



HAL
open science

Simulation de l'apport de chaleur du procédé de soudage Hybride laser/MIG par l'approche sources équivalentes

Issam Bendaoud, Eugen Cicala, Simone Matteï, Iryna Tomashchuk, Henri Andrzejewski, Pierre Sallamand, Alexandre Mathieu, Amélie Fanica

► To cite this version:

Issam Bendaoud, Eugen Cicala, Simone Matteï, Iryna Tomashchuk, Henri Andrzejewski, et al.. Simulation de l'apport de chaleur du procédé de soudage Hybride laser/MIG par l'approche sources équivalentes. Congrès Français de Thermique: thermique en conditions extrêmes, SFT, May 2012, Bordeaux, France. hal-04948223

HAL Id: hal-04948223

<https://hal.science/hal-04948223v1>

Submitted on 14 Feb 2025

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Simulation de l'apport de chaleur du procédé de soudage Hybride laser/MIG par l'approche sources équivalentes

Issam Bendaoud¹, Eugen Cicala², Simone Matteï¹, Iryna Tomashchuk¹, Henri Andrzejewski¹, Pierre Sallamand¹, Alexandre Mathieu¹, Amélie Fanica³

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

² Mechanical Engineering Faculty, “Polytechnic” University of Timisoara, Mihai Viteazu nr.1, Timisoara, 300222, Romania

³ Centre de Recherche des Matériaux du Creusot, Arcelor Mittal France/Industeel, 56 rue Clémenceau-71200 le Creusot

Résumé - Le contexte de l'étude est l'utilisation du procédé hybride laser/MIG pour le soudage de pièces en acier inoxydable superduplex UR2507Cu dans une configuration de chanfrein en « Y ». Il s'agit de simuler numériquement, à l'aide du logiciel COMSOL Multiphysics®, l'apport de chaleur, par l'approche « sources équivalentes ». Une méthode d'optimisation des facteurs décrivant les formes analytiques des sources, s'apparentant à la méthode des plans d'expériences, est utilisée.

Nomenclature

A_1	facteur d'absorption,	λ	conductivité thermique, $W.m^{-1}.K^{-1}$
a	paramètre de la source Goldak suivant x , m	λ_{eq}	conductivité thermique équivalente $W.m^{-1}.K^{-1}$
b	paramètre de la source Goldak suivant y , m	η_v	rendement de la source volumique conique
c	paramètre de la source Goldak suivant z , m	η	rendement de la source volumique Goldak
C_p	capacité thermique massique $J.kg^{-1}.K^{-1}$	ρ	masse volumique, $kg.m^{-3}$
f	coefficient de distribution de la chaleur	<i>Indices et exposants</i>	
I	intensité du courant, A	1	Goldak conique
P_l	puissance laser, W	2	Goldak double ellipsoïde
q	source surfacique avec dépôt pariétal, $W.m^{-2}$	f	avant
Q	source volumique, $W.m^{-3}$	r	arrière
r	rayon de la source surfacique, m	surf1	surfacique 1
U	tension du courant, V	surf2	surfacique 2
V_s	vitesse de soudage, $m.s^{-1}$		

Symboles grecs

1 Introduction

Le soudage hybride (Laser/MIG) présente des avantages certains pour les industriels : il permet, notamment, une productivité meilleure que celle des procédés conventionnels et une plus grande tolérance d'accostage par rapport au procédé laser seul. Cependant, ce procédé fait intervenir des phénomènes multiphysiques nombreux et couplés. La simulation numérique s'avère être un outil précieux pour identifier les effets des paramètres opératoires sur la qualité du cordon obtenue. Si ces paramètres sont optimisés, les phénomènes liés au soudage seront mieux maîtrisés et les soudures fiabilisées. La simulation numérique permet de décrire les phénomènes liés au soudage tels que les transferts de chaleur qui provoquent des évolutions de température dans les pièces à souder. Les caractéristiques d'un cordon de soudure dépendent beaucoup de l'histoire thermique des pièces à assembler. La simulation

