

# Une nouvelle approche pour la simulation du bain fondu au cours de soudage laser

Y. Saadlaoui<sup>1</sup>, E. Feulvarch<sup>1</sup>, A. Delache<sup>2</sup>, J-B. Leblond<sup>3</sup>, J-M. Bergheau<sup>1</sup>

<sup>1</sup> LTDS, ENISE, Univ Lyon, {yassine.saadlaoui,eric.feulvarch,jean-michel.bergheau}@enise.fr

<sup>2</sup> LMFA, UJM, Univ Lyon, alexandre.delache@univ-st-etienne.fr

<sup>3</sup> Institut Jean-Le-Rond-d'Alembert, Univ Sorbonne-Paris, jbl@lmm.jussieu.fr

**Résumé** — Dans le cadre de ce travail, une nouvelle approche est proposée pour simuler la formation du bain fondu au cours des procédés thermomécaniques (soudage, fabrication additive...). Elle permet de prendre en compte les écoulements du fluide à travers les deux effets de la tension de surface ("effet de courbure" et "effet Marangoni") et la flottabilité. Une approche ALE est utilisée afin de suivre l'évolution de la surface libre. Comme application, une simulation thermo-fluide du soudage laser est réalisée. Les résultats obtenus (vitesse d'écoulement et évolution de la surface libre) montrent une bonne cohérence avec les résultats de la littérature.

**Mots clés** — Méthodes numériques, Bain de soudage, écoulements du fluide, tension de surface, surface libre, soudage laser.

## 1 Introduction

Le soudage laser est un procédé multi-physique qui met en jeu des températures élevées et dont les conséquences métallurgiques et mécaniques doivent être contrôlées afin de garantir une bonne qualité (état de surface, durée de vie...) des pièces soudées. Plusieurs travaux expérimentaux ont montré que les caractéristiques finales de ces pièces sont très sensibles aux paramètres de soudage. L'optimisation de ces paramètres est donc une étape indispensable pour obtenir des pièces de haute qualité. Les essais expérimentaux peuvent être utilisés comme un moyen d'optimisation. En revanche, ils sont généralement longs à mettre en oeuvre et très coûteux. Dans ce contexte, la simulation numérique présente un intérêt tout particulier pour optimiser les paramètres du procédé, et prévoir les caractéristiques finales des pièces soudées pour un coût et dans un temps raisonnables.

En fonction des objectifs de la simulation, différentes approches ont été développées. Ces approches peuvent être classées en deux groupes, comprenant respectivement des simulations thermomécaniques pour prédire les conséquences métallurgiques et mécaniques induites par ces procédés, et des simulations du processus lui-même en intégrant les écoulements du fluide dans le bain fondu. L'industrie a joué un grand rôle dans le développement des simulations thermomécaniques, car elles ont pour objectif d'estimer les contraintes et les déformations résiduelles [1], fournissant ainsi des informations très utiles pour l'optimisation du procédé et la prédiction de la durée de vie en fatigue des pièces fabriquées. La partie thermique de ce type de simulation est généralement simplifiée afin de réduire le temps de calcul [2]. L'apport de chaleur est alors représenté par une source de chaleur équivalente, dont les paramètres doivent être préalablement identifiés sur les zones affectées thermiquement observées expérimentalement. La simulation thermomécanique est donc réalisée en deux étapes : une simulation couplée thermo-métallurgique, suivie d'un calcul mécanique tenant compte des températures et des phases métallurgiques calculées précédemment. Ce type de simulation n'est pas totalement prédictif en ce qui concerne les distributions de température. Leur prédiction exige en effet de simuler soigneusement les écoulements du fluide, qui joue un rôle important, notamment sur la morphologie de la zone fondue. Plusieurs auteurs ont donc développé des approches numériques, dont le but est de simuler les phénomènes physiques impliqués par le processus lui-même [3]. Parmi ces phénomènes, les écoulements du fluide dans le bain de fusion, liés en particulier à la tension de surface (effet Marangoni), ont un effet direct sur le champ de température et la morphologie du bain fondu [3] [4].

Dans ce contexte, l'objectif de ce papier est de proposer une nouvelle approche pour la simulation de la formation du bain fondu au cours de soudage laser. Elle permet de prendre en compte les écoulements du fluide à travers les deux effets de la tension de surface ("effet de courbure" et "effet Marangoni") et la flottabilité. La méthode développée par Leblond et al. [5] est utilisée pour modéliser la tension de surface. Elle permet de prendre en compte ces deux effets avec une manière simple et efficace par rapport les approches classiques. Une approche ALE est utilisée afin de suivre l'évolution de la surface libre en dessus du bain de soudage.

