

Modélisation numérique du soudage hybride laser-MIG des aciers inoxydables en fortes épaisseurs

Iryna TOMASHCHUK^{1*}, Issam BENDAOU¹, Eugen CICALA¹, Simone MATTEI¹, Henri ANDRZEJEWSKI¹, Pierre SALLAMAND¹, Alexandre MATHIEU¹, Frédéric BOUCHAUD²

¹Laboratoire Interdisciplinaire Carnot de Bourgogne, UMR 6303 CNRS / Université de Bourgogne IUT Le Creusot - 12, rue de la Fonderie – 71200 Le Creusot

²Centre de Recherche des Matériaux du Creusot, Arcelor Mittal France/Industeel, 56 rue Clémenceau-71200 le Creusot

* (auteur correspondant : iryna.tomashchuk@u-bourgogne.fr)

Résumé - Le présent article décrit deux méthodes numériques employées pour simuler le champ thermique créé dans les pièces à souder lors d'une opération de soudage hybride où l'arc de la torche MIG et le faisceau laser Yb:YAG sont séparés et forment deux zones fondues. L'approche par sources équivalentes permet d'établir le champ thermique dans la partie solide de la pièce sans qu'il y ait besoin de décrire la phénoménologie existante dans le bain fondu, qui n'est, à ce jour pas encore totalement maîtrisée dans le cas du soudage hybride. L'approche phénoménologique, ou multiphysique, consiste à représenter un ensemble des phénomènes entrant en jeu lors de l'action simultanée du laser, de l'arc électrique et des gouttes de métal liquide provenant de la torche. Les modèles ont été validés grâce à la comparaison des formes des zones fondues obtenues par coupes métallographiques et calculées ainsi que par la comparaison des températures calculées et mesurées.

Nomenclature

a	facteur d'absorption	T	température, K
C_p	capacité thermique, $J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$	U	tension électrique, V
I	intensité de courant, A	\bar{u}	champ des vitesses, $m \cdot s^{-1}$
k	conductivité thermique, $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$	γ_M	coefficient de la tension superficielle en fonction de la température, $N \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$
L_f	chaleur latente de fusion, $J \cdot kg^{-1}$	μ	viscosité absolue, $Pa \cdot s$
P	puissance d'une source de chaleur, W	ρ	masse volumique, $kg \cdot m^{-3}$
r	rayon d'une source de chaleur, m		

1. Introduction

Le procédé de soudage hybride laser/MIG est une méthode d'assemblage récemment utilisée dans l'industrie dans le but d'améliorer la qualité des assemblages et la productivité. L'objectif de cette association est de bénéficier à la fois de la tolérance du procédé MIG quant au jeu d'accostage entre les tôles, et de la productivité du laser comme la possibilité de souder à grande vitesse de fortes épaisseurs [1]. La compréhension des phénomènes physiques, nombreux et couplés, intervenant lors de ce procédé, peut permettre de mettre en place un outil prédictif de simulation du soudage, à partir de la connaissance des matériaux à assembler et des paramètres opératoires, ce qui éviterait la réalisation d'essais répétitifs très onéreux. Deux approches sont possibles pour simuler les effets de l'apport d'énergie de soudage : la première nécessite la résolution d'un problème de conduction non linéaire dans les pièces à assembler en utilisant un concept de « source de chaleur équivalente ». La mise en œuvre de cette approche est relativement simple, elle demande des temps de calcul réduits et permet de quantifier la distribution d'énergie apportée par les sources laser et MIG dans la partie solide de la pièce en dehors de la zone fondue [2, 3]. La deuxième approche consiste à résoudre un

problème prenant en compte les phénomènes physiques pour simuler au mieux les interactions entre le procédé et la matière [4, 5, 6]. Cependant, une modélisation multiphysique prédictive prenant en compte la totalité des phénomènes demeure encore difficile à ce jour.

