et la température de fusion du matériau. ΔT est l'intervalle de solidification.

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 $e = 1.5\text{mm}$, d'une largeur de $l = 50\text{mm}$ et d'une longueur $L=100\text{mm}$ (Figure 1). L'apport d'énergie de l'arc électrique est modélisé par une source de chaleur ayant une distribution surfacique Gaussienne [2], qui se déplace avec une vitesse U selon l'axe Y . Ce flux de chaleur q est transmis à la pièce par la frontière supérieure (ABCD) du domaine. Les hypothèses de base sont récapitulées comme suit :

- Les effets convectifs dans le bain sont négligés.
- Le calcul est tridimensionnel et symétrique, (ABFE plan de symétrie).
- Les propriétés physiques du matériau sont considérées constantes.
- Le changement de phase est pris en considération.

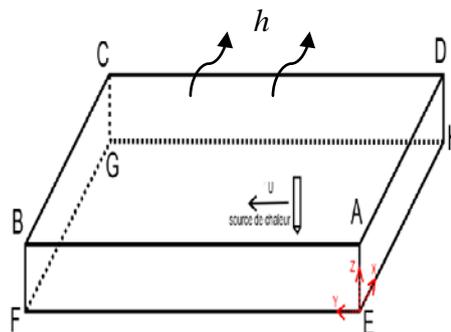


Figure 1 : Schéma descriptif du problème

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_0	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
coefficient d'échange convectif	h	15	$W/(m^2.K)$

2.3 Conditions aux limites (C.A.L)

$$ABCD: Q = \frac{3q_{max}}{\pi R_0^2} \cdot e \frac{-3(x^2 + (y+U(t-t_0))^2)}{R_0^2} - h(T - T_0)$$

$$ABFE: \vec{q} \cdot \vec{n} = 0$$

$$ADHE: Q = h(T - T_0) + \varepsilon\sigma(T^4 - T_0^4)$$

$$BCGF: Q = h(T - T_0) + \varepsilon\sigma(T^4 - T_0^4)$$

$$\text{CDHG} : Q = h(T - T_0) + \varepsilon\sigma(T^4 - T_0^4)$$

$$\text{EFGH} : Q = h(T - T_0) + \varepsilon\sigma(T^4 - T_0^4)$$

2.4 Maillage

On a utilisé dans nos calculs un maillage tétraédrique libre qui est constitué de 3452 éléments. Il est représenté par la figure 2. La région du bain liquide est maillée beaucoup plus finement que d'autres régions, en raison des forts gradients de température [3].

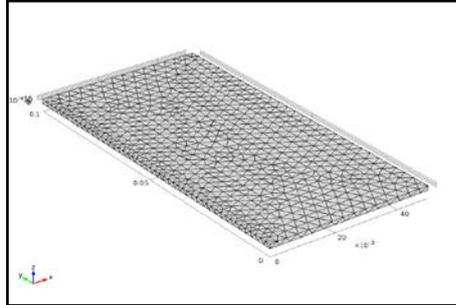


Figure 2 : Maillage opté du domaine de calcul.

3. Résultats et discussions

Le modèle du transfert thermique est utilisé pour déterminer la distribution du champ de température au cours du soudage TIG, suivre le déplacement de la source de chaleur ainsi que la fraction du liquide à différents instants.

La figure 3 illustre la distribution du champ de température calculée dans le bain de fusion et dans le métal de base pour quelques instants. À la dixième seconde, la température maximale au sommet (correspond au point A de la figure 1) atteint les 1772 K environ. Cette valeur est supérieure à la température de fusion de l'acier inoxydable qui est de 1714 K. La température continue son accroissement en fonction du temps pour atteindre une valeur d'ordre de 1875 K à la vingt-cinquième seconde. Cette valeur est largement supérieure à la température de fusion de l'acier, cela entraîne l'élargissement de la zone fondue. À partir de la quarantième seconde, les températures maximales ne varient pas beaucoup en fonction du temps, elles sont de l'ordre de 1900K, là où on peut dire que le régime quasi-stationnaire est atteint. Ces résultats révèlent un bon accord avec les travaux précédents [4].

Les isothermes et la fraction volumique de liquide (métal fondu) calculées aux instants 10s, 40s et 110s, sont comparées entre eux dans la figure 4. En comparant l'isotherme délimitant la zone fondue (ZF) avec l'interface obtenue par la fonction fraction volumique de liquide g_l (lorsque $g_l \geq 0.1$), on constate que cette fonction délimite bien l'interface solide-liquide de la zone fondue. La taille de cette zone augmente en fonction du temps pour avoir une forme plus au moins uniforme qui demeure stable à partir de la quarantième seconde. Pour la largeur de la ZF, délimitée par la température de la fusion (1714°k) et la température maximale du bain, est de l'ordre de 3.7 mm, cette valeur est proche de celle trouvée dans la référence [4].