numérique peut donc à terme aboutir à la réalisation d'un outil prédisant la faisabilité et la robustesse d'un soudage. Il est donc impératif d'accéder à la définition de l'apport de chaleur qui peut être décrit suivant une approche dite « approche sources équivalentes ». Cette approche consiste à résoudre un problème de conduction non linéaire dans la pièce en appliquant une forme analytique connue de l'apport de chaleur. Notre choix concernant ce type d'approche est qu'elle peut être mise en œuvre facilement, elle demande des temps de calcul réduits et permet de quantifier la distribution d'énergie apportée par les sources.

2 Configuration de soudage

La configuration de soudage étudiée est présentée sur la Figure 1. Il s'agit de souder en une seule passe avec le procédé hybride laser/MIG des pièces en acier inoxydable superduplex UR2507Cu (Euronorm 1.4507 - X2CrNiMoCuN25.6.3) dans une configuration de chanfrein en « Y » avec un talon de 12 mm et un chanfrein d'ouverture de 40° et de profondeur 8 mm.

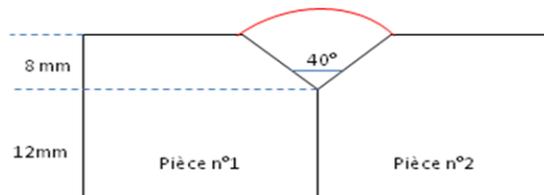


Figure 1 : Configuration de soudage

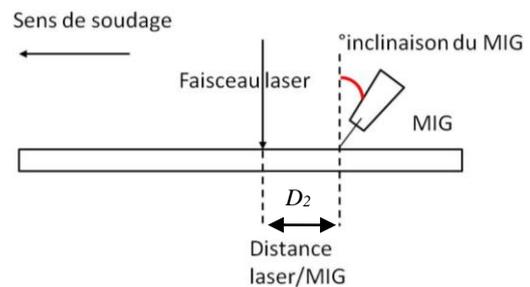


Figure 2 : Disposition du laser et du MIG

Dans cette configuration, le faisceau laser focalisé est placé devant l'arc MIG (Figure 2). La position de l'arc par rapport au laser est définie par deux paramètres qui sont la distance laser-MIG et l'angle d'inclinaison de la torche MIG par rapport à l'axe du laser (30°). Les paramètres opératoires du soudage ont été définis grâce à une étude préalable et sont regroupés dans le tableau 1. Ce choix de paramètres est lié, d'une part, à la géométrie du chanfrein, et d'autre part, aux moyens matériels dont le laboratoire dispose.

Paramètres	Domaine
Puissance laser [kW]	6
Diamètre faisceau laser [mm]	[0,2 ; 0,6]
Vitesse de fil [$m \cdot min^{-1}$]	[8 ; 12]
Puissance MIG [kW]	12,6
Diamètre du fil d'apport [mm]	1,2
Vitesse de soudage [$m \cdot min^{-1}$]	[0,4 ; 0,5]
Distance laser-MIG [mm]	[20 ; 24]

Tableau 1 Paramètres opératoires

3 Simulation numérique

3.1 Formulation du modèle direct

La mise au point du modèle direct est fondé sur plusieurs hypothèses simplificatrices.

