

Analyse du transfert de chaleur dans une opération de soudage en utilisant les surfaces de Bézier - Comparaison de deux méthodes de simulation

Duc Dung DOAN¹, Franck GABRIEL², Yvon JARNY³, Philippe LE MASSON^{4*}, Morgan DAL⁴

^{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 LIMATB Université de Bretagne du Sud, Rue de Saint Maudé, BP 92116, 56321 Lorient Cedex.

*(auteur correspondant : philippe.le-masson@univ-ubs.fr)

Résumé – Cet article développe une méthode pour estimer la forme du bain fondu en régime quasi-stationnaire dans un procédé de soudage. 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. Dans ce cadre, une comparaison de cette méthode avec une méthode plus classique de source équivalente est réalisée permettant de montrer que dans les deux cas le flux transmis à travers la zone fondue est identique.

Mots clés : 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, y_m, z_m	Coordonnées 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. La simulation complète de ce type de procédé implique de nombreux domaines de la physique et reste à ce jour impossible dans un cadre industriel. Pour cette raison, des simulations introduisant des termes sources équivalents ont été développées. Ainsi, l'application des techniques inverses à ce type de problème permet de définir le chargement thermique à travers l'estimation des paramètres de ce terme source. La thèse de

D. Doan [3] rappelle à travers une étude bibliographique ces différentes approches. De plus, ce travail a conduit au développement d'une nouvelle méthode visant à identifier la forme de l'interface liquide-solide et à estimer la distribution de la température dans le solide. Le travail présenté ici est une application 3D de cette méthode. Il a pour but de montrer comment l'estimation de la forme de la zone fondue, définie par une surface isotherme, permet aussi de décrire la distribution du flux qui diffuse de la zone fondue vers la zone solide.

2. Formulation du problème

2.1. Schéma du procédé de soudage [3]

Généralement, la torche de soudage, possédant une intensité suffisante pour réaliser la fusion, se déplace à vitesse constante u le long de l'axe Ox, Figure 1, et forme un bain de fusion qui se déplace à la même vitesse.

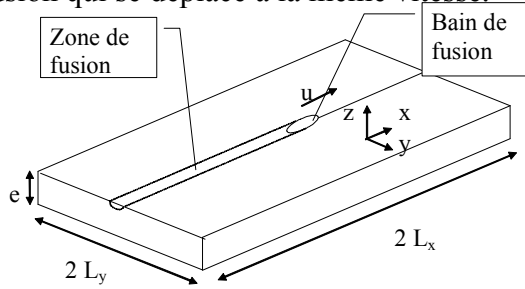


Figure 1 : Schéma de la plaque mince

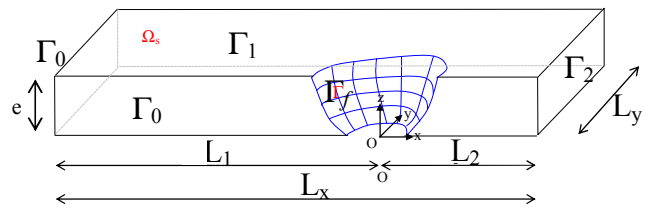


Figure 2 : Schéma du domaine de calcul

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 [3].

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 en s'affranchissant de la modélisation des transferts dans la région liquide. De plus, (figure 3a), en régime quasi stationnaire, les relevés de température Y^m aux

instants t_m , d'un seul thermocouple positionné dans la zone solide, sont équivalents aux relevés effectués aux emplacements $x_m = u \times t_m$ dans le repère mobile, les coordonnées (y_m, z_m) étant inchangées. On peut donc disposer avec un seul (ou plusieurs) capteur(s), d'un lot de M informations additionnelles nécessaire à la formulation du problème inverse. Celui-ci consiste à minimiser une fonction coût construite sur l'écart entre les températures mesurées Y^m et celles calculées $T(x_m, y_m, z_m; \Gamma_f)$ avec la forme Γ_f que l'on cherche à estimer :

$$S(\Gamma_f) = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M [T(x_m, y_m, z_m; \Gamma_f) - Y^m]^2 \quad (3)$$

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 [4] est utilisé afin de corriger les coordonnées des points de contrôle de la surface de Bézier.