## 2 Simulation thermo-fluide de soudage laser

### 2.1 Modèle numérique

La pièce à souder est un bloc de longueur  $20\text{mm}$ , de largeur  $10\text{mm}$  et de hauteur  $3\text{mm}$ . La pièce dispose d'une symétrie suivant le plan  $YZ$ . Pour cela, seule la moitié de la structure est modélisée. Le maillage donné par la figure 1 se compose de 179544 éléments tétraédriques linéaires ( $P1 + /P1$ ), 22392 éléments triangulaires linéaires (éléments de peau) et 34983 noeuds. Dans la zone fluide, la taille d'éléments est de  $200\mu\text{m}$  et dans la zone solide, elle peut aller jusqu'à  $5000\mu\text{m}$ . Le matériau utilisé est l'acier inoxydable 316L dont les propriétés varient en fonction de la température.

Le temps de calcul de la phase de chauffage est de  $0,8\text{s}$  comprenant  $0,4\text{s}$  de création du bain (sans écoulements du fluide) et  $0,4\text{s}$  d'avance des sources de chaleur en prenant en compte les écoulements du fluide. Le pas de temps utilisé pour le calcul est de  $0,1\text{s}$  durant la phase de chauffage et  $2.10^{-4}\text{s}$  après l'activation des écoulements.

Deux sources de chaleur, une volumique double ellipsoïdale et une surfacique gaussienne, sont utilisées pour réaliser un cordon de soudage. La vitesse de soudage est de  $6\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$ . L'échange de la pièce avec l'extérieur se fait par convection et par rayonnement sur toutes les faces de la pièce sauf sur le plan de symétrie où une condition de flux nul est imposée. Le flux à la surface est donné par les expressions suivantes :

$$\phi = \phi_{convection} + \phi_{radiation} \quad (1)$$

avec

$$\phi_{convection} = h(T - T_0) \quad (2)$$

$$\phi_{radiation} = \epsilon \sigma_0 (T^4 - T_0^4) \quad (3)$$

où  $h = 40\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$  est le coefficient d'échange,  $T_0 = 293\text{K}$  est la température ambiante,  $\sigma_0$  désigne la constante de Stefan-Boltzmann. Au cours de la simulation thermo-fluide, dans la zone où la température est inférieure à la température du solidus, les éléments sont supposés posséder une viscosité dynamique élevée  $\mu = 10^6\text{Kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$ . Les éléments dans la zone fondue, où la température est supérieure à la température du Liquidus, présentent une viscosité dynamique égale à  $\mu = 6,2\cdot 10^{-2}\text{Kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$ . Les écoulements du fluide sont pris en compte à travers la tension de surface et la force de flottabilité. Une tension de surface variable en fonction de la température  $\gamma = \gamma_L + \alpha(T - T_L)$  avec  $\gamma_L = 0,45\text{N}\cdot\text{m}^{-1}$ ,  $T_L = 1500\text{ }^\circ\text{C}$  et  $\alpha = 2\cdot 10^{-4}\text{N}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$  permet d'intégrer les deux effets de la tension de surface (effets de courbure et de Marangoni). Nous notons que l'élément tétraédrique linéaire enrichi P1+/P1 est utilisé au cours de cette simulation.

### 2.2 Résultats

La simulation thermo-fluide donne comme résultats l'évolution de la température, la distribution de vitesse d'écoulement du fluide et la morphologie du bain fondu au cours du procédé de soudage.

#### 2.2.1 Champ de température

Initialement, la température de la pièce est uniforme et fixée à  $20\text{ }^\circ\text{C}$ . Au cours de la simulation thermo-fluide, la température est le paramètre qui pilote l'apparition et la propagation de la zone fluide. Cette zone va apparaître au cours de chauffage et elle va suivre le déplacement de la source de chaleur.

