

Influence des principaux paramètres opératoires du procédé de soudage à l'arc TIG sur la géométrie du bain de fusion.

Minh Chien NGUYEN^{1,3}, Olivier ASSERIN^{1,*}, Stéphane GOUNAND¹, Philippe GILLES², Marc MEDALE³

¹ CEA Saclay, DEN, DANS, DM2S, F-91191, Gif-sur-Yvette.

² AREVA NP, F-92084, Paris La Défense.

³ Polytech'Marseille, IUSTI, UMR 7343 CNRS-Université Aix-Marseille, F-13453, Marseille.

* olivier.asserin@cea.fr

Résumé - Les écoulements dans le bain de fusion jouent un rôle important sur la qualité de la soudure et la forme du cordon. Ces écoulements sont influencés par plusieurs paramètres du procédé, tels que la position du soudage, la vitesse d'avance ou la composition chimique du matériau. Nous avons développé un modèle numérique thermo-hydrodynamique qui décrit l'écoulement au sein du bain de fusion et les transferts de chaleur, afin de pouvoir prédire la géométrie du cordon de soudure en soudage à l'arc TIG. La capacité du modèle à reproduire les principaux phénomènes du procédé, ainsi que leur incidence sur la géométrie du bain de fusion, est présentée et discutée.

Nomenclature

ρ	masse volumique, $kg.m^{-3}$	F_s	fraction solide
μ	viscosité dynamique, $kg.m^{-1}.s^{-1}$	ϵ	émissivité de la surface
h	enthalpie massique, $J.kg^{-1}$	λ_V	multiplicateur de Lagrange, $N.m^{-2}$
λ	conductivité thermique, $W.m^{-1}.K^{-1}$	\mathbf{v}_s	vitesse du soudage, $m.s^{-1}$
β	coefficient d'expansion volumique, K^{-1}	\mathbf{f}_{Bou}	force de flottabilité, $N.m^{-2}$
γ	tension de surface, $N.m^{-1}$	\mathbf{f}_{Ext}	force d'extinction de vitesse, $N.m^{-2}$
p	pression dans la phase fluide, $N.m^{-2}$	\mathbf{f}_{Arc}	force exercée par l'arc, $N.m^{-2}$
g	gravité, $m.s^{-2}$		

1. Introduction

Le soudage à l'arc par procédé TIG (Tungsten Inert Gas) est l'un des procédés les plus utilisés dans l'industrie, en raison de la haute qualité qu'il permet d'obtenir, associée à une bonne productivité. Ce procédé de soudage par fusion peut être caractérisé par la présence simultanée de solides, liquides et plasma d'arc, avec de très intenses interactions entre ces phases. Une modélisation multiphysique du procédé de soudage à l'arc TIG sans apport de matière a été précédemment développée en 2D axi-symétrique [2], sans déformation de la surface du bain fondu. La prise en compte de sa déformation, ainsi que le défilement sous la source de chaleur qui engendre la tridimensionnalité du problème, ont ensuite été introduits [4]. La déformation de l'interface liquide-gaz dépend de la pression d'arc [14, 15] et de la position du soudage [16, 17], ce qui détermine la forme et la qualité du cordon de soudure. De plus, la convection dans le bain de fusion dépend principalement de la vitesse de soudage [15] et des propriétés matérielles des pièces à assembler [11, 18], ce qui peut modifier le sens de l'écoulement, par effet Marangoni. C'est la raison pour laquelle une connaissance approfondie de l'écoulement dans le bain de fusion est primordiale pour pouvoir évaluer la soudabilité et simuler de manière prédictive à partir des conditions opératoires du soudage telles que la vitesse du soudage, l'intensité et la

position du soudage, et de la composition chimique de la nuance à souder qui agit sur la tension de surface.

Nous présentons dans cette communication les résultats numériques que nous avons obtenus en étudiant l'influence des conditions opératoires du soudage sur la forme de bain fondu et la température maximale atteinte, pour plusieurs configurations de soudage TIG sans apport de matière et en particulier, les principales dimensions du bain de fusion que sont la longueur, la largeur, la section fondue dans le cas 2D et le volume fondu dans le cas 3D.