Les cycles thermiques évalués à différentes positions selon l'axe Y sur la face supérieure ABCD ($x=5\text{mm}$ et $z=1.5\text{mm}$), sont représentés dans la figure 5. Ils présentent des formes tout à fait classiques avec une augmentation brusque de température puis un refroidissement rapide qui tend à devenir de plus en plus lent au cours du temps. L'augmentation brusque de la température est due au passage de la source de chaleur au voisinage de ces positions, le refroidissement devient plus en plus lent au cours du temps à cause de l'éloignement de la source de ces positions. La température maximale en $y=0$ mm égale à 1120°K environ, cette valeur augmente en fonction de y jusqu'à atteindre une valeur de 1220°K en $y=20$ mm, à partir de $y=20\text{mm}$ la température maximale devient presque constante en fonction de y .

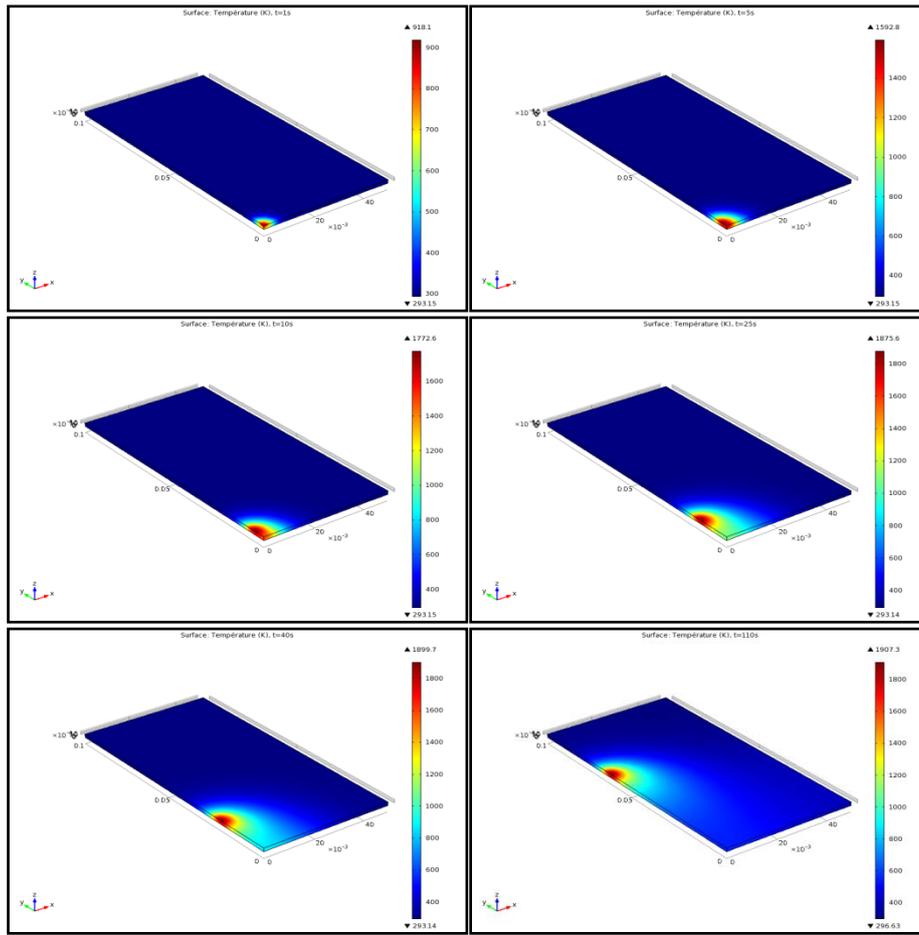
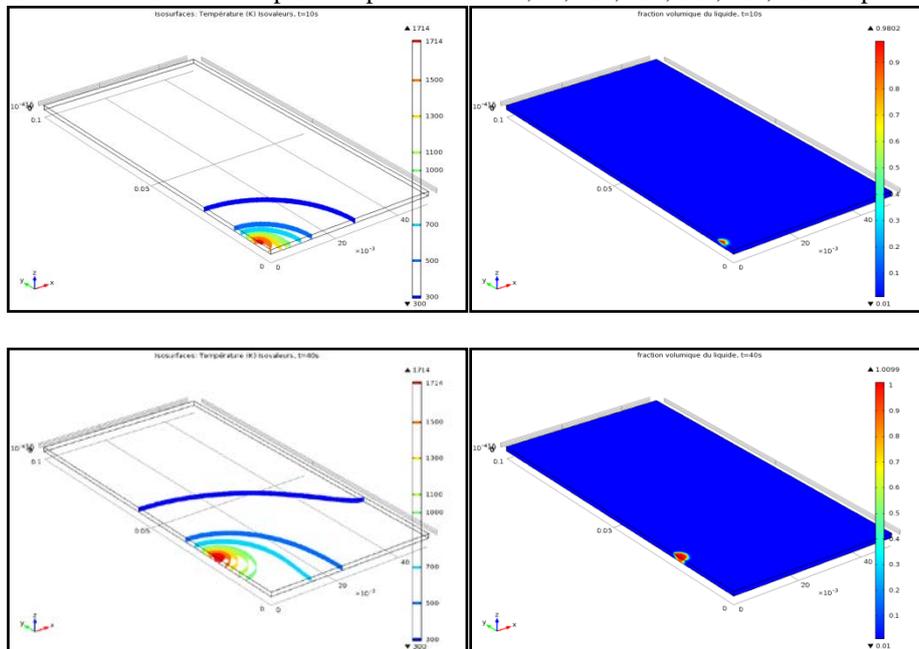