- Nous supposons que le champ de température créé par les sources laser et MIG est identique d'un bout à l'autre du cordon. L'équation de la chaleur peut être alors écrite dans un repère mobile dont l'origine se déplace à la même vitesse que la source de chaleur dans la direction Ox. Ce changement de variables a pour avantage d'éliminer la variable de temps et donc de réduire considérablement le temps de calcul. Ce mode est appelé régime quasi-stationnaire. Le fil d'apport de matière est supposé avoir les mêmes propriétés que le métal de base. La chaleur latente de fusion est prise en compte en utilisant une capacité thermique équivalente décrite par [1]:

$$c_p^{eq} = c_p + D \cdot L_f \quad (1)$$

avec L_f l'enthalpie latente de fusion ($J.kg^{-1}$) et D une impulsion gaussienne normale d'intégrale unité définie par :

$$D = \frac{e^{-\frac{(T-T_f)^2}{\Delta T}}}{\sqrt{\pi \Delta T^2}} \quad (2)$$

Avec $T_f = (T_l - T_s)/2$ température de fusion, et $\Delta T = T_l - T_s$ où T_l et T_s sont respectivement les températures liquidus et solidus du matériau

- La mécanique des fluides dans le bain n'est pas envisagée (modèle purement conducteur) [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 de fusion [8]. Les transformations métallurgiques ne sont pas prises en compte.
- La surface du bain de fusion est supposée être dans un état d'équilibre statique par rapport à la pression d'arc, de la gravité et de la tension de surface [2] [3].
- L'effet des mouvements du fluide induits par les forces électromagnétiques et les effets Marangoni sont ignorés [2] [3].

En plus de ces hypothèses, la symétrie des macrographies transverses par rapport à l'axe de soudage nous permet de ne modéliser que la moitié de la pièce. La distribution de température est calculée grâce à la résolution de l'équation de chaleur (3) dans laquelle est introduit un terme représentant la source volumique (Q) associé à des conditions aux limites pour chaque face de la pièce.

$$\rho(T)c_p(T)V_s \frac{\partial T}{\partial x} = \text{div}(\lambda(T)\overrightarrow{\text{grad}}T + Q(x, y, z)) \quad (3)$$

3.2 Choix des sources de chaleur équivalentes

La mise au point du modèle numérique est menée en trois étapes. Dans un premier temps nous avons identifié les sources lorsque seul le laser est mis en œuvre. Puis, les sources correspondantes au procédé MIG seul sont déterminées. Enfin les différentes sources sont regroupées dans un modèle final « hybride laser/MIG ».

3. 2. 1. Laser seul

La modélisation de la source laser est effectuée dans le cas du mode capillaire, l'apport de chaleur est décrit par la combinaison d'une source surfacique gaussienne avec une partie pariétale (4) ajoutée à une source volumique Goldak conique (5) [2]

- Source surfacique gaussienne avec un dépôt pariétal :

$$q_{surf1} = \frac{P_L A_1}{2\pi r_{surf1}^2} e^{\left(\left(\frac{x^2+v^2}{2r_{surf1}^2}\right)\right)} e^{\left(\frac{-w^2}{az^2}\right)} \quad (4)$$

- Source volumique Goldak conique [7] :

$$Q_1 = \frac{9P_L \eta v}{\pi h (r_0^2 + r_0 r_1 + r_1^2)} e^{\left(-3\frac{x^2+y^2}{r_z^2}\right)} [1 - u(z+h)] \quad (5)$$

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).

$$w = -y \sin \beta + z \cos \beta$$

$$v = z \sin \beta + y \cos \beta$$

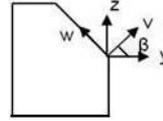


Figure 3 : Changement de repère pour la source q_{surf1}

3. 2. 2. MIG seul

La distribution énergétique du MIG est représentée par la combinaison de deux sources de chaleur [4], une source volumique et une source surfacique. La source volumique (Q_2) est une source Goldak [5] [6] définissant l'apport de chaleur des gouttes de fil dans le bain fondu positionnée à une distance D_2 du laser. Elle est exprimée selon les relations suivantes :

$$\begin{aligned} Q_{2f}(x, y, z) &= f_f \frac{6\sqrt{3}\eta UI}{a_f b c \pi \sqrt{\pi}} e^{-3\left(\frac{x-D_2}{a_f}\right)^2} e^{-3\left(\frac{y}{b}\right)^2} e^{-3\left(\frac{z-h_m}{c}\right)^2} \quad (x > 0) \\ Q_{2r}(x, y, z) &= f_r \frac{6\sqrt{3}\eta UI}{a_r b c \pi \sqrt{\pi}} e^{-3\left(\frac{x-D_2}{a_r}\right)^2} e^{-3\left(\frac{y}{b}\right)^2} e^{-3\left(\frac{z-h_m}{c}\right)^2} \quad (x \leq 0) \end{aligned} \quad (6)$$