2. Modèle mathématique

2.1. Principales hypothèses

Dans le présent travail, l'arc électrique est modélisé par un flux de chaleur appliqué à la surface libre située sous la source, ainsi qu'une pression d'arc. Ces deux distributions sont supposées de forme gaussienne. Le problème se réduit ainsi à l'assemblage, pour lequel on cherche la solution stationnaire issue de la résolution des équations de conservation de la masse, de la quantité de mouvement et de l'énergie dans la phase fluide et uniquement de l'équation de l'énergie dans la phase solide. Le métal liquide est considéré comme un fluide Newtonien. On suppose que l'écoulement est laminaire et que l'hypothèse de Boussinesq reste valide. Enfin, la vitesse de soudage v_s est supposée constante.

2.2. Équations de conservation

Le problème est défini dans un système de coordonnées lié à la source de chaleur. Par conséquent, l'écoulement du métal liquide dans le bain de fusion, ainsi que les transferts de chaleur peuvent être modélisés par les équations de Navier-Stokes (éq. 1- 2) et l'équation de l'énergie (éq. 3) [3].

Équation de conservation de la masse :

$$\nabla \cdot \mathbf{v} = 0 \quad (1)$$

Équation de la conservation de la quantité de mouvement :

$$\rho(\nabla \mathbf{v}) \cdot (\mathbf{v} - \mathbf{v}_s) = -\nabla p + \nabla \cdot \mu(\nabla \mathbf{v} + \nabla^t \mathbf{v}) + \mathbf{f}_{\text{Bou}} + \mathbf{f}_{\text{Ext}} \quad (2)$$

Le terme \mathbf{f}_{Bou} est la force de flottabilité produite par les différences de densité induites par les variations de température : $\mathbf{f}_{\text{Bou}} = -\rho_{\text{réf}} \mathbf{g} \beta (T - T_{\text{réf}})$.

Le terme \mathbf{f}_{Ext} est la force d'extinction de vitesse dans la zone pâteuse, donnée par l'équation de Carman-Kozeny [7], A est une constante élevée (choix $A = 10^{12}$) et F_s est la fraction solide : $\mathbf{f}_{\text{Ext}} = -AF_s(T)\mathbf{v}$.

Équation de la conservation de l'énergie :

$$\rho(\nabla h) \cdot (\mathbf{v} - \mathbf{v}_s) = \nabla \cdot \lambda \nabla T \quad (3)$$

Calcul de la déformation de la surface libre :

À l'état d'équilibre, la surface du bain de fusion peut être déterminée en utilisant un principe de minimisation de l'énergie [8]. L'énergie totale à minimiser se compose de l'énergie de surface, de l'énergie potentielle de gravité et enfin de la pression de l'arc à laquelle est soumise la surface libre du bain de fusion située sous l'électrode. Le bilan des forces sur la surface libre pour une configuration de soudage à plat peut s'écrire sous la forme (éq. 4) :

$$\left(-p + \mu(\nabla \mathbf{v} + \nabla^t \mathbf{v}) \right) \cdot \mathbf{n} + \rho g z \cdot \mathbf{n} = \frac{\gamma(T)}{R_1(z) + R_2(z)} \cdot \mathbf{n} + \mathbf{f}_{\text{Arc}} + \lambda_V \cdot \mathbf{n} \quad (4)$$

$R_1(z)$, $R_2(z)$ sont les rayons de courbure principaux, \mathbf{f}_{Arc} est la force exercée par l'arc sur le bain qui est supposée suivre une distribution gaussienne [10] et λ_V est le multiplicateur de Lagrange lié à la contrainte de conservation du volume de la pièce soudée.

2.3. Conditions aux limites

Sur la surface libre : vitesse normale nulle et contrainte de cisaillement Marangoni (éq. 5) :

$$\begin{cases} \mathbf{v} \cdot \mathbf{n} = 0 \\ \left(\mu(\nabla \mathbf{v} + \nabla^t \mathbf{v}) \cdot \mathbf{n} \right) \cdot \mathbf{t}_1 = \frac{\partial \gamma}{\partial T} \nabla_s T \cdot \mathbf{t}_1 \\ \left(\mu(\nabla \mathbf{v} + \nabla^t \mathbf{v}) \cdot \mathbf{n} \right) \cdot \mathbf{t}_2 = \frac{\partial \gamma}{\partial T} \nabla_s T \cdot \mathbf{t}_2 \end{cases} \quad (5)$$

où le gradient de tension de surface $\frac{\partial \gamma}{\partial T}$ influence énormément la forme du bain de fusion et dépend de la température et de la teneur en soufre comme le montre la figure 1, proposée par Sahoo [11]. \mathbf{n} , \mathbf{t}_1 et \mathbf{t}_2 sont respectivement le vecteur normal et deux vecteurs tangentiels de la surface. Pour le soudage à plat, on fixe les bords de la surface libre : $y = 0$ en 2D ou $z = 0$ en 3D.

