

Estimation de la forme du bain fondu en régime quasi-stationnaire dans un procédé de soudage TIG- Résultats numériques et expérimentaux

Duc Dung DOAN¹, Franck GABRIEL², Yvon JARNY³, Philippe LE MASSON⁴.

^{1,2} Commissariat à l'Énergie Atomique, Bât. 611 CEA Saclay 91191 Gif sur Yvette Cedex.

³ UMR CNRS 6607, Université de Nantes, BP 50609, 44306 Nantes Cedex 3.

⁴ LET2E Université de Bretagne du Sud, Rue de Saint Maudé, BP 92116, 56321 Lorient Cedex.

Résumé – Cet article développe une méthode avantageuse pour estimer la forme du bain fondu en régime quasi-stationnaire dans un procédé de soudage TIG. L'interface liquide/solide est paramétrée par une surface de Bézier. Le problème du transfert de chaleur est alors formulé et résolu comme un problème inverse en utilisant une méthode d'estimation des paramètres des points de contrôle de la surface de Bézier. On résout le problème direct en formulation eulérienne en se positionnant dans le référentiel de la torche de soudage. L'avantage de cette approche est d'obtenir, à partir des températures mesurées dans la région solide, l'interface liquide–solide et la distribution de la température dans la région solide en faisant une totale abstraction de ce qui se passe dans le bain liquide. La méthode est appliquée pour une configuration expérimentale soudage TIG débouchant.

Mot clé : soudage – méthode inverse – bain de fusion – transfert de chaleur

Nomenclature

C_p	Chaleur spécifique, $J kg^{-1} K^{-1}$	u	Vitesse de la torche, $m s^{-1}$
h	Coefficient de transfert $W m^{-2} K^{-1}$	x_m	Position des points de mesure m
t_m	Temps d'enregistrement s	Ω_s	Domaine solide
T_s	Température dans le solide, $^{\circ}C$	λ_s	Conductivité du solide, $W m^{-1} K^{-1}$
T_e	Température extérieure, $^{\circ}C$	ρ_s	Masse volumique du solide, $kg m^{-3}$
T_{imp}	Température imposée, $^{\circ}C$	Γ	Interface Liquide - Solide
T_f	Température de fusion, $^{\circ}C$	Γ_i	Frontières du domaine

1. Introduction.

Le soudage par fusion est un procédé complexe impliquant plusieurs paramètres qui influencent la structure finale solidifiée et les propriétés du joint soudé. Pendant le procédé de soudage, les bords de deux pièces métalliques sont fondus en créant le joint soudé [1]. Ce joint est obtenu en utilisant localement une source intense d'énergie. L'énergie thermique transférée fait fondre le métal formant ainsi un bain de fusion. Il est toutefois important de pouvoir contrôler la taille et la forme de ce bain [2]. qui doit être suffisamment petit pour être maniable et pour minimiser la consommation d'énergie mais suffisamment grand pour lier correctement les deux pièces. L'application des techniques inverses à ce type de problème permet de définir le chargement thermique à travers la définition d'un terme source. Dans la thèse de D. Doan [3], une étude bibliographique rappelle les différentes approches. De plus, ce travail a permis de développer une nouvelle méthode identifiant la position de l'interface liquide-solide et estimant la distribution de la température dans le solide. Le travail présenté ici est une application 3D de cette méthode pour une configuration expérimentale de soudage à arc électrique (procédé TIG) débouchant à faible épaisseur.

2. Formulation du problème

2.1. Schéma du procédé de soudage [3]

Un arc électrique possédant une intensité suffisante se déplace à vitesse constante le long de l'axe Ox formant un bain de fusion qui se déplace à la même vitesse que l'arc électrique (Figure 1).