Ces deux approches sont ici employées pour simuler le champ thermique créé dans les pièces à souder lors d'une opération de soudage hybride où l'arc et le faisceau laser Yb :YAG sont séparés et forment deux zones fondues. Les deux modèles sont implémentés dans le logiciel FEM Comsol Multiphysics®. Les résultats des simulations ont été comparés à des mesures de températures obtenues par thermocouples et aux caractéristiques géométriques de la zone fondue déterminées sur plusieurs coupes.

2. Configuration de soudage et mesures

2.1. Configuration de soudage

La configuration de soudage étudiée est présentée sur la Figure 1-a. Il s'agit de souder en une seule passe avec le procédé hybride laser Yb :YAG/MIG des pièces en acier inoxydable superduplex UR2507Cu dans une configuration de chanfrein en « Y » (Figure 1-a). Dans cette configuration, le faisceau laser, focalisé à 3 mm sous le fond de chanfrein, est placé devant l'arc (Figure 1-b). Les paramètres opératoires sont donnés dans le Tableau 1.

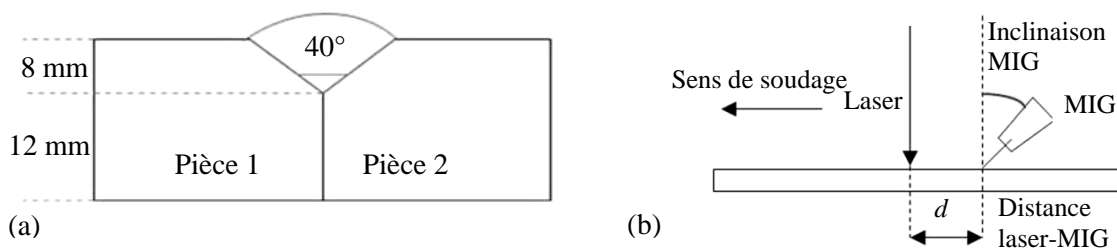


Figure 1 : Configuration de soudage (a), disposition du laser et du MIG (b)

2.2. Réalisation des mesures

L'essai instrumenté par thermocouples a pour but d'obtenir les cycles thermiques en différents emplacements autour de la zone fondue (ZF). Dix thermocouples de type K ont été insérés au fond de trous percés par électroérosion de 0,5 mm de diamètre, sur une profondeur de 50 mm (Figure 2), et ont été fixés grâce à une pâte thermique argentée.

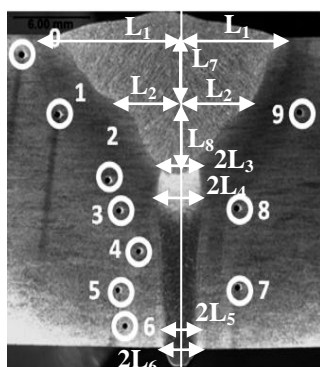


Figure 2 : Disposition des thermocouples et les mesures prises sur les macros

Les mesures des largeurs caractéristiques L_i réalisées sur sept coupes transversales sont présentées sur la Figure 2. Elles sont par la suite utilisées pour la validation des modèles.

Paramètre	Valeurs
Puissance laser, P_{laser} [KW]	6
Diamètre/position du faisceau laser [mm]	0,2/-3
Vitesse de fil, V_{fil} [$m \cdot min^{-1}$]	12
Intensité I [A] et Tension U [V]	402/35,5
Diamètre du fil d'apport, $2r_{fil}$ [mm]	1,2
Stick-out [mm]	18
Vitesse de soudage, V_s [$m \cdot min^{-1}$]	0,4
Distance laser-MIG, d [mm]	21