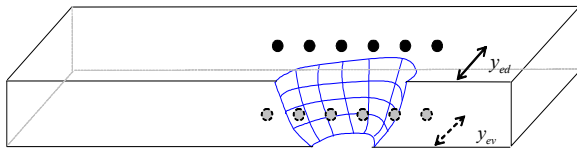


Figure 3a Schéma d'emplacement des points de mesure.

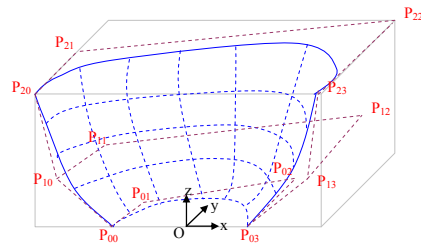


Figure 3b La surface de Bézier d'ordre 3 et ses points de contrôle.

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

$$P(u, v) = \sum_{i=0}^m \sum_{j=0}^n P_{ij} B_i^m(u) B_j^n(v), \quad (u, v) \in [0, 1] \times [0, 1] \quad (4)$$

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. En effet certaines coordonnées des points de contrôle sont 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 $\{P_{ij}, i=1, \dots, 3; j=1, \dots, 4\}$, soit $\dim(X)=36$ paramètres, et permet de décrire très convenablement la forme des bains 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 , ce qui entraîne les

six relations suivantes : $P_{21x} = P_{20x}, P_{22x} = P_{23x}, P_{01x} = P_{00x}, P_{02x} = P_{03x}, P_{11x} = P_{10x}, P_{12x} = P_{13x}$. L'épaisseur de la plaque étant faible, la coordonnée en z des points $P_{10}, P_{11}, P_{12}, P_{13}$ est fixée à $z = 0,5 e$. Ainsi, la taille du vecteur X est réduite de 36 à 12.

3. Résultats numériques

En vue d'optimiser la méthode, une étude de sensibilité aux différents paramètres intervenant dans le modèle a été réalisée [3]. De plus, plusieurs simulations ont été effectuées 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 : $h = 24.1 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$, $L_y = 40 \text{ mm}$, $L_x = 300 \text{ mm}$, $e = 3 \text{ mm}$, $\rho_s c_p = 4000000 \text{ J.m}^{-3}.\text{K}^{-1}$, $\lambda_s = 50 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$, $T_f = 1450^\circ\text{C}$, $T_{imp} = 20^\circ\text{C}$, $u = 10 \text{ mm.s}^{-1}$ 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

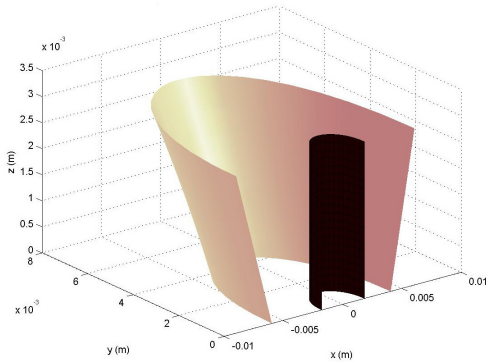


Figure 4 : Front de fusion initial (foncé) et front de fusion théorique (clair).

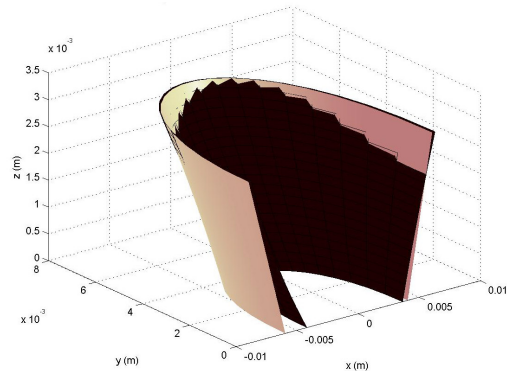


Figure 5 : Comparaison entre les fronts de fusion théorique et estimé

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 $y_{tc}^{ed} = 7,5 \text{ mm}$ et autant sur la face envers à $y_{tc}^{ev} = 5,5 \text{ mm}$ (figure 3b). L'algorithme de minimisation après 40 itérations conduit aux résultats des figures 4 et 5 pour une valeur finale du critère : $\sqrt{S} / \Delta T_{\max} = 0.4\%$ (avec $\Delta T_{\max} = 1331\text{K}$).