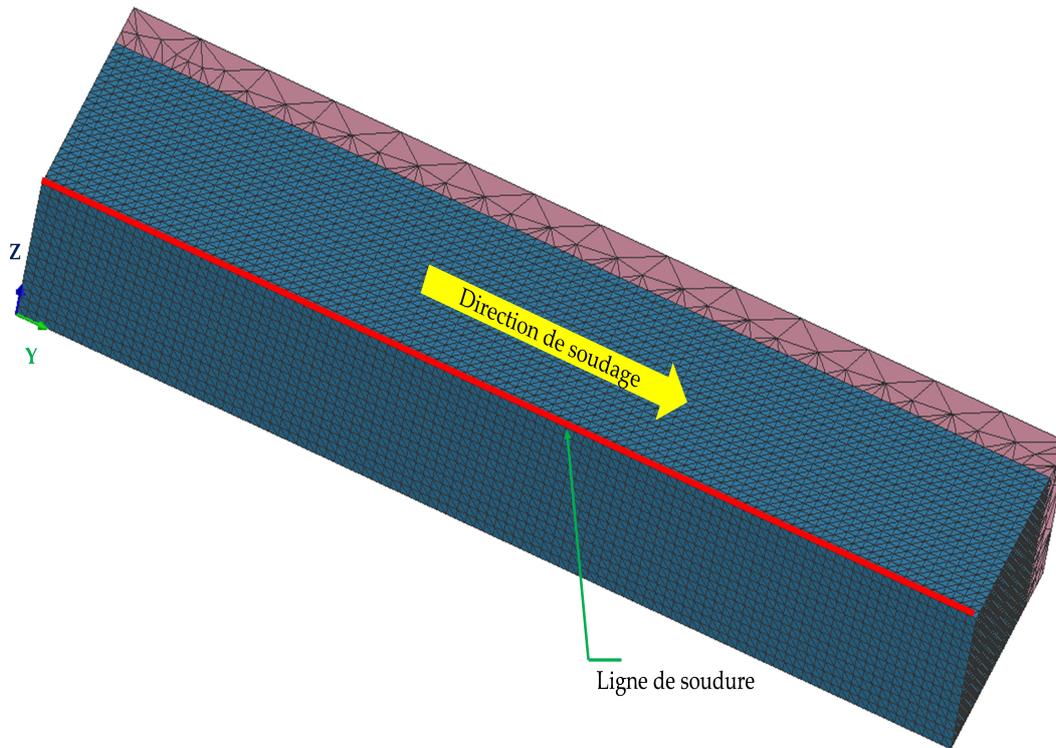


FIGURE 1 – Maillage.

Les figures 2 et 3 montrent les isovaleurs de la température pour différents instants de la simulation thermo-fluide.

### 2.2.2 Champ de vitesse

Les résultats du champ de vitesse de l'écoulement dans la zone fondue sont donnés à différents instants par les figures 4 et 5.

### 2.2.3 Surface libre

La figure 6 présente l'évolution de la surface libre à différents instants.

### 2.2.4 Effet des écoulements du fluide sur l'évolution de la température

Plusieurs travaux montrent que les écoulements du fluide dans le bain fondu ont des effets flagrants sur l'évolution de la température et donc sur la morphologie de la zone fondue [3]. La figure 7 illustre le champ de température issu de la simulation thermo-fluide. Ces résultats sont comparés à ceux d'une simulation purement thermique (sans écoulements du fluide) avec les mêmes données. Il est intéressant, en plus des isovaleurs, de tracer l'évolution de la température sur la ligne de soudure afin d'étudier l'effet des écoulements sur la longueur du bain. La figure 8 donne les évolutions de la température au cours du temps des deux simulations.

## 2.3 Discussions

Nous remarquons (figure 3) que la température commence à baisser après l'activation des écoulements du fluide (à partir de  $t = 0,4s$ ). Cette baisse est due au transfert par convection généré par les écoulements dans le bain fondu. Nous notons aussi que la température maximale est très élevée (environ  $3200\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) par rapport à celle d'un procédé de soudage (l'objectif ici est d'avoir une grande zone fondue).

La vitesse maximale est d'environ  $0,3m.s^{-1}$ . Cette valeur coïncide avec les valeurs trouvées dans la littérature [6]. La vitesse d'écoulement est engendrée principalement par l'effet Marangoni qui est dominant dans ce type de procédé. En effet, la vitesse générée par la flottabilité est de l'ordre de  $0,03m.s^{-1}$ .