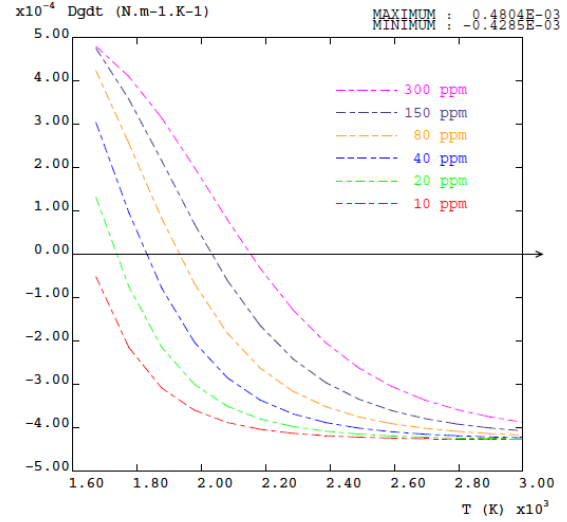


Figure 1 Valeur de $\frac{\partial \gamma}{\partial T}$ en fonction de T pour quelques valeurs de concentration en soufre [11].

Conditions aux limites pour l'énergie : l'enthalpie massique h et le flux thermique diffusif sont imposés sur les faces du domaine de calcul avec pour hypothèse que la source de chaleur est suffisamment loin de la face "sortie" (éq. 6) :

$$\begin{cases} h = h_0 & \text{sur la face "entrée"} \\ \lambda \nabla T \cdot \mathbf{n} = 0 & \text{sur la face "sortie"} \\ -\lambda \nabla T \cdot \mathbf{n} = s_{\text{Ray}} + s_{\text{Cvs}} + s_{\text{Sur}} & \text{sur les autres faces} \end{cases} \quad (6)$$

Avec les pertes par rayonnement : $s_{\text{Ray}} = -\epsilon \sigma (T^4 - T_\infty^4)$, les pertes par échange convectif en surface : $s_{\text{Cvs}} = -h_{\text{conv}}(T - T_\infty)$ et s_{Sur} est la source de chaleur en surface.

3. Résultats numériques et discussions

Les simulations ont été réalisées avec le code de calcul par éléments finis Cast3M [1] développé au CEA, d'abord en 2D pour étudier l'influence des paramètres opératoires tels que la teneur en soufre, la vitesse de l'opération de soudage et la pression d'arc sur les écoulements dans le bain liquide. Ensuite, nous montrons les résultats du modèle 3D en position de soudage à plat, qui mettent en évidence l'effet de la vitesse sur la forme du bain. Les propriétés thermophysiques sont tirées de travaux de Brochard [2], Kim [13] et Sahoo [11].

3.1. Simulations en deux dimensions

Une source de chaleur gaussienne est appliquée à la surface de la pièce pour modéliser le transfert de chaleur induit par l'arc, avec un rayon de 5 mm et un rendement fixé à 0,68 [9]

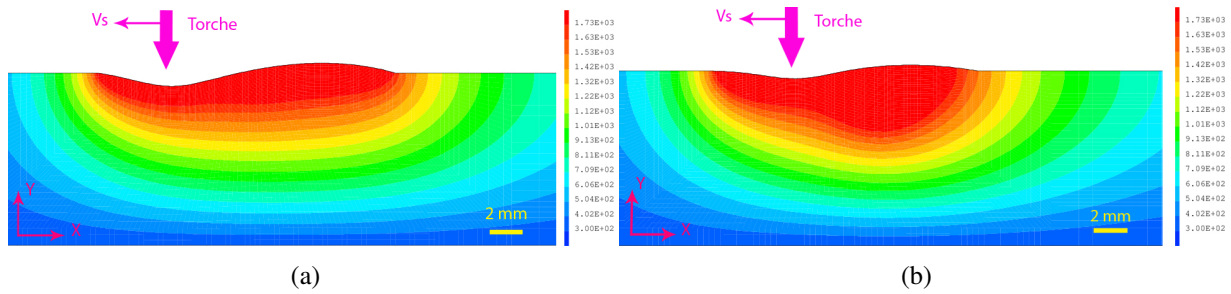


Figure 2 Champs de température calculés pour 10 ppm (a) et 300 ppm (b) de soufre.