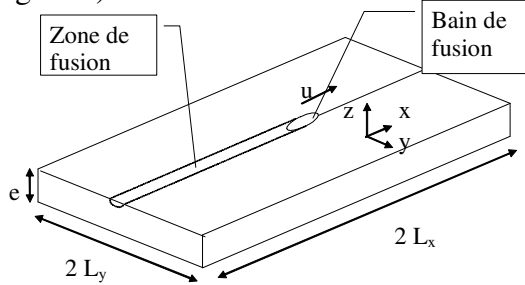


Figure 1 : Schéma de la plaque mince

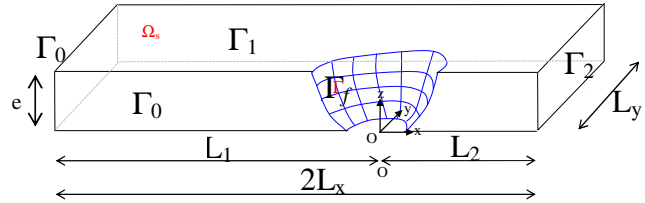


Figure 2 : Schéma du domaine de calcul

2.2. Equations du problème inverse

Le référentiel utilisé est lié à la torche de soudage. En régime quasi-stationnaire, le champ thermique dans le solide est déterminé en considérant que la température à l'interface liquide-solide, est imposée à la température de fusion T_f . On note Ω_s le domaine solide, et $\Gamma = \Gamma_0 \cup \Gamma_1 \cup \Gamma_2 \cup \Gamma_f$ sa frontière (figure 2) où Γ_f est la frontière isotherme du domaine Ω_s avec le bain fondu et est paramétrée par une surface de Bézier.

Le système d'équations décrivant le champ de température $T(x, y, z)$ dans Ω_s , en régime quasi-stationnaire est donc:

$$\rho_s C_{ps} u \frac{\partial T(x, y, z)}{\partial x} = \nabla [\lambda_s \nabla T(x, y, z)] \quad (x, y, z) \in \Omega_s \quad (1)$$

$$\lambda_s \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_{\Gamma_0} = 0, \quad \lambda_s \frac{\partial T}{\partial n} + h(T - T_{imp}) \Big|_{\Gamma_1} = 0, \quad T|_{\Gamma_2} = T_{imp} \quad \text{et} \quad T|_{\Gamma_f} = T_f \quad (2)$$

où h est un coefficient de transfert global intégrant les échanges de chaleur par convection et par rayonnement sur Γ_1 . Des conditions adiabatiques sont considérées sur Γ_0 . Enfin, la température est imposée sur le front de fusion Γ_f ainsi que sur Γ_2 .

Dans la suite, on cherche à estimer la forme du front de fusion Γ_f supposée inconnue. La distribution du flux de chaleur cédé à travers ce front par le bain de fusion vers le solide, n'étant pas accessible expérimentalement, l'équation du bilan de flux sur cette interface ne peut être utilisée pour en déterminer sa forme. C'est pourquoi une approche inverse basée sur des mesures de température dans le solide est considérée. Le problème inverse consiste alors à identifier Γ_f et à estimer le champ de température dans la partie solide à partir des équations (1) – (2) et des mesures (3) en s'affranchissant de la modélisation du champ thermique dans la région liquide. De plus, en régime quasi stationnaire, un seul thermocouple positionné dans la zone solide établit une équivalence entre le choix de différents temps d'enregistrement t_m et différentes positions x_m ($x_m = u \times t_m$) (figure 3a)

$$T(x_m, y_m, z_m) = Y^m \quad m = 1, 2, \dots, M \quad (x, y, z) \in \Omega_s \quad (3)$$

La formulation usuelle du problème inverse consiste alors à minimiser une fonction coût construite sur l'écart des températures mesurées Y^m et celles calculées par le modèle (1)–(2) $T(x_m, y_m, z_m; \Gamma_f)$ avec la forme Γ_f que l'on cherche à estimer :

$$S(\Gamma_f) = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M [T(x_m, y_m, z_m; \Gamma_f) - Y^m]^2 \quad (4)$$

Après avoir choisi une forme initiale $\Gamma_f^{(0)}$ et son paramétrage par une surface de Bézier, la procédure d'identification se réalise de façon itérative tant que les conditions de convergence ne sont pas satisfaites. L'algorithme de Levenberg Marquardt [5] est utilisé afin de corriger le vecteur des paramètres X, i. e. les coordonnées des points de contrôle de la surface de Bézier