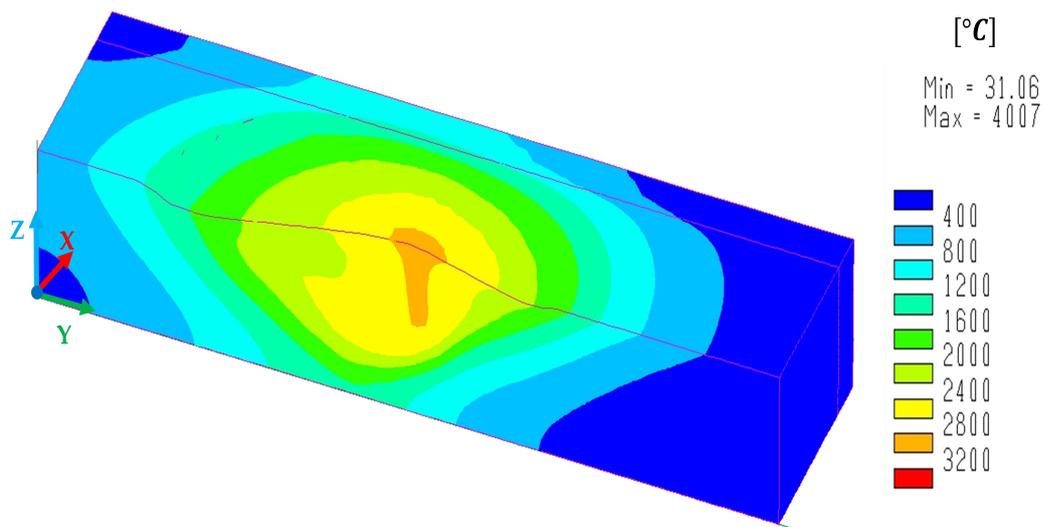


FIGURE 2 – Distribution de la température à  $t = 0,55 s$  sur le maillage déformé sous l'effet de la surface libre.