Figure 3 : Distribution de champ de température à $t=1s, 5s, 10s, 25s, 30s, 40s, 110s$ respectivement.



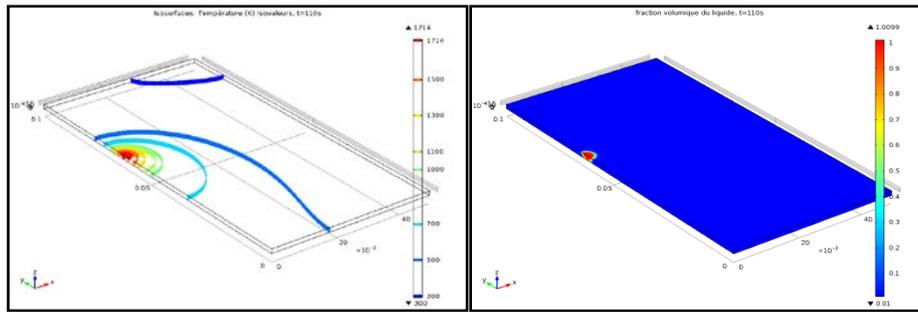


Figure 4 : Comparaison entre l'isotherme délimitant la zone fondue et la fraction du liquide g_l à $t=10s, 40s, 110s$.

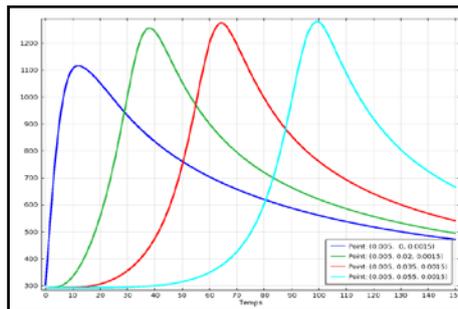


Figure 5 : cycles thermiques évalués à différentes positions selon l'axe Y (et $x=5mm$ et $z=1.5mm$)

4. Conclusion

Dans cette étude nous avons présenté un modèle 3D qui décrit le transfert thermique avec le suivi du changement de phase dans une opération de soudage TIG d'un acier inoxydable 304L sans métal d'apport. On a utilisé un calcul basé sur la méthode des éléments finis. Malgré les hypothèses simplificatrices de la modélisation du procédé du soudage, les résultats obtenus concernant le profil de température dans la face supérieure de la pièce en fonction du temps 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.

En perspectives, nous envisagerons de mettre au point une modélisation 3D thermo hydraulique du soudage TIG, avec des hypothèses plus proche de la réalité, afin de voir l'effet de la tension de surface (effet de *MARANGONI*) sur la morphologie du bain de fusion et puis tenir compte de la déformation de la surface libre de ce bain fondu.

5. Nomenclature

Symbole	Nom, unité	Symboles grecs
K	conductivité thermique, W/m.K	ρ masse volumique, Kg/m ³
T	température, K	
c	chaleur spécifique massique, J/(kg.K)	Exposant, Indices
L	chaleur latente, kJ/kg	l liquide
g	fraction volumique de liquide	f fusion
h	coefficient d'échange convectif, W/(m ² K)	

6. Références

- [1] K.Mills and B. Keene, Factor affecting variable weld penetration, International Materials Reviews, Vol.35, 185-216, 1990.
- [2] J.Goldak and A. Chakravarti, and M.Bibby, A new finite element model for welding heat sources, Metallurgical and Materials Transactions B, Vol. 15, N°2, 299-305, 1984.
- [3] 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, 3267-276, 1998.
- [4] M.Aissani et H.Maza et B.Belkessa et Y.Benkedda, Modélisation numérique du soudage TIG des tôles d'aciers inoxydables et caractérisation mécanique et métallurgique, 17^{ème} Congrès Français de Mécanique, Troyes, France 2005.