4. Validation du flux transmis au solide

Afin de valider la méthode de simulation utilisant cette limite de zone fondue et surtout de valider le flux transmis à la partie solide, les résultats sont comparés à ceux obtenus suivant l'approche de la source volumique équivalente de type gaussien.

La démarche tout d'abord a été de réaliser avec le logiciel Eléments Finis Comsol®, une simulation du champ thermique dans la zone solide, avec les caractéristiques suivantes :
 $h=10Wm^{-2}K^{-1}$, $Ly=150mm$, $Lx=600mm$, $e=1cm$, $\rho_s c_p = 2887500J.m^{-3}.K^{-1}$,
 $\lambda_s = 30W.m^{-1}.K^{-1}$, $T_f = 1450^\circ C$, $T_{imp} = 20^\circ C$, $u = 1 mm.s^{-1}$. Pour simuler la puissance apportée par la torche, un terme source $P = 5 \cdot 10^9 \exp(-3(x^2+y^2))$ a été appliqué sur le volume centré en $(x=0, y=0)$, défini par $dx=6mm$, $dy=3mm$, $dz=1cm$. La puissance totale transmise au solide par ce terme source, obtenue en intégrant P sur ce volume, est alors $\Phi=899,9W$ et les dimensions de la zone fondue sont : longueur = $13,9mm$ et largeur = $5,7mm$.

Le choix de faibles valeurs pour la vitesse u et le coefficient de transfert h est justifié par l'idée de limiter le nombre de paramètres à estimer, on obtient en effet une forme de zone fondue plutôt cylindrique, dont les 12 points de contrôle ne comportent que 3 paramètres (P1, P4 et P8) à estimer, selon le tableau 2.

	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	P1	P1	P4	P4	P1	P1	P4	P4	P1	P1	P4	P4
y	0	P8	P8	0	0	P8	P8	0	0	P8	P8	0
z	0	0	0	0	0.005	0.005	0.005	0.005	0.01	0.01	0.01	0.01

Tableau 2 : Points de contrôle de la surface de Bézier

Les relevés des températures Y^m qui servent de données d'entrée au problème inverse, ont été pris aux emplacements suivants :

$$y_m = 8mm, -8mm < x_m < 62mm \text{ et } z_m = 0mm, 5mm \text{ et } 1cm$$

La minimisation du critère d'écart (4) est obtenue selon l'algorithme de Levenberg-Marquardt codé sous Matlab®, couplé à Comsol®. La figure 6 présente l'évolution des paramètres lors de l'estimation. On observe que 5 itérations sont suffisantes pour obtenir la convergence. La valeur finale de S est alors égale à $0,97^\circ C$ pour une variation maximale de température de $1230^\circ C$, figure 7. Les valeurs estimées des paramètres sont $P1=-0,00386$, $P4=0,01008$ et $P8=0,00768$. On a pu vérifié ainsi que la forme $\Gamma_f(X)$ reconstruite correspond en tout point à l'isotherme $1450^\circ C$, calculée selon la méthode de la source équivalente.