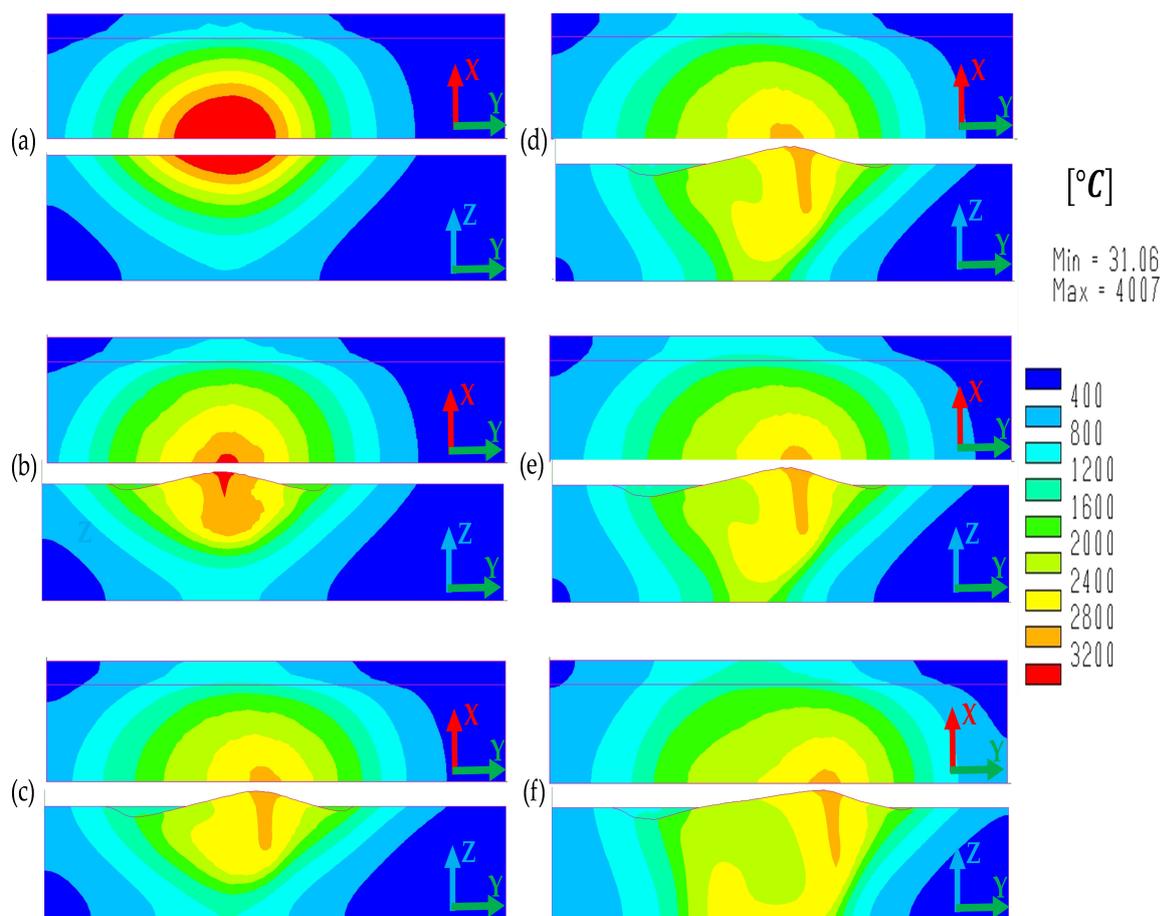


FIGURE 3 – Évolution de la distribution de température : (a)  $t = 0,4 s$ ; (b)  $t = 0,44 s$ ; (c)  $t = 0,5 s$ ; (d)  $t = 0,55 s$ ; (e)  $t = 0,6 s$ ; (f)  $t = 0,8 s$ .

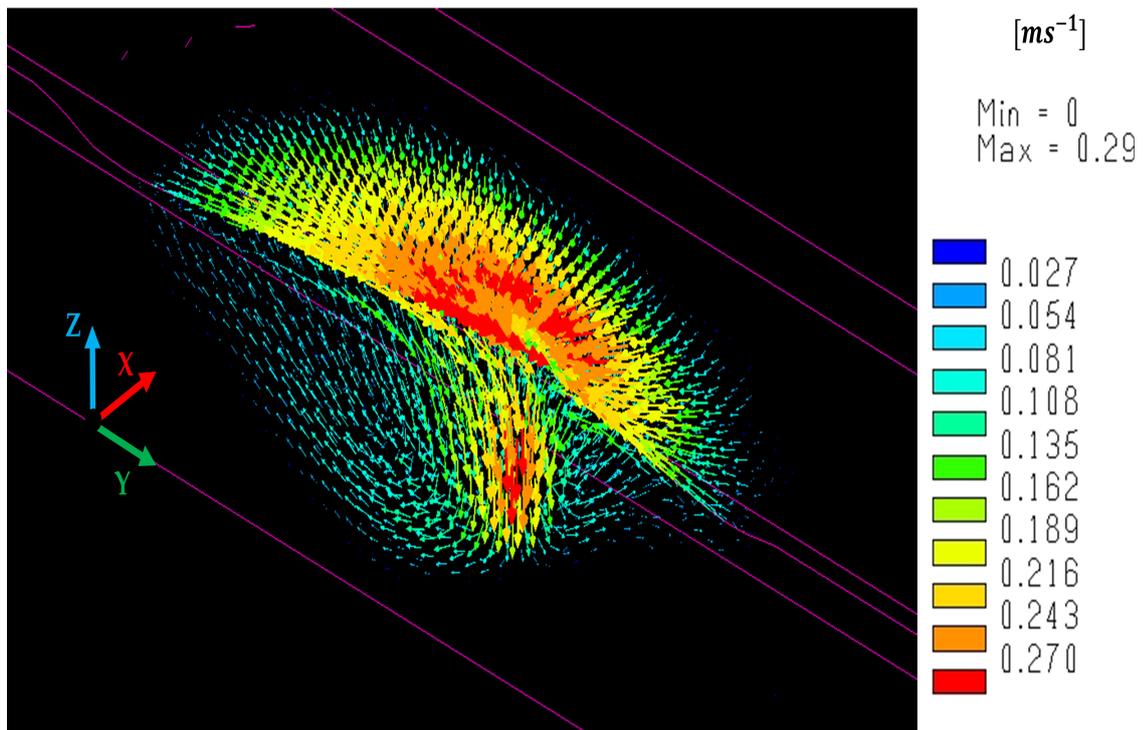


FIGURE 4 – Distribution de la vitesse d'écoulement du fluide à  $t = 0,55s$  sur le maillage déformé sous l'effet de la surface libre.