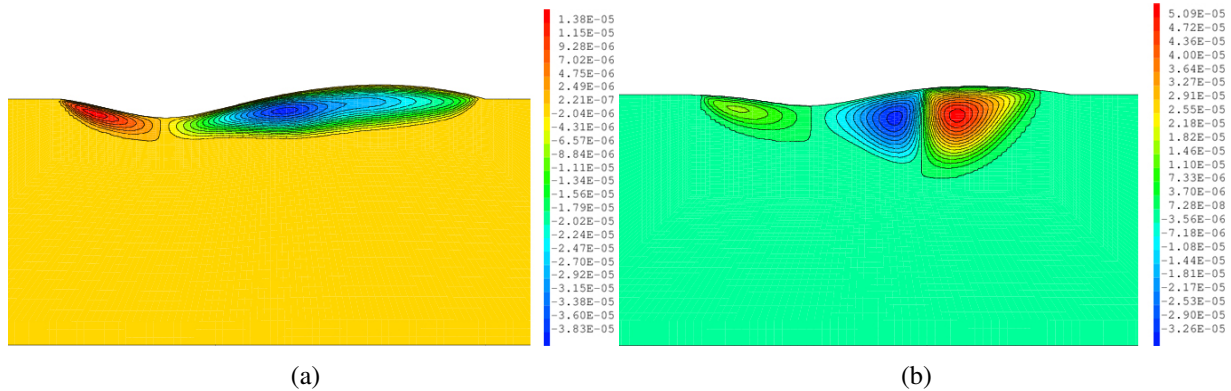


Figure 3 Simulations des écoulements dans le bain liquide pour une vitesse de 5 cm/min et pour des teneurs en soufre de 10 ppm (a) et de 300 ppm (b).

la puissance transférée à la pièce est de 1224 W. Le maillage comporte 12000 éléments finis quadratiques.

3.1.1. Effet de la teneur en soufre

La figure 2 montre les champs de température obtenus pour deux teneurs en soufre (10 et 300 ppm) et les mêmes vitesses de soudage (5 cm/min) et pression d'arc (100 Pa) (configurations a et d du tableau 1), pour lesquels on observe que l'augmentation de la quantité en soufre conduit à une augmentation de la pénétration et une diminution de la longueur du bain. La figure 3 montre les isovaleurs de l'intensité de l'écoulement dans le bain de fusion. À bas soufre, deux vortex d'écoulement opposés sont présents et étalent le bain liquide dans sa longueur entraînant une augmentation de la longueur du bain. À haut soufre, le sens des écoulements est inversé et le bain se creuse entraînant une augmentation de sa pénétration. Ces résultats confirment les tendances obtenues par [6] pour des calculs 3D (teneurs de 70 à 260 ppm et vitesse de 15 cm/min, sans déformation de la surface libre). Il avait de plus été montré [5] que la prise en compte de la surface libre permettait une estimation plus réaliste du bain. Le tableau 1 résume les configurations étudiées et quelques valeurs caractéristiques du bain fondu. Une augmentation de la teneur en soufre de 10 à 300 ppm conduit à une augmentation de la pénétration, de la température maximale, de l'aire du bain fondu et une diminution de la longueur du bain et de la vitesse maximale de l'écoulement, pour les deux vitesses de soudage considérées, cf. figure 4.

N°	[S]	Vitesse cm/min	Pression d'Arc Pa	Température maximale K	Longueur mm	Pénétration mm	Aire du bain mm ²
a	10	5	100	2436	17.38	1.94	26.64
b	10	5	200	2450	17.01	2.38	27.79
c	10	15	100	2337	12.23	1.24	12.17
d	300	5	100	2629	13.96	3.49	33.03
e	300	5	200	2621	14.19	3.50	34.32
f	300	15	100	2535	10.34	2.13	15.07

Tableau 1 Résultats numériques obtenus avec les différents paramètres 2D pour le soudage à plat.