Tableau 1 : Conditions opératoires retenus

3. Modélisation numérique

3.1. La méthode des plans d'expériences au service de l'optimisation des modèles

La méthode des plans d'expériences (MPE) [7] est un outil efficace pour l'optimisation des systèmes technologiques présentant de nombreux facteurs d'influence (FI) et de nombreuses interactions entre ces facteurs. La mise en place de la MPE se réalise en passant par la planification des expériences, pour extraire efficacement, de la « population » totale des combinaisons possibles de niveaux des facteurs d'influence, les essais les plus pertinents par rapport à l'information fournie. L'analyse statistique de ces résultats permet la mise en évidence des effets et des interactions des FI sur les fonctions objectifs (FO), qui représentent les composantes du modèle expérimental du processus étudié. Nous avons montré précédemment ([8, 9]) que la MPE, habituellement utilisée pour l'optimisation des procédés, peut être aussi utilisée pour optimiser des simulations numériques. Les essais sont alors des expériences numériques, destinées à donner des informations sur les effets des paramètres du modèle (rendement de source, propriété thermophysique inconnue des matériaux) sur les résultats du modèle (forme de la zone fondue, température). Cette démarche, appelée méthode des plans d'expériences numériques (PEN), permet, en réalisant un nombre limité de simulations, d'atteindre l'optimum, qui est, dans ce cas, de rendre l'écart entre les estimations du modèle et les valeurs mesurées minimal. La méthode des PEN est utilisée ici pour optimiser la simulation par la méthode des sources équivalentes (SE) et la simulation multiphysique (MP) du soudage hybride.

3.2. Les hypothèses

La mise au point des modèles est fondée sur plusieurs hypothèses simplificatrices.

- Le champ de température créé est supposé identique au cours du soudage. Le référentiel utilisé est celui des sources laser et MIG. Dans ce mode, appelé régime quasi-stationnaire, l'équation de la chaleur s'écrit :

$$\rho \cdot c_p \cdot \vec{U} \cdot \vec{\nabla} T + \vec{\nabla}(-k \cdot \vec{\nabla} T) = \sum Q_i \quad (1)$$

où \vec{U} est, soit la vitesse de soudage V_s dans le cas du modèle des sources équivalentes, soit la somme de la vitesse de soudage et du champ de vitesses dans le liquide dans le cas du modèle multiphysique, et $\sum Q_i$ est la somme des sources volumiques de chaleur représentant le laser et le MIG.

- La symétrie supposée des zones fondues par rapport à l'axe de soudage permet de ne modéliser que la moitié de la pièce.

- Le changement des propriétés physiques lors de la fusion est pris en compte en utilisant les fonctions lisses d'Heaviside (fonction Comsol *flc2hs*). L'évolution de ces propriétés est décrite pour chaque région, solide et liquide, par des fonctions de température séparées par une zone de transition permettant d'éviter une discontinuité : $A = A_s + (A_l - A_s) \cdot flc2hs(T - T_f, dT)$, avec $T_f = (T_l - T_s)/2$ et $dT = T_l - T_s$ où T_l et T_s sont respectivement le liquidus et le solidus et $A = k, \rho, C_p$ ou μ .

- La chaleur latente de fusion est prise en compte par l'introduction dans l'expression (2) de la capacité thermique d'un terme associé à une fonction lisse de Dirac :

$$C_p = C_p^{\text{solide}} + (C_p^{\text{liquide}} - C_p^{\text{solide}}) \cdot flc2hs(T - T_f, dT) + L_f \cdot \frac{\exp\left(-\frac{(T - T_f)^2}{(dT)^2}\right)}{\sqrt{\pi}(dT)} \quad (2)$$

- La surface du bain de fusion est supposée être dans un état d'équilibre statique par rapport à la pression d'arc, la gravité et la tension de surface [2].

3.3. La modélisation basée sur l'approche des sources équivalentes

Pour ce modèle, la mécanique des fluides dans le bain n'est pas envisagée (modèle purement conductif) [2, 3]. La conductivité thermique de la phase liquide est néanmoins augmentée artificiellement pour tenir compte des effets du transfert de chaleur par convection dans le bain fondu [10]. Les transformations métallurgiques ne sont pas prises en compte. L'apport de matière est considéré comme prédéfini [2] avec une hauteur de dépôt déterminée expérimentalement à l'aide de macrographies.

L'apport de chaleur par le laser est décrit par une combinaison d'une source surfacique gaussienne avec une partie pariétale (3) ajoutée à une source volumique Goldak conique (4) [2].