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

$$q_{surf2} = \frac{A_2 UI}{2\pi r_{surf2}^2} e^{\left(\left(\frac{(x-D_2)^2+y^2}{2r_{surf2}^2}\right)\right)} \quad (7)$$

3. 2. 3. Hybride laser/MIG

La mise en œuvre du modèle hybride est basée sur les deux cas précédents. Les sources de chaleur choisies dans les cas laser seul et MIG sont appliquées pour le cas hybride et les paramètres de source sont identifiés à l'aide de la macrographie obtenue lors du soudage hybride. Nous considérons ici un apport de matière prédéfini [2] avec une hauteur de dépôt déterminée expérimentalement à l'aide de macrographies. L'inclinaison du front du bain de fusion est déterminée à partir de macrographies longitudinales. La mesure de cet angle donne une valeur de 30°. Le maillage est affiné à proximité des sources.

4 Identification et ajustement des paramètres des sources équivalentes :

4. 1 Démarche suivie

La démarche d'identification est appliquée de la même manière pour les trois modèles numériques étudiés. Nous avons développé une méthode d'optimisation des paramètres, simple à mettre en place et robuste : il s'agit de la méthode des Plans d'Expériences Numériques (PEN). A partir du modèle numérique, on définit une liste des paramètres regroupant les facteurs d'influence(FI) et les fonctions objectif (FO) qui nous permettent de déterminer (conception d'une matrice programme, Figure 4) les différentes combinaisons entre les facteurs et organiser les simulations. A l'aide d'un nombre de calculs limité, on évalue les effets des FI (paramètres des expressions analytiques des sources équivalentes) sur les FO (caractéristiques géométriques de la zone fondue). L'analyse de ces effets conduit à réaliser des ajustements des valeurs des FI en vue d'obtenir des écarts entre les valeurs mesurées et calculées inférieurs à une limite fixée a priori. La démarche peut être représentée par le diagramme suivant :

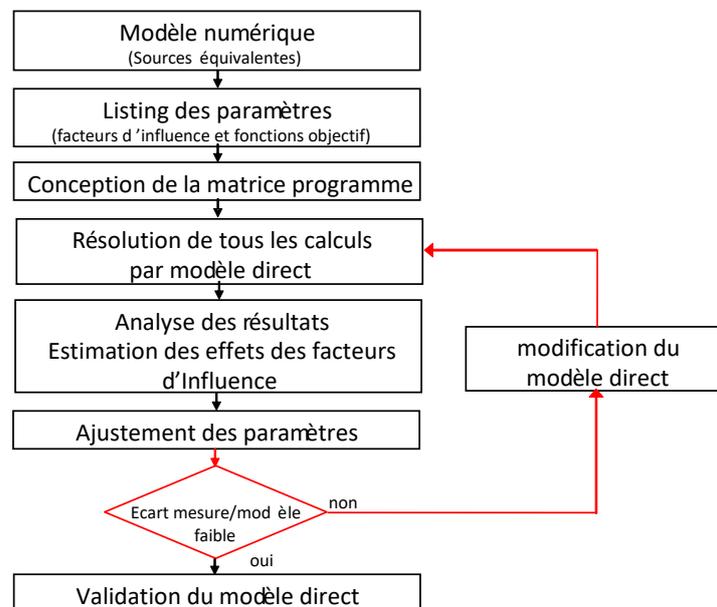


Figure 4 : Diagramme d'ajustement des paramètres du modèle numérique

L'avantage de cette méthode est aussi de juger de la flexibilité d'ajustement du modèle. En effet, si la modification d'un FI ne modifie principalement qu'une seule FO, le modèle est très flexible vis-à-vis des ajustements, en revanche si en agissant sur un seul FI, on modifie dans

la même proportion plusieurs FO, le modèle est peu flexible pour des ajustements réalisés par le facteur concerné.