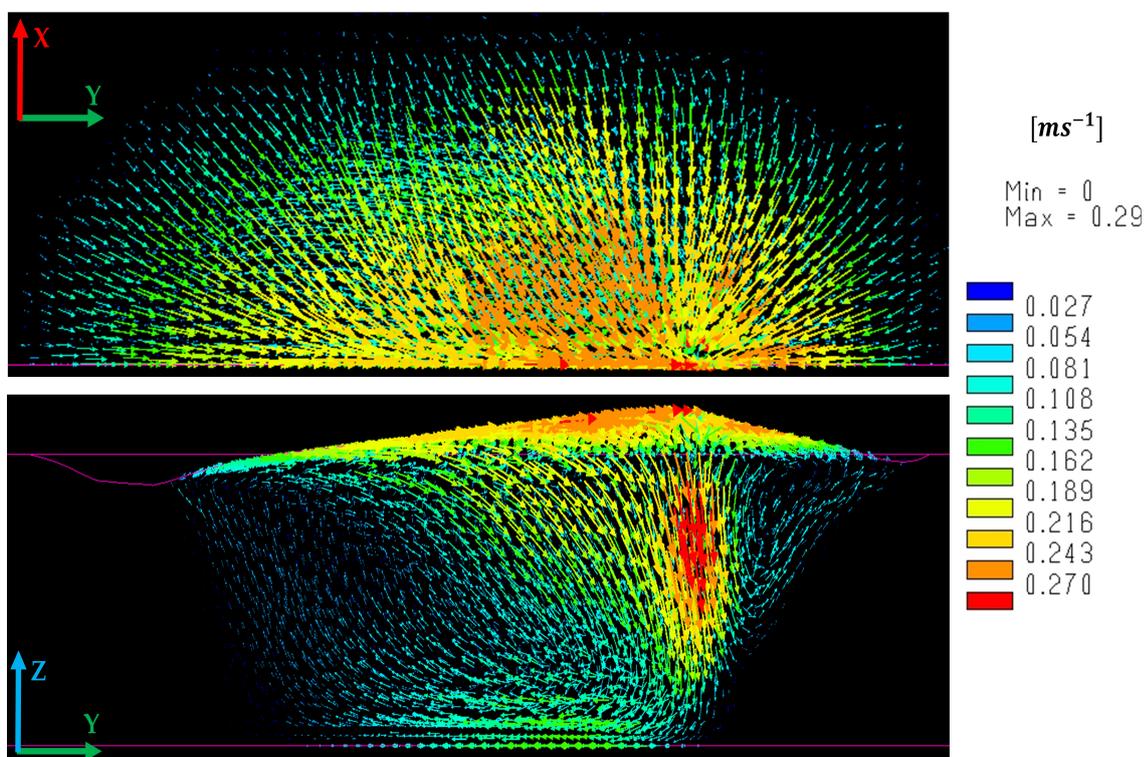


FIGURE 5 – Distribution de la vitesse d'écoulement du fluide à  $t = 0,8s$ .

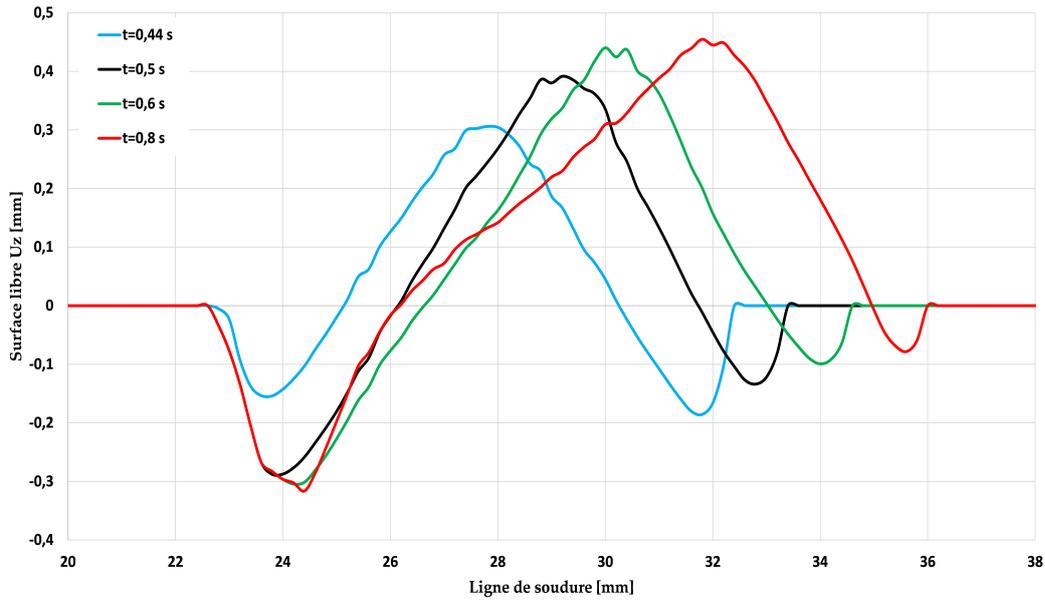


FIGURE 6 – Déplacement de la surface libre sur la ligne de soudure.