- Source surfacique gaussienne avec un dépôt pariétal :

$$q_{surf1} = \frac{P_{laser} \cdot A_1}{2 \cdot \pi \cdot r_{surf1}^2} e^{-\frac{y^2+v^2}{2 \cdot r_{surf1}^2}} e^{-\frac{w^2}{dz^2}} \quad (3)$$

- Source volumique Goldak conique [11] :

$$Q_1 = \frac{9 \cdot P_{laser} \cdot \eta_v}{\pi \cdot h \cdot (r_0^2 + r_0 \cdot r_1 + r_1^2)} e^{-\frac{3x^2+y^2}{r_z^2}} [1 - u(z+h)] \quad (4)$$

avec $r_z = r_0 + \frac{r_0 - r_1}{h} z$, où r_0 est le rayon de la zone fondue en $z = 0$, h la profondeur de pénétration, r_1 le rayon de la zone fondue en $z = -h$ et $u(z+h)$ la fonction d'Heaviside. (v, w) est le repère permettant de décrire la position de la source q_{surf1} (Figure 3).

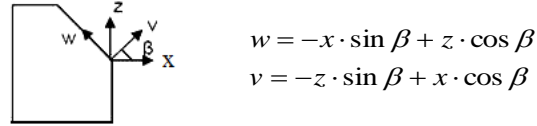


Figure 3 : Changement de repère pour la source q_{surf1}

La distribution énergétique du MIG est représentée par la combinaison de deux sources de chaleur, positionnées à une distance d du laser : une source volumique et une source surfacique. La source volumique (Q_2) est une source Goldak définissant l'apport de chaleur dans le bain fondu. Elle est exprimée selon les relations suivantes :

$$Q_{2f}(x, y, z) = f_f \frac{6\sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot \eta}{a_f \cdot b \cdot c \cdot \pi \cdot \sqrt{\pi}} e^{-3\left(\frac{y-d}{a_f}\right)^2} e^{-3\left(\frac{x}{b}\right)^2} e^{-3\left(\frac{z-h_m}{c}\right)^2} \quad (y > 0)$$

$$Q_{2r}(x, y, z) = f_r \frac{6\sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot \eta}{a_r \cdot b \cdot c \cdot \pi \cdot \sqrt{\pi}} e^{-3\left(\frac{y-d}{a_r}\right)^2} e^{-3\left(\frac{x}{b}\right)^2} e^{-3\left(\frac{z-h_m}{c}\right)^2} \quad (y < 0) \quad (5)$$

La source gaussienne surfacique est liée au dépôt de chaleur par l'arc. Elle s'écrit :

$$q_{surf2} = \frac{U \cdot I \cdot A_2}{2 \cdot \pi \cdot r_{surf2}^2} e^{-\frac{x^2+(y-d)^2}{2 \cdot r_{surf2}^2}} \quad (6)$$

Les paramètres ajustés des sources équivalentes sont regroupées dans le Tableau 2.

A_1	r_{surf1}	dz	η_v	r_0	r_1	r_{surf2}	A_2	η
[%]	[m]	[m]	[%]	[m]	[m]	[m]	[%]	[%]
24	$7 \cdot 10^{-4}$	$7 \cdot 10^{-4}$	71	$2,4 \cdot 10^{-3}$	$1,45 \cdot 10^{-3}$	$7 \cdot 10^{-3}$	60	25,5
a_r	a_f	b	c	k_{eq}				
[m]	[m]	[m]	[m]	$[\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}]$				
$7 \cdot 10^{-3}$	$2 \cdot 10^{-3}$	$7 \cdot 10^{-5}$	$9 \cdot 10^{-3}$	70				

Tableau 2 : Paramètres optimisés des sources équivalentes

3.4. La modélisation multiphysique

Une des difficultés d'une telle modélisation réside dans le manque d'informations sur les propriétés thermophysiques de la phase liquide et sur le comportement de la surface des zones liquides. Le but de cette modélisation est de s'approcher au mieux de la forme de la zone fondue obtenue pour des paramètres de soudage optimaux déterminés expérimentalement, en prenant en compte les phénomènes thermiques et hydrauliques et en faisant varier certaines caractéristiques du métal en phase liquide, ainsi que certains paramètres du procédé non parfaitement connus. Les paramètres optimisés par une approche par PEN sont donnés dans le Tableau 3.