4.2 Résultats du modèle numérique

La détermination des paramètres des fonctions analytiques décrivant les sources de chaleur a été réalisée de façon à retrouver la forme des macrographies du cordon de soudure. Cette comparaison concerne plusieurs dimensions de la zone fondue dans le sens transversal comme indiqué sur la figure 5. Nous avons défini deux plans pour les deux modèles numériques laser seul et MIG seul.

A titre d'exemple la figure 4 présente les diagrammes des effets dans le cas du MIG seul.

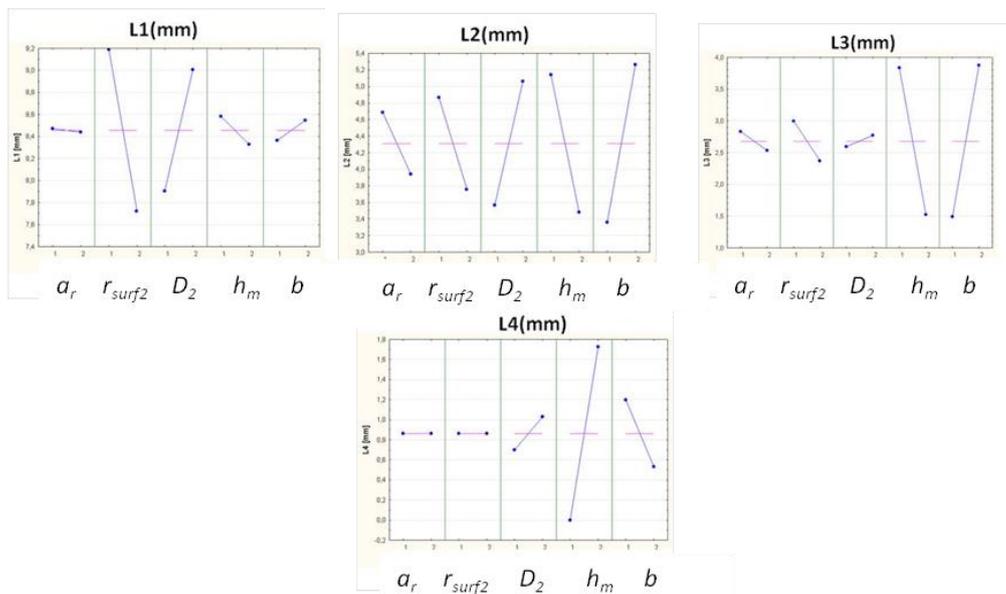


Figure 5 : Diagramme des effets dans le cas du MIG seul

L'analyse de ces effets montre que :

- La FO L4 est fortement influencée par le facteur h_m .
- r_{surf2} a une influence inverse sur L1 et L2 : si r_{surf2} augmente L1 et L2 diminuent.
- Le facteur D_2 est lui aussi influent sur L1 et L2, son influence est directe : si D_2 augmente L1 et L2 augmentent aussi.
- Globalement, le facteur a_r a une faible influence sur les 4 FO.

L'ajustement des paramètres analytiques des sources dans le cas hybride a été réalisé à partir des résultats des deux plans laser et MIG. Les valeurs déterminées 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	λ_{eq}				
m	m	m	m	$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$				
$7 \cdot 10^{-3}$	$2 \cdot 10^{-3}$	$7 \cdot 10^{-5}$	$9 \cdot 10^{-3}$	70				

Tableau 2 Tableau des paramètres

La figure 6 représente les géométries transverses des cordons de soudure obtenus par le procédé hybride MIG sel (a), Hybride (b) et laser seul (c).