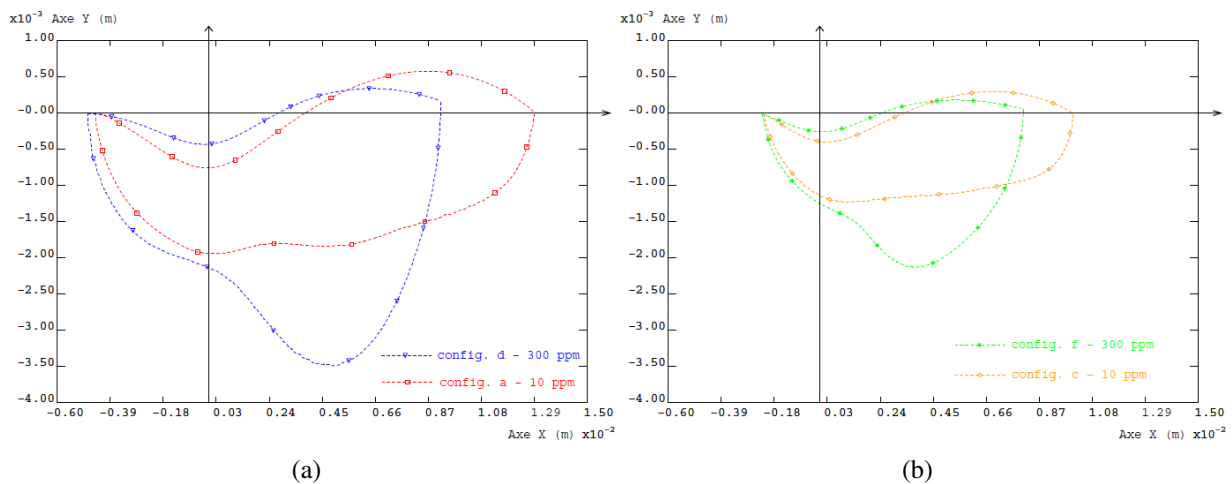


Figure 4 Forme du bain fondu en fonction de la teneur en soufre, pour deux vitesses de soudage : 5 cm/min (a) et 15 cm/min (b).

3.1.2. Effet de la pression d'arc

La figure 5 montre que la pression d'arc a peu d'influence sur la forme de l'écoulement et la pénétration contrairement à la teneur en soufre. En effet, à bas soufre l'influence de la pression d'arc sur la pénétration est sensible, tandis qu'à haut soufre la pression d'arc n'influe plus sur la pénétration lorsque le bain se creuse déjà sous l'effet de l'écoulement centripète.

3.1.3. Effet de la vitesse

Les caractéristiques calculées du bain fondu dans le tableau 1 associées à l'évolution de la forme du bain en fonction de la vitesse de soudage (figure 6), permettent de conclure que celle-ci influence fortement la géométrie du bain. Une augmentation de la vitesse du soudage provoque la diminution de la température maximale, de la vitesse maximale des écoulements, de la longueur et de la pénétration du bain de fusion et ce quelle que soit la teneur en soufre. En passant de 5 à 15 cm/min, l'aire du bain est diminuée d'un facteur supérieur à deux.

3.2. Simulation du soudage 3D à plat

Deux simulations 3D ont été réalisées pour deux vitesses de soudage (7 et 14 cm/min), en configuration de soudage à plat (figure 7).

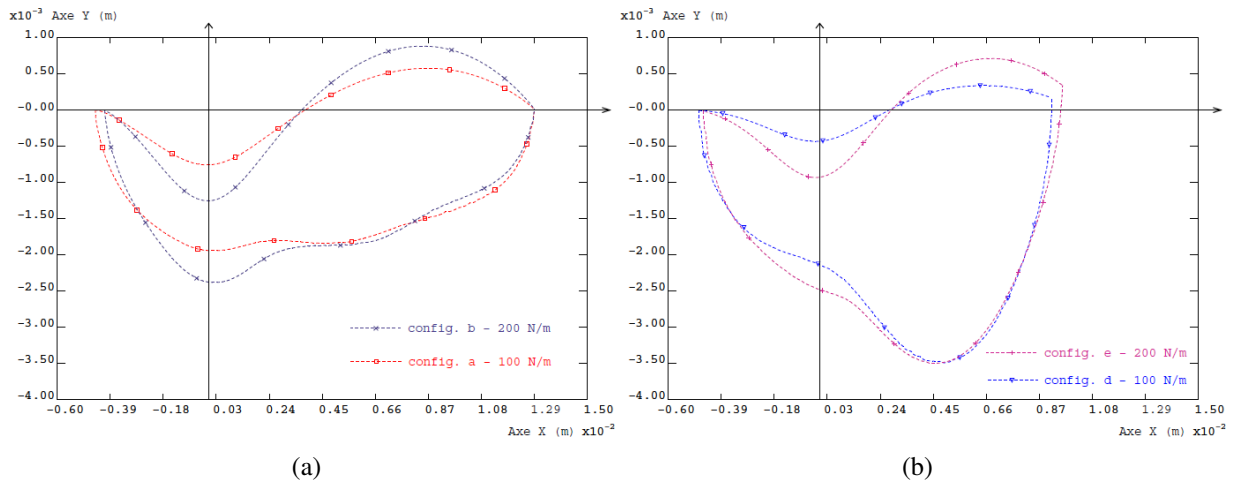


Figure 5 Forme du bain en fonction de pression d'arc pour des teneurs en soufre de 10 ppm (a) et de 300 ppm (b).