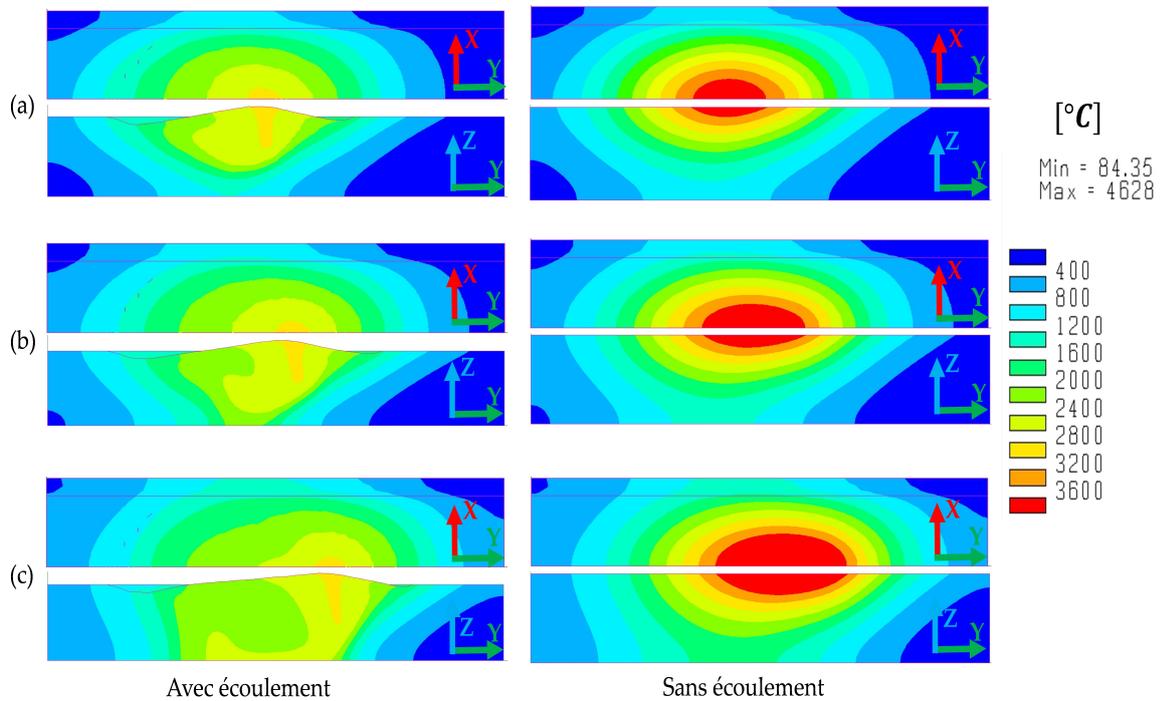


FIGURE 7 – Évolution de la distribution de la température au cours des simulations thermo-fluide et purement thermique : (a)  $t = 0,5 s$ ; (b)  $t = 0,6 s$ ; (c)  $t = 0,8 s$ .