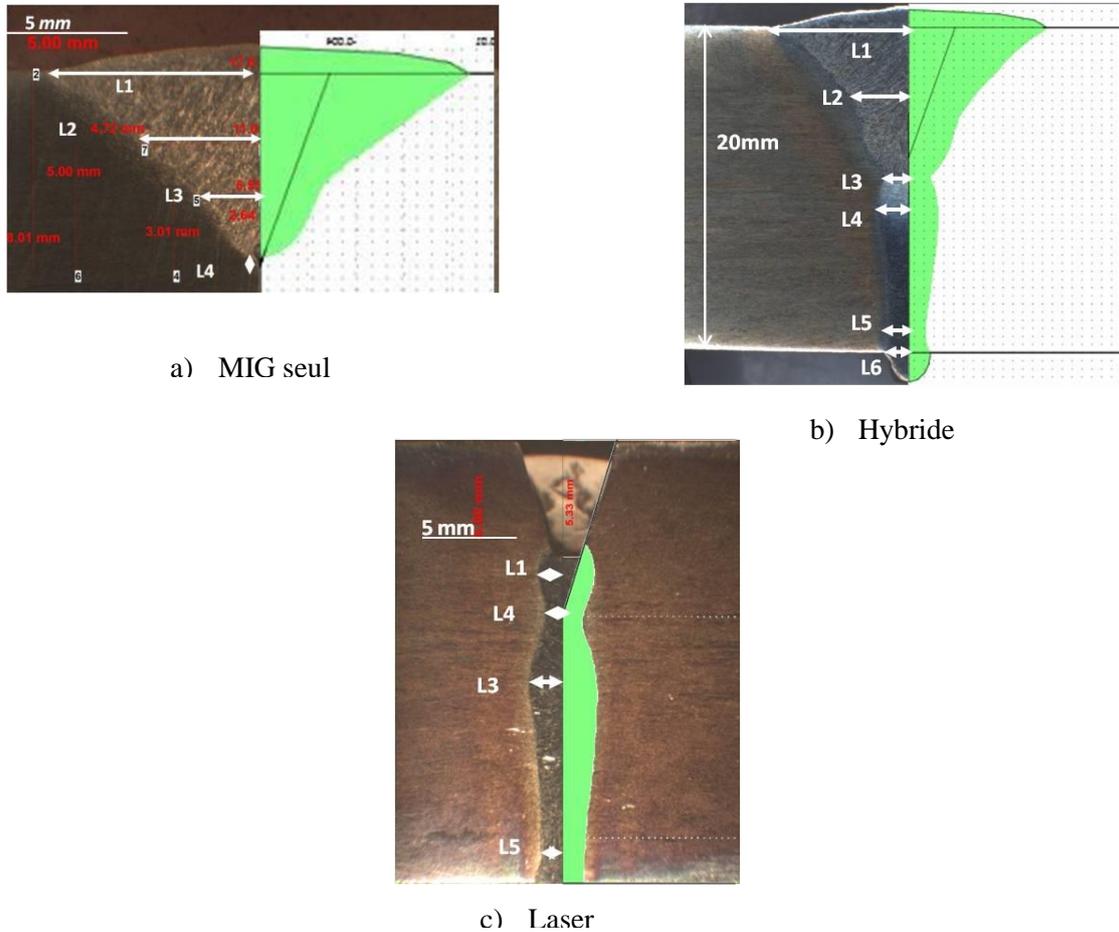


Figure 6 : Comparaison des formes des zones fondues mesurées et calculées
a) MIG seul, (c) Laser, (b) Laser+MIG

Les figures ci-dessus montrent que l'on obtient une adéquation entre les géométries calculées par les modèles directs et mesurées sur les macrographies. Globalement la forme de la zone fondue est correctement reproduite. Cette comparaison permet de valider le choix des sources de chaleur équivalentes. Le tableau 3 présente un exemple des résultats dans le cas du soudage hybride après ajustement des paramètres.