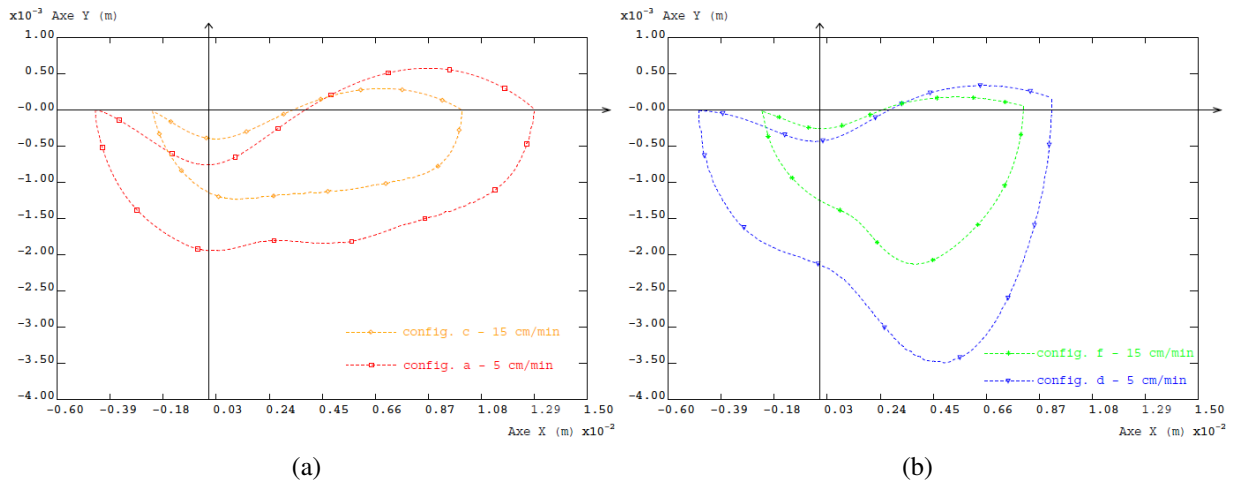


Figure 6 Forme du bain en fonction de la vitesse de soudage pour des teneurs en soufre de 10 ppm (a) et 300 ppm (b).

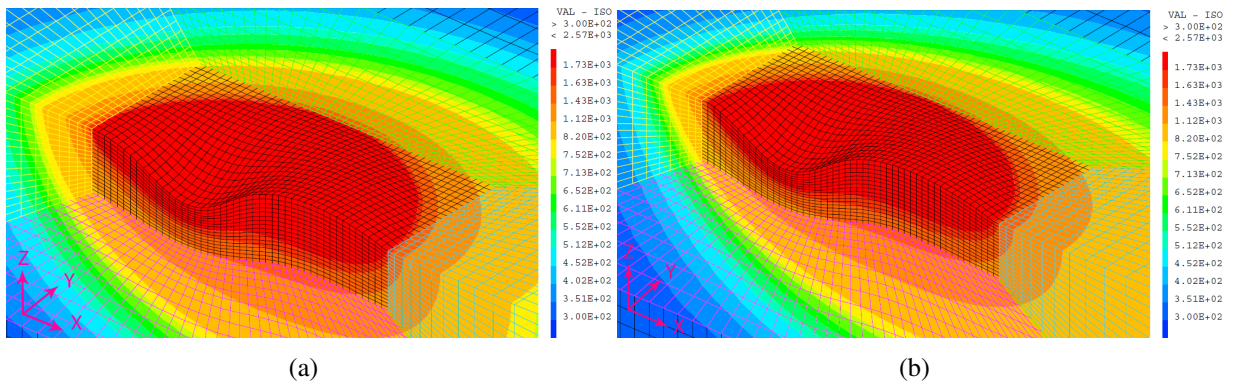


Figure 7 Forme du bain en fonction de la vitesse de soudage pour une teneur en soufre de 10 ppm vitesse de 7 cm/min (a) et de 14 cm/min (b).

N°	[S]	Vitesse	Pression d'Arc	Température maximale	Longueur	Largeur	Pénétration	Volume fondu
	ppm	cm/min	Pa	K	mm	mm	mm	mm ³
g	10	7	217	2573	12.10	5.29	2.01	52.75
h	10	14	217	2569	11.73	4.57	1.87	38.4

Tableau 2 Résultats des simulations 3D obtenus pour différents paramètres 3D.