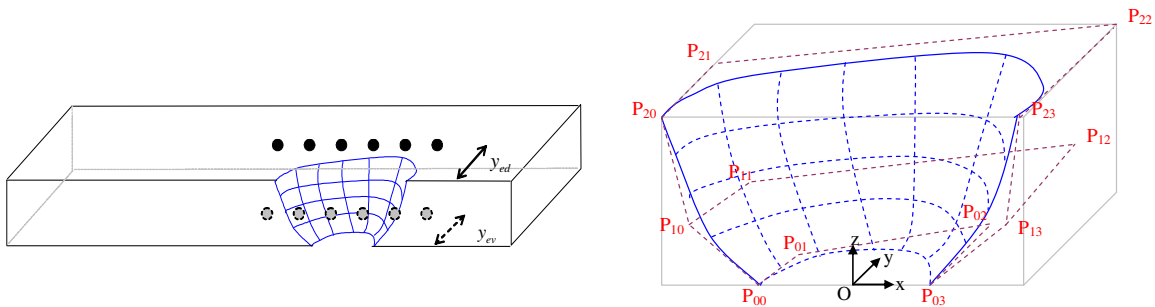


Figure 3a Schéma d'emplacement des points de mesure

Figure 3b La surface de Bézier d'ordre 3 et ses points de contrôle,

2.3. Paramétrage du front de fusion Γ_f

D'une façon générale, la surface de Bézier est formulée comme suit. Soit $\{P_{ij}, i=1, \dots, m+1; j=1, \dots, n+1\}$ ses points de contrôle et $\{B_i^m, i=1, \dots, m+1; B_j^n, j=1, \dots, n+1\}$ les polynômes de Bernstein tels que : $B_k^l(u) = \frac{l!}{k!(l-k)!} u^k (1-u)^{l-k}$. Alors la surface de Bézier de

degré (m, n) est définie par $P(u, v) = \sum_{i=0}^m \sum_{j=0}^n P_{ij} B_i^m(u) B_j^n(v)$, $(u, v) \in [0, 1] \times [0, 1]$

Elle vérifie les propriétés générales suivantes pour des surfaces d'ordre $(m+1).(n+1)$:

- Les points de contrôle extrémités $P_{00}, P_{0n}, P_{m0}, P_{mn}$ appartiennent à la surface.
- La surface $P(u, v)$ est continue et a des dérivées continues à tous les ordres.
- Chaque point de contrôle exerce une attraction sur la portion de la surface proportionnelle aux coefficients bi-variés du polynôme de Bernstein.
- La surface est continue dans l'enveloppe convexe du polygone $P_{00}, P_{0n}, P_{m0}, P_{mn}$.
- La surface de Bézier est indépendante du système d'axes auquel elle est rapportée.

Cette approche a plusieurs avantages : d'une part la surface de Bézier assure la régularité de la forme, d'autre part la taille du vecteur paramètres X à identifier reste limitée. De plus certaines coordonnées des points de contrôle peuvent être contraintes a priori par la nature physique de problème. Dans l'exemple décrit par la figure 3b, la surface de Bézier de degré $(m=2, n=3)$ est définie par 12 points de contrôle $\{P_{ij}, i=1, \dots, 3; j=1, \dots, 4\}$, c.a.d. 36 paramètres et permet de décrire très convenablement les bords de fusion obtenus en configuration débouchante pour les procédés de soudage TIG, MIG/MAG et Laser.