$k_{\text{liquide}} : \text{bain laser et MIG}$	42 et 33 $[\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}]$	Facteur d'absorption du MIG, a_{MIG}	0,7
$C_p \text{ liquide}$	762 $[\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}]$	Rayon du MIG, r_{MIG}	7,5 [mm]
$\rho \text{ liquide}$	7600 $[\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}]$	Rayon du creux MIG	2 [mm]
$\mu \text{ liquide}$	0,005 $[\text{Pa} \cdot \text{s}]$	Profondeur du creux MIG	7,7 [mm]
γ_M	$-2 \cdot 10^{-4} [\text{N} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}]$	Diamètre moyen de la goutte	1,7 [mm]
Facteur d'absorption du laser, a_{laser}	0,12	Rayon de source «gouttes», r_{source}	0,68 [mm]
Rayon du source laser r_{laser}	3,15 [mm]	Hauteur de source «gouttes», h_{source}	2,12 [mm]

Tableau 3 : Paramètres d'entrée du modèle optimisés avec la méthode PEN

En ce qui concerne les représentations des sources de chaleur, les formulations suivantes ont été employées :

- Pour le laser : source surfacique gaussienne sur la paroi du chanfrein inclinée de $\alpha = 20^\circ$:

$$Q_{\text{laser}} = \frac{a_{\text{laser}} \cdot P_{\text{laser}} \cdot \sin \alpha}{\pi \cdot r_{\text{laser}}^2} \cdot e^{-0,5 \frac{\sin \alpha \cdot (x^2 + y^2)}{R_{\text{laser}}^2}} \quad (7)$$

Le capillaire est représenté par un cylindre ayant le diamètre du faisceau laser au point de focalisation (0,2 mm), dont les parois sont à la température de vaporisation du matériau ;

- Pour le MIG : source surfacique représentant l'arc (8) et source volumique (9) [12] représentant l'apport de chaleur par le fil ;

$$Q_{MIG} = \frac{a_{MIG} \cdot P_{MIG}}{\pi \cdot r_{MIG}^2} \cdot e^{-0,5 \frac{(x^2 + (y-d)^2)}{r_{MIG}^2}}, \quad P_{MIG} = U \cdot I \quad (8)$$

$$Q_{\text{gouttes}} = \frac{\rho_l \cdot \pi \cdot r_{\text{fil}}^2 \cdot V_{\text{fil}} \cdot C_{p_l} \cdot (T_{\text{goutte}} - T_l)}{\pi \cdot r_{\text{source}}^2 \cdot h_{\text{source}}} \quad (9)$$

Le métal fondu est supposé être un liquide Newtonien incompressible dont les mouvements sont décrits par les équations de Navier-Stokes :

$$\begin{aligned} \rho \cdot (\vec{U} \cdot \vec{\nabla} T) \cdot \vec{U} &= \vec{\nabla}(-P + \eta \cdot (\vec{\nabla} \vec{U} + (\vec{\nabla} \vec{U})^T)) \\ \vec{\nabla}(\rho \cdot \vec{U}) &= 0. \end{aligned} \quad (10)$$

Les phénomènes de convection pris en compte sont limités à l'écoulement de la matière autour du capillaire et à l'effet Marangoni ayant lieu à l'interface entre le métal liquide et l'air :

$$-\mu \frac{\partial v_x}{\partial z} = \gamma_M \frac{\partial T}{\partial x}; \quad -\mu \frac{\partial v_y}{\partial z} = \gamma_M \frac{\partial T}{\partial y} \quad (11)$$

La force d'Archimède ainsi que la convection provoquée par la force de Lorentz sont négligées.