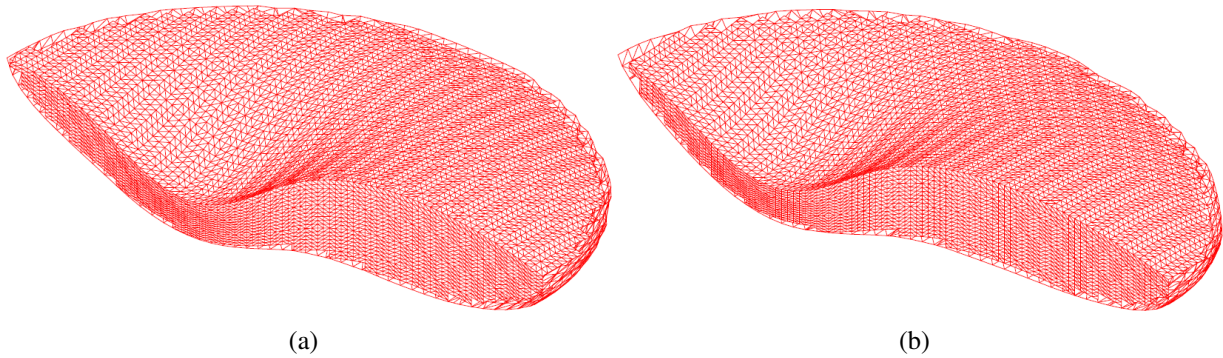


Figure 8 Forme du bain en fonction de la vitesse de soudage pour une teneur en soufre de 10 ppm vitesse de 7 cm/min (a) et de 14 cm/min (b).

On peut observer sur la figure 8 une légère diminution du volume fondu, induite par la diminution de la largeur et de la longueur du bain (figure 9), mais de manière moins marquée que dans les simulations 2D. En effet, si l'on estime à partir des résultats présentés dans les tables 1 et 2 les taux de variations de la longueur et de la pénétration pour un doublement de la vitesse, on trouve pour le cas 2D une diminution de 21% et 18%, respectivement, tandis que pour le cas 3D, elle n'est que de 3% et 7%, respectivement. Ainsi, entre les simulations 2D et 3D si les tendances sont identiques (diminution du volume fondu), les ordres de grandeurs sont différents, le modèle 2D conduit à une surestimation. Pour évaluer la validité du modèle 3D nous le comparons à des travaux réalisés avec le même matériau et des conditions opératoires de soudage proches [6, 12]. Les auteurs ont étudié l'effet de la vitesse, l'un est passé de 15 cm/min à 30 cm/min et a observé une réduction de la largeur du bain fondu de 15%, l'autre est passé d'une vitesse de 10 cm/min à 20 cm/min et a observé une diminution de 5% seulement, alors que nous observons une diminution de 13% en passant de 7 cm/min à 14 cm/min.

4. Conclusions

Les caractéristiques géométriques du bain fondu ont été étudiées en fonction de différentes conditions opératoires de soudage par des simulations numériques 2D et 3D pour le soudage à l'arc TIG avec le code de calcul par éléments finis Cast3M. La modélisation concerne principalement les écoulements dans le bain et l'arc est modélisé sous la forme d'une source de chaleur apparente. Les observables considérées sont la température maximale, la pénétration et la largeur du bain liquide qui sont d'intérêt pour le soudeur. Les paramètres opératoires sont la pression d'arc, la vitesse de soudage et la teneur en soufre (élément tensio-actif). Les résultats obtenus montrent que la pression d'arc a peu d'effet sur les caractéristiques dimensionnelles du bain de soudage, comparée à la vitesse de soudage et à la teneur en soufre. Il a aussi été montré que les simulations numériques 2D longitudinales surestimaient les effets des paramètres opératoires par rapport aux simulations 3D. La suite de ce travail consistera à