Connaissant l'épaisseur de la pièce, les coordonnées en z des points P_{00} à P_{03} et P_{20} à P_{23} , sont fixées. Les points P_{00} , P_{10} , P_{20} et P_{03} , P_{13} , P_{23} appartiennent au plan xOz et les coordonnées en y de ces points sont alors nulles. Le plan xOz est un plan de symétrie et donc les isothermes sont perpendiculaires à ce plan. On en déduit que les six directions $P_{00}P_{01}$, $P_{10}P_{11}$, $P_{20}P_{21}$, $P_{03}P_{02}$, $P_{13}P_{12}$ et $P_{23}P_{22}$ sont perpendiculaires au plan xOz , entraînant les 6 relations suivantes sur les coordonnées $P_{21x} = P_{20x}$, $P_{22x} = P_{23x}$, $P_{01x} = P_{00x}$, $P_{02x} = P_{03x}$, $P_{11x} = P_{10x}$, $P_{12x} = P_{13x}$. L'épaisseur de la plaque étant faible, la coordonnée en z des points P_{10} , P_{11} , P_{12} , P_{13} peut être fixée à $z = 0,5 e$. Ainsi, la taille du vecteur X des paramètres à estimer (tableau 1) passe de 36 à 12 ($\Gamma_f(X)$).

3. Résultats numériques

3.1.

En vue d'optimiser la conception du dispositif expérimental, plusieurs simulations sont effectués afin d'étudier l'influence du nombre et de la position des points de mesure. Le champ de température de référence dans le cas test du problème 3-D débouchant a été obtenu en résolvant les équations (1)–(2) avec le code du CEA Cast3M et les paramètres suivants : $h = 24.1 Wm^{-2}K^{-1}$, $L_y = 40 mm$, $L_x = 300 mm$, $e = 3 mm$, $\rho_s c_p = 4000000 J.m^{-3}.K^{-1}$, $\lambda_s = 50 W.m^{-1}.K^{-1}$, $T_f = 1450^\circ C$, $T_{imp} = 20^\circ C$, $u = 10 mm.s^{-1}$ ainsi qu'avec les points de contrôle du tableau 1. Les composantes non contraintes à déterminer des points de contrôle sont notées $X = [P_{00x}, P_{03x}, P_{01y}, P_{02y}, P_{10x}, P_{13x}, P_{11y}, P_{12y}, P_{20x}, P_{23x}, P_{21y}, P_{22y}]$ (en gris dans le tableau).

	P_{00}	P_{01}	P_{02}	P_{03}	P_{10}	P_{11}	P_{12}	P_{13}	P_{20}	P_{21}	P_{22}	P_{23}
x	-0.006	-0.006	0.004	0.004	-0.0075	-0.0075	0.005	0.005	-0.009	-0.009	0.006	0.006
y	0	0.006	0.006	0	0	0.006	0.009	0	0	0.008	0.01	0
z	0	0.	0	0	0.0015	0.0015	0.0015	0.015	0.003	0.003	0.003	0.003

Tableau 1 : Points de contrôle de la surface de Bézier décrivant l'interface Γ_f

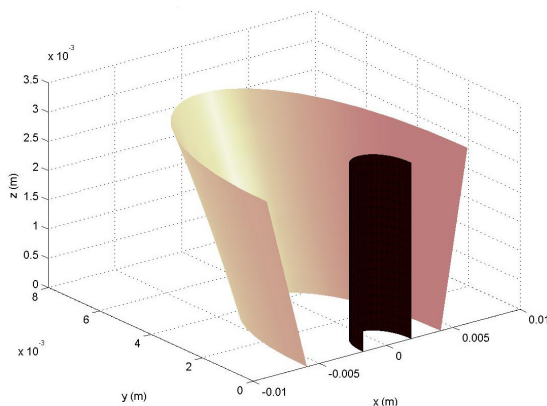


Figure 4 : Front de fusion initial (foncé) et front de fusion théorique (clair).