Grâce à la formulation ALE, la surface libre de la zone fondue du MIG est déformée afin de prendre en compte les effets de la pression d'arc et de la chute des gouttes sur la zone fondue due au MIG [13]. Cette déformation est supposée gaussienne.

4. Validation et comparaison des modèles

En comparant l'aspect des formes simulées de l'ensemble des zones fondues avec une des formes observées sur les coupes métallographiques (Figure 5), on constate une adéquation satisfaisante pour les deux modèles. Cependant, étant donné que la forme de la zone fondue liée au MIG fluctue, une telle comparaison est donnée à titre illustratif. Afin de caractériser l'incertitude sur la forme des zones fondues due aux fluctuations et créer une référence vers laquelle doit tendre le résultat de la modélisation, des mesures de largeurs caractéristiques (L_1 - L_8 , Figure 2) ont été réalisées pour sept coupes métallographiques. Les dispersions des caractéristiques géométriques des zones fondues liées au laser et au MIG ont été ainsi caractérisées (Tableau 4). Si la forme obtenue numériquement respecte les intervalles de confiance ainsi définis, on peut dire que le modèle reproduit correctement la réalité.

On observe que les fluctuations de forme de la zone fondue du laser (L_4 à L_6) sont beaucoup moins importantes que celles de la zone fondue du MIG. L'analyse des dispersions des valeurs L_i calculées, par rapport aux moyennes expérimentales, montre que tous les L_i calculées entrent dans l'intervalle de confiance défini par la reproductibilité du procédé hybride, à l'exception de L_4 – zone la plus étroite du cordon. Cependant, dans ce cas, l'écart entre la limite de l'intervalle de confiance et les valeurs calculées est peu significatif.

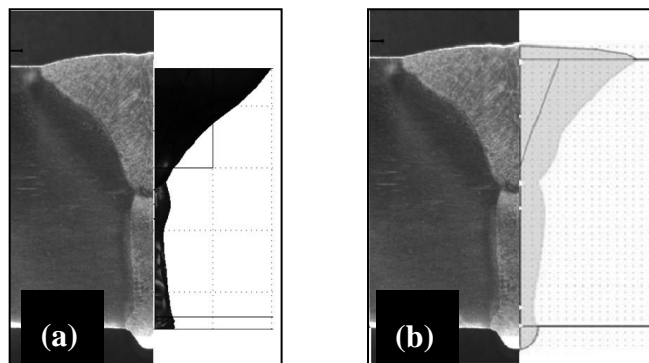


Figure 5 : Comparaison macrographie-modèles : (a) multiphysique, (b) sources équivalentes

La méthode SE ne prenant pas en compte les phénomènes physiques dans le bain de fusion, conduit à des caractéristiques géométriques des zones fondues calculées proches, aux écarts près fixés a priori, des caractéristiques des zones fondues expérimentales. Cette adéquation mesures-modèle a été obtenue en ajustant les entrées du modèle qui sont les paramètres analytiques des sources grâce à la méthode des PEN. Les variations possibles de ces paramètres sont grandes et contraintes uniquement par la conservation de l'énergie totale. Dans le cas de la méthode MP, la liberté d'ajustement des facteurs d'entrée du modèle est moindre, puisque ces facteurs représentent des phénomènes physiques. Cependant, cette

méthode conduit à une assez bonne concordance entre les grandeurs géométriques calculées et expérimentales. On peut donc affirmer que les hypothèses posées permettent de reproduire correctement la forme de la zone fondue.

	Valeurs [mm]							
	L_1	L_2	L_3	L_4	L_5	L_6	L_7	L_8
\bar{L}_i (mesurée)	8,84	3,62	1,97	1,59	1,72	1,54	5,20	4,20
$\sigma(L_i)$	0,97	0,55	0,73	0,10	0,13	0,40	0,39	0,68
$\sigma(\bar{L}_i)$	0,26	0,15	0,19	0,03	0,03	0,11	0,15	0,26
$\pm 2 \cdot t_\alpha \cdot \sigma(\bar{L}_i)$	1,23	0,70	0,92	0,12	0,16	0,50	0,69	1,22
$L_i + 2 \cdot t_\alpha \cdot \sigma(\bar{L}_i)$	10,07	4,32	2,89	1,69	1,88	2,05	5,89	5,42
$L_i - 2 \cdot t_\alpha \cdot \sigma(\bar{L}_i)$	7,62	2,93	1,05	1,47	1,56	1,04	4,52	2,99
L_i^{MP}	10,00	3,50	1,64	1,40	1,63	1,75	5,58	4,32
L_i^{SE}	8,80	3,50	1,40	1,38	1,87	1,54	5,90	4,13