Grandeurs (mm)	L1	L2	L3	L4	L5	L6
Mesures (mm)	8,83	3,20	1,40	1,80	1,20	1,50
Incertitude (mm)	0,06	0,10	0,04	0,16	0,04	0,02
Modèle	8,80	3,50	1,38	1,87	1,10	1,40
Ecart mesures/modèle%	0,4	8,5	1,4	3,7	9,0	7,0

Tableau 3 Grandeurs géométriques de la zone fondue mesurées et calculées

On constate que les ajustements réalisés permettent d'une part d'obtenir pour toutes les fonctions « objectif » un bon accord (différences inférieures à 9 %) entre les valeurs mesurées et calculées et d'autre part de déterminer les paramètres des sources difficilement estimables, pour rapprocher au mieux les calculs et les mesures.

5 Conclusion

Dans cet article nous avons développé une procédure de travail permettant d'établir un modèle numérique direct purement thermique pour la configuration en chanfrein « Y » dans le cas du soudage hybride laser/MIG. A partir des essais préliminaires, nous avons récupéré des informations sur la forme et les grandeurs géométriques de la zone fondue. A l'aide de la méthode des plans d'expériences numériques associés aux modèles directs nous avons estimé et ajusté les paramètres des sources pour retrouver les caractéristiques de la zone fondue. Les premiers résultats des modèles sont satisfaisants puisqu'on arrive à obtenir des écarts modèle-mesures acceptables. Par la suite nous allons instrumenter les pièces à assembler de thermocouples afin d'acquérir les évolutions temporelles en différents endroits. Le positionnement de ces thermocouples sera choisi grâce une étude de sensibilité des températures sur les FI à estimer. L'ajustement de ces FI sera conduite à partir de deux FO : les températures maximales atteintes et l'évolution temporelle.

Références

- [1] C.Bonacina, G.Comini, A Fasano, M.Primocerio, Numerical solutions of phase-change problems, *Int. J. Heat Mass Transfer* 16 (1973) 1825-1832.
- [2] L.Bidi, S.Mattei, E.Cicala, H.Andrzejewski, P. Le Masson, J. Schroeder, The use of exploratory experimental designs combined with thermal numerical modeling to obtain a predictive tool for hybrid laser/MIG welding and coating processes, *Optics & Laser Technology*, Volume 43, Issue 3, April 2011, Pages 537-545.
- [3] E. Le Guen, Etude du procédé de soudage hybride laser/MAG : Caractérisation de la géométrie et de l'hydrodynamique du bain de fusion et développement d'un modèle 3D thermique, Thèse de doctorat, Université de Bretagne-sud, 2010.
- [4] G.Xu, C. Wu, Numerical analysis of weld pool geometry in globular-transfert gas metal arc welding *Front. Mater. Sci. China* 1(1) (2007) 24-29.
- [5] E.W. Reutzler, S.M Kelly, R.P. Martukanitz, M. Bugarewicz, P. Michaleris, Laser-GMA Hybrid Welding: Process Monitoring and Thermal Modeling, In 5th International Trends in Welding Research Conference Proceedings, Pine Mountains, GA, ASM International (2005) 531-539.
- [6] J. Goldak, M. Bibby, J. Morre, R. House, B. Patel, Computer modelling heat flow in welds, *Metallurgical transactions B*, vol 17b, 1986.
- [7] J.A. Goldak, A. Chakravarta, M.J. Bibby, A new finite element model for welding heat source, *Metallurgical transition*, vol 13, pp 299-305, 1984
- [8] 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

Remerciements

Nous sommes particulièrement reconnaissants à l'Agence National de la Recherche pour le soutien financier accordé pour la réalisation de ce projet de recherche.