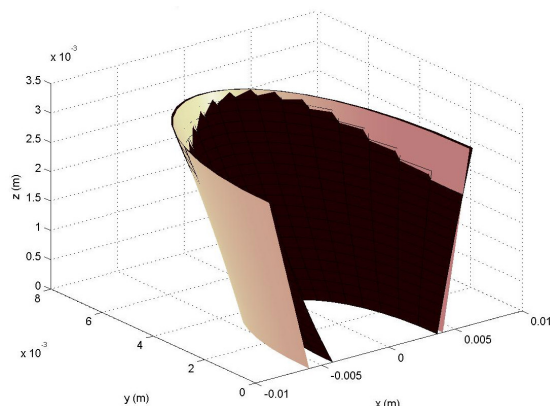


Figure 5 : Comparaison entre les fronts de fusion théorique et estimé

Afin d'analyser l'influence des paramètres initiaux sur la convergence de la procédure d'optimisation, différents tests ont été réalisés qui ont conduit à la forme présentée en noir sur la figure 4. Le critère d'écart est construit avec 100 points de mesure relevés sur la face endroit à $y_{ic}^{ed} = 7,5 mm$ et autant sur la face envers à $y_{ic}^{ev} = 5,5 mm$ (figure 3b). L'algorithme de minimisation après 40 itérations conduit aux résultats des figures 4 et 5 pour un critère final de $\sqrt{S} / \Delta T_{\max} = 0.4\%$ où $\Delta T_{\max} = 1331K$.

4. Application expérimentale

Des lignes de fusion instrumentées ont été réalisées sur deux types d'acier inoxydables dans le cadre des travaux de V. Hamel [4]. On présente un exemple de résultats obtenus dans une configuration, dite débouchante, pour un acier de type 304L. Le domaine spatial est défini par $L_x = 300mm, L_y = 50mm, e = 2,1mm$ et $L_1 = 9L_2$. Le paramétrage de l'interface Γ_f et l'initialisation de l'algorithme sont effectués selon la méthode décrite ci-dessus. Les signaux de deux thermocouples, TC1 sur la face endroit ($y^{ed} = 6.26mm$) et TC5 ($y^{ev} = 3.99mm$) sur la face envers sont utilisés. De plus, la fenêtre temporelle et donc la zone de mesure selon la direction Ox sont définies par rapport aux analyses de sensibilité. Enfin, un protocole a été développé pour recalibrer au mieux la position initiale de la torche par rapport aux thermogrammes expérimentaux.

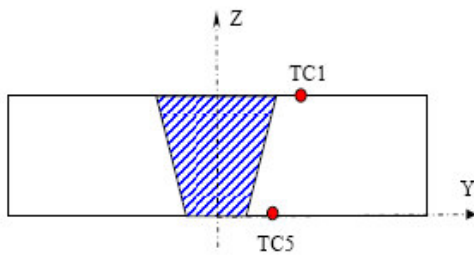


Figure 6 : Disposition des thermocouples en cas débouchant.

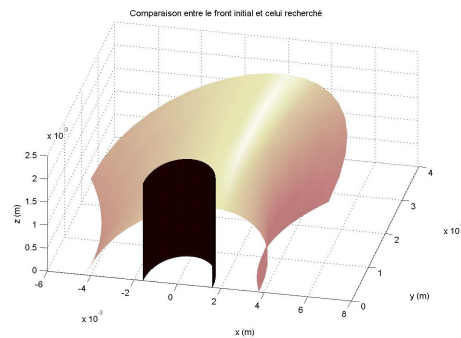


Figure 7 : comparaison entre les fronts de fusion initial (foncé) et estimé (clair).

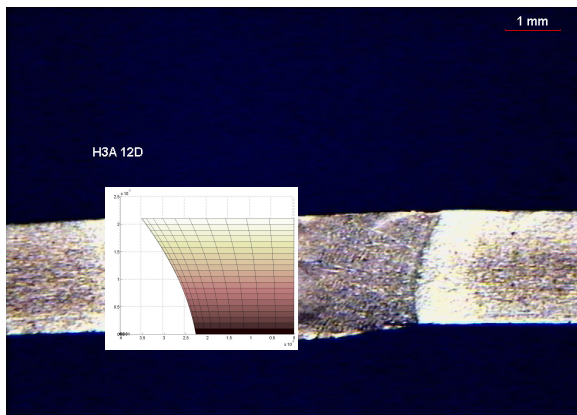


Figure 8 : Comparaison entre le front de fusion estimé et celui mesuré par macrographie.