Tableau 4 : Traitement statistique des largeurs caractéristiques mesurées de la zone fondue et comparaison avec les valeurs calculées avec les modèles MP et SE

La comparaison des maxima des thermogrammes expérimentaux et calculés (Tableau 5) montre que la méthode SE reproduit mieux l'histoire thermique aux environs des zones fondues : l'écart relatif ne dépasse pas 5%. Pour le modèle MP, les écarts sont plus importants, mais restent acceptables. Les hypothèses faites pour le modèle MP, en ce qui concerne la mécanique des fluides, peuvent donc être considérées comme valables. Les allures de quelques thermogrammes expérimentaux et calculés par les deux méthodes sont présentées sur la Figure 6.

TC	$T_{max} TC$ [K]		$T_{max} SE$ [K]		$T_{max} MP$ [K]		ΔSE [%]		ΔMP [%]	
	Laser	MIG	Laser	MIG	Laser	MIG	Laser	MIG	Laser	MIG
1	-	1144	-	1084	-	1239	-	-5	-	8
2	-	1119	-	1145	-	963	-	2	-	-14
3	899	1053	910	1069	910	968	1	2	1	-8
4	1092	991	1126	997	920	924	3	1	-16	-7
5	869	872	845	883	818	926	-3	1	-6	6
6	927	850	901	873	896	920	-3	3	-3	8

Tableau 5 : Correspondance entre les températures expérimentales et la modélisation

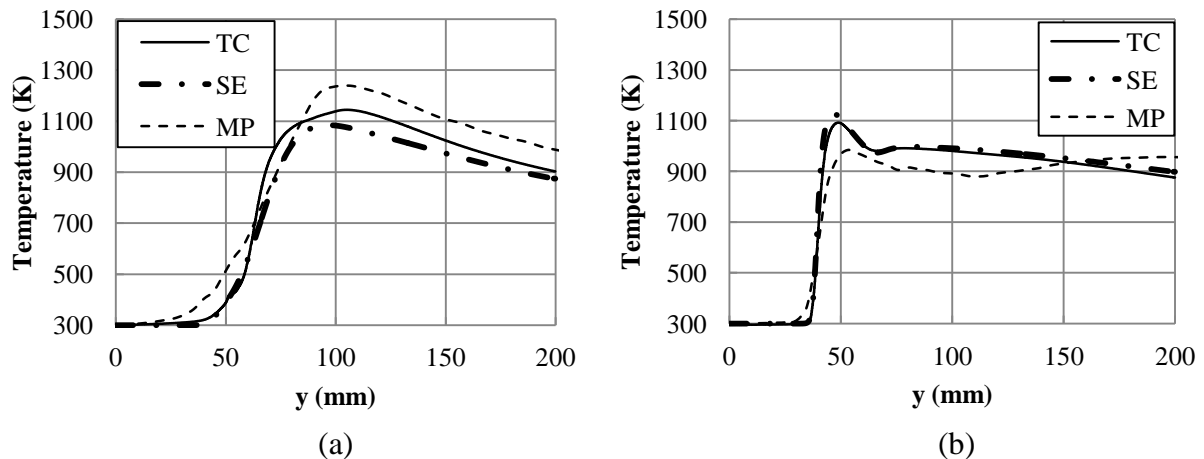


Figure 6 : Comparaison des thermogrammes : (a) TC1 sensible au MIG, (b) TC4 sensible au laser