Le dernier point de comparaison concerne le flux de chaleur transmis à la zone solide par la zone fondue. La figure 8 présente la distribution estimée de la densité de flux de chaleur dans la direction normale à la surface de Bézier. On notera que cette surface étant définie de façon analytique, la direction normale s'obtient en tout point sans approximation. La forme étant cylindrique, nous observons que cette distribution est uniforme suivant la direction verticale Oz . Ensuite, une comparaison du gradient de température, calculé selon les deux méthodes de simulation en parcourant l'isotherme $T=1450^\circ C$ sur une même cote z , montre une excellente adéquation, figure 9. Finalement, en intégrant cette densité de flux sur toute la forme définie par la surface de Bézier, on obtient une valeur de la puissance transmise vers la zone solide, égale à $891,43 W$, soit un écart de $0,9\%$ par rapport à la valeur choisie pour la simulation avec la source volumique gaussienne.

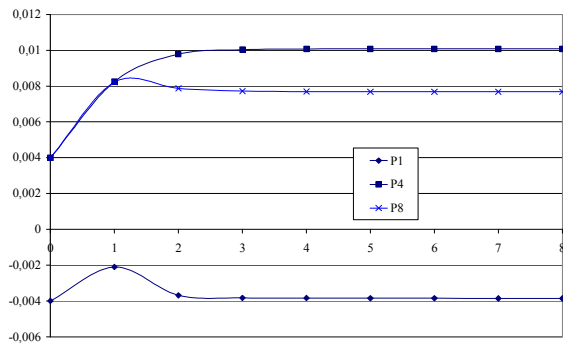


Figure 6 : Résultat de l'estimation.

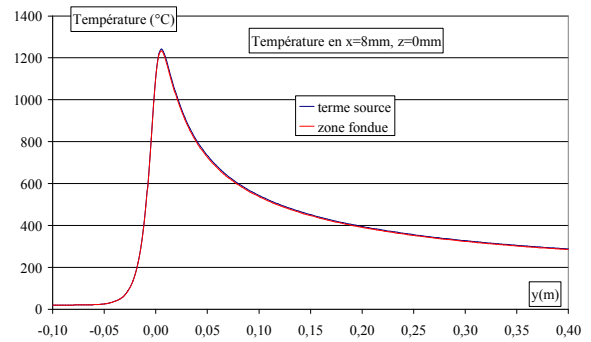


Figure 7 : Comparaison des thermogrammes.

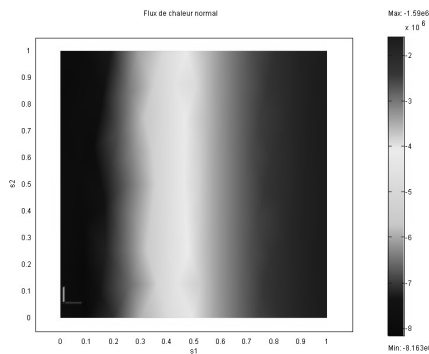


Figure 8 : Répartition du flux sur la forme de la zone fondue.

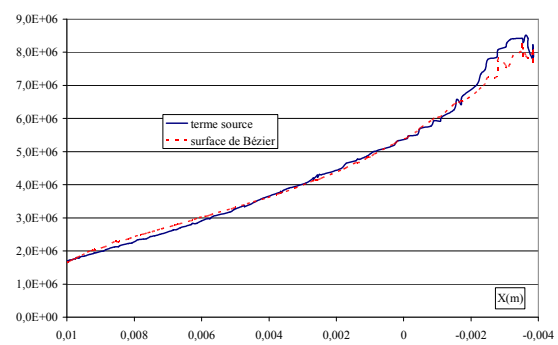


Figure 9 : Gradient de température en fonction de la direction d'avance de la source.

5. Conclusions et perspectives

Une approche originale utilisant le concept de surfaces de Bézier et qui évite toute hypothèse sur les transferts de chaleur dans la zone de fusion, 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, en régime quasi-stationnaire. 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. Cette approche a été comparée à une simulation plus classique utilisant un terme source volumique de type Gaussien, ce qui a permis ainsi de valider la distribution de la densité de flux de chaleur transmis à travers l'interface estimée. L'application industrielle de ce type d'approche pour des procédés de soudage « TIG » a été réalisée avec succès [3]. 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] M. Necati Özisik, Helcio R. B. Orlando, *Inverse heat transfer fundamentals and applications*, (2000) Taylor & Francis.