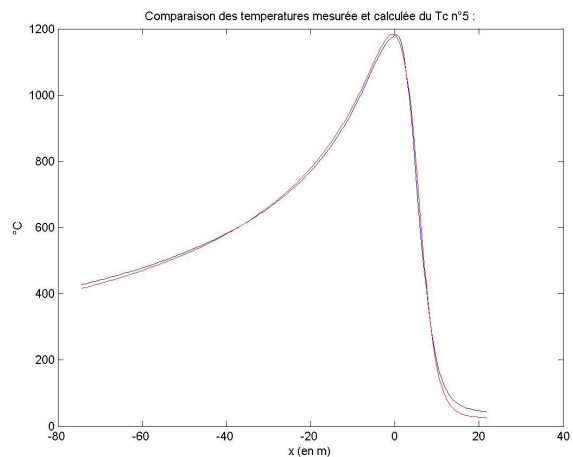


Figure 9 : Comparaison entre températures estimées et mesurées par TC5.

Les caractéristiques thermophysiques du solide sont choisies, dans une première approche, indépendantes de la température : $\lambda_s = 23.5Wm^{-1}K^{-1}$, $\rho_s C_p = 4.5 \cdot 10^6 Jm^{-3}K^{-1}$, $u = 2 mm.s^{-1}$, $T_{imp} = 25^\circ C$, $T_f = 1450^\circ C$, $h = 24.1Wm^{-2}K^{-1}$

Les dimensions alors obtenues de la zone fondue (figures 7&8) sont comparées aux valeurs mesurées par macrographie: longueur face endroit 10,9mm au lieu de 10 mm ($\pm 1,2mm$), largeur face endroit : 7,01mm au lieu de 5,6mm ($\pm 0,6mm$), longueur face envers :

7,99mm au lieu de 7,7mm ($\pm 1,2$ mm), largeur face envers : 4,51mm au lieu de 4,8mm ($\pm 0,8$ mm). Ces résultats montrent un bon accord entre l'expérience et le calcul au point de validation. Pour la largeur, nous notons que les dimensions calculées sur la face envers sont meilleures que celles sur la face endroit vis-à-vis de la mesure expérimentale. L'erreur relative maximale sur la température est de l'ordre de 4% (50°C sur 1200°C). La figure 7 montre la forme 3-D estimée du front de fusion. La projection de cette surface dans le plan Oyz donne une forme estimée de la coupe macrographique (Figure 8). On note une bonne adéquation entre ces deux formes ainsi qu'entre les températures mesurées et calculées (figure 9). D'autres résultats expérimentaux sont présentés dans [3].

5. Conclusions et perspectives

Une approche originale a été développée avec succès pour l'identification de la forme de l'interface de changement de phase et l'estimation du champ de température dans la région solide des pièces à assembler lors d'une opération de soudage. Le problème est formulé comme un problème inverse géométrique et résolu itérativement en minimisant un critère de moindres carrés. L'avantage majeur de cette approche est le petit nombre de paramètres à estimer ce qui par conséquent diminue le nombre de points de mesure nécessaire. La méthode a été appliquée à des configurations de soudage TIG débouchant de faible épaisseur. L'application pour d'autres procédés de soudage et en particulier pour des configurations de fortes épaisseurs fait l'objet de travaux en cours.

Références

- [1] A. Zacharia, S. David, J. Vitek, and T. Debroy, *Weld pool development during GTA and Laser Beam Welding of type 304 stainless steel*, part 11, experimental correlation, *Welding J.*, Vol. 68, (1989) pp. 510-519.
- [2] M. Thompson and J. Szekely, *The transient behavior of weld pool with a deformed free surface*, *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 32, (1989) pp. 1007-1019.
- [3] D. D. Doan, *Modèle de source de chaleur pour la simulation du soudage avec et sans apport de matière*, Mémoire de thèse, Université de Nantes, 2006.
- [4] V. Hamel : *Caractérisation de l'apport de chaleur lors du soudage TIG d'une tôle en acier inoxydable (321&304L)*, Mémoire de DRT (Diplôme de Recherche Technologique), Université de Nantes, 2003.
- [5] M. Necati Özisik, Helcio R. B. Orlande, *Inverse heat transfer fundamentals and applications*, (2000) Taylor & Francis.