5. Conclusion

Deux approches de modélisation numérique du soudage hybride en chanfrein Y ont été testées. La méthode des plans d'expériences numériques a permis de retrouver, dans les deux cas, une combinaison des facteurs d'entrée (paramètres analytiques des sources ou paramètres physiques mal connus) permettant de s'approcher de la forme de la zone fondue et de l'histoire thermique expérimentales. L'approche par sources équivalentes permet de retrouver un bon accord mesures-modèle, sans tenir compte des phénomènes présents dans le bain de fusion. L'approche multiphysique mise en œuvre, impliquant la prise en compte des phénomènes thermo-hydrauliques couplés, produit des écarts mesure-modèle plus importants, mais qui restent inférieurs aux intervalles de confiance des valeurs expérimentales. Les perspectives de développement de cette approche sont une description plus prédictive de la surface libre des zones fondues.

Références

-
- [1] *Hybrid laser-arc welding*, Ed. F. O. Olsen, CRC Press, Denmark, 2009, 320 p.
 - [2] L. Bidi, S. Mattei, E. Cicala, H. Andrzejewski, P. Le Masson, J. Schroeder, *Opt. & Las. Technol.*, 43 (2011) 537-545
 - [3] T. Zhang, C.S. Wu, G.L. Qin, X.Y. Wanf, S.Y. Lin, Thermomechanical analysis for Laser + GMAW-P hybrid welding process, *Comput. Mater. Sci.*47 (2010) 848-856.
 - [4] J.Zhou, H.L. Tsai, Modeling of transport phenomena in hybrid laser-MIG Keyhole welding, *International Journal of Heat and Mass Transfer* 51 (2008) 4353-4366.
 - [5] J.-H. Cho, S.-J. Na, Three-Dimensional analysis of molten pool in GMA-laser hybrid welding, *Welding J.* 88 (2009) 35-43
 - [6] O.Desmaison, G. Guillemot, M. Bellet, Modelling of the bead formation during multi pass hybrid laser/gas metal arc welding, *Ecole CNRS Laserap'7*, 1-5 octobre 2012, l'île d'Oleron.
 - [7] E. Cicala, *Metoda experimentelor factoriale : proiectarea experimentelor, modelare, optimizare*, Editura Politehnica, Timisoara (2005).
 - [8] I. Tomashchuk, E. Cicala, I. Bendaoud, S. Mattei, H. Andrzejewski, P. Sallamand, A. Mathieu, A. Fanica, Optimisation d'un modèle multiphysique du soudage hybride laser-MIG des aciers de fortes épaisseurs par la méthode des plans d'expérience, *Ecole CNRS Laserap'7*, 1-5 octobre 2012, île d'Oléron.
 - [9] I. Bendaoud, E. Cicala, S. Mattei, I. Tomashchuk, H. Andrzejewski, P. Sallamand, A. Mathieu, F. Bouchaud, Simulation de l'apport de chaleur du procédé de soudage Hybride laser/MIG par l'approche sources équivalentes, *Ecole CNRS Laserap'7*, 1-5 octobre 2012, île d'Oléron.
 - [10] D. D. Doan, *Modèle de source de chaleur pour la simulation du soudage avec et sans apport de matière*, Thèse de l'Université de Bretagne du Sud (2006)
 - [11] J.A. Goldak, A. Chakravarta, M.J. Bibby, A new finite element model for welding heat source, *Metallurgical transition*, 13 (1984) 299-305
 - [12] C.-H. Kim, W. Zhang, T. DebRoy, Modeling of temperature field and solidified surface profile during gas-metal arc fillet welding, *J. Appl. Phys.* 94 (2003) 2667-2679
 - [13] T.Q. Li, C.S. Wu, Y.H. Feng, L.C. Zheng, Modeling of the thermal fluid flow and keyhole shape in stationary plasma arc welding, *Int. J. Heat Fluid Flow* (2012), doi:10.1016/j.ijheatfluidflow.2011.12.004

Remerciements

Les travaux ont été effectués dans le cadre du projet SISHYFE MatetPro'09 soutenu par l'ANR.