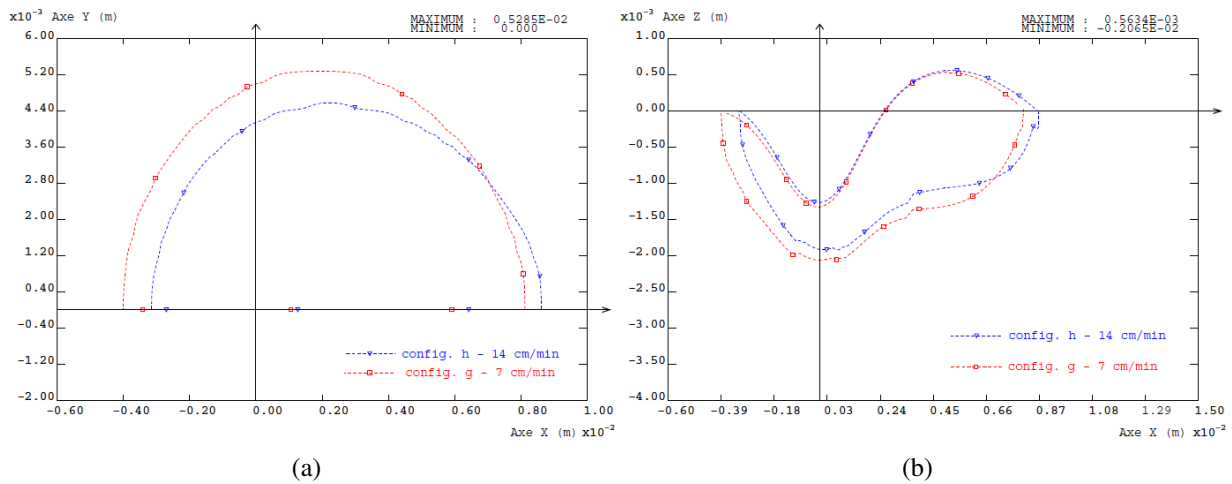


Figure 9 Forme du bain en fonction de la vitesse de soudage pour une teneur en soufre de 10 ppm vitesse de 7 cm/min et de 14 cm/min, vue du dessus (a) et coupe longitudinale (b).

ajouter au modèle présenté les forces de Lorentz et à vérifier sa capacité à rendre compte de l'influence de la position de soudage (à plat, en corniche, en verticale montante ou descendante et au plafond).

Références

- [1] Cast3M, <http://www-cast3m.cea.fr/>.
- [2] M. Brochard, Modèle couplé cathode-plasma-pièce en vue de la simulation du procédé de soudage à l'arc TIG, *PhD thesis Aix Marseille - CEA*, 2009.
- [3] S. Gounand, Développements multiphysiques dans Cast3M pour la simulation numérique du soudage, *Rapport DM2S/SFME/LTMF RT/09-018/A*, CEA, 2009.
- [4] X. Kong, Modélisation 3D d'écoulements avec surface libre pour le soudage à l'arc TIG, *PhD thesis ENISE - CEA*, 2012.
- [5] X. Kong, *Materials Science and Engineering*, 33, 2012.
- [6] K. Koudadge, 21ème Congrès Français de Mécanique, 2013, <http://hdl.handle.net/2042/52864>.
- [7] A. D. Brent, V. R. Voller, K. t. J. Reid, *Numerical Heat Transfer, Part A Applications*, vol 13, num 3, p297-318, 1988.
- [8] C. S. Wu, J. Chen, Y. M. Zhang, *Computational Materials Science*, vol 39, num 3, p635-642, 2007.
- [9] A. Traidia, Multiphysics modelling and numerical simulation of GTA weld pools, *PhD thesis Ecole Polytechnique*, 2011.
- [10] M. L. Lin, T.W. Eagar, *Metallurgical Transaction B*, vol 17B, p601-607, 1986.
- [11] P. Sahoo, T. DebRoy, M. J. McNallan, *Metallurgical Transactions B*, vol 19, num 3, p483-491, 1988.
- [12] S. Mishra, T. J. Lienert, M. Q. Johnson, T. Debroy, *Acta Materialia*, 56, p2133-2146, 2008.
- [13] W. H. Kim, H. G. Fan, S. J. Na, *Numerical Heat Transfer, Part A Applications*, vol 32, num 6, p633-652, 1997.
- [14] M. L. Lin, T. W. Eagar, *Welding Journal*, vol 64, num 6, p163-169, 1985.
- [15] D. Gery, H. Long, P. Maropoulos, *Journal of Materials Processing Technology*, vol 167, num 2, p393-401, 2005.
- [16] A. Kumar, T. DebRoy, *Metallurgical and Materials Transactions A*, vol 38, num 3, p506-519, 2007.
- [17] H. X. Wang, Y. HH. Wei, C. L. Yang, *Computational Materials Science*, vol 38, num 4, p571-587, 2007.
- [18] T. DebRoy, S. A. David, *Reviews of Modern Physics*, vol 67, num 1, p85-112, 1995.