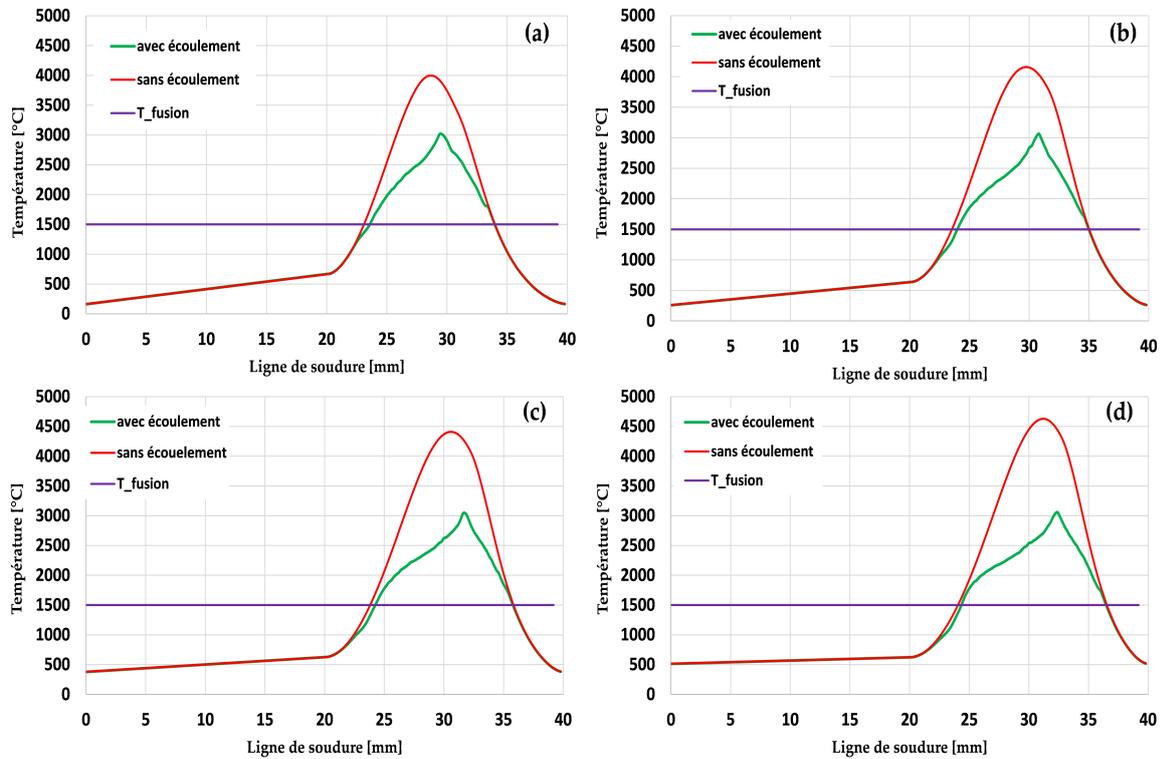


FIGURE 8 – Effet d'écoulement du fluide sur l'évolution de la température le long de la ligne de soudure : (a)  $t = 0,6s$ ; (b)  $t = 0,8s$ ; (c)  $t = 0,7s$ ; (d)  $t = 0,8s$ .

Elle est donc dix fois inférieure à celle engendrée par l'effet Marangoni. La direction de vitesse d'écoulement (figures 4-5) montre bien qu'un gradient positif de la tension de surface déplace la matière vers le centre du bain fondu.

Comme le montre la figure 6, la surface libre a une forme convexe en dessous de la source de chaleur. Ceci s'explique par le gradient positif de la tension de surface qui entraîne la matière vers le centre du bain fondu. Le déplacement maximal de la surface libre sur la ligne de soudure est d'environ  $0,4mm$ . Cette valeur est cohérente avec les valeurs trouvées dans la littérature [6].

La comparaison des résultats thermiques des deux simulations (thermo-fluide et purement thermique) montre un effet flagrant des écoulements sur l'évolution de la température. Nous constatons une grande chute de la température dans le cas de la simulation thermo-fluide, qui s'explique par le transfert par convection généré par les écoulements dans le bain. En effet, un gradient positif de la tension de surface  $\frac{\partial \gamma}{\partial T} > 0$  ramène la matière la moins chaude depuis les bords vers le centre du bain, point où la matière est la plus chaude. Le gradient positif permet ainsi de créer un bain plus profond et moins large. Ainsi, dans notre exemple à  $t = 0,6s$ , la profondeur du bain atteint  $3mm$  dans la simulation thermo-fluide tandis qu'elle ne dépasse pas  $2,28mm$  dans le cas de la simulation purement thermique.

### 3 Conclusions

Afin d'étudier l'interaction entre l'écoulement du fluide et la déformation du solide au cours de la simulation numérique des processus de soudage, une nouvelle formulation transitoire pour la modélisation numérique d'un bain de soudage a été développée. Elle consiste à prendre en compte les écoulements du fluide dans le bain fondu à travers les deux effets de la tension de la surface et la flottabilité. Dans ce contexte, une nouvelle méthode a été utilisée pour simuler la tension de surface. Elle intègre à la fois la force normale exercée sur la surface libre du bain "effet de courbure" et l'effet tangentiel "effet Marangoni" de manière très simple et efficace par rapport aux méthodes classiques.

Une simulation 3D thermo-fluide du soudage laser a été réalisée. Elle a donnée de bons résultats en termes de vitesse d'écoulement du fluide et d'évolution de la surface libre par rapport aux résultats de la

littérature.

Pour étudier l'effet des écoulements du fluide au cours de la simulation du soudage laser, une comparaison des résultats de deux simulations, une purement thermique (sans écoulements du fluide) et une autre thermo-fluide, ont été réalisées. Cette comparaison a montré une grande influence des écoulements du fluide sur le champ de température et la morphologie du bain fondu. L'effet de ces écoulements sur le champ de température et la morphologie du bain de soudage peut affecter aussi les résultats mécaniques (déformations, contraintes ...). En contrepartie, les déformations du solide dans le métal de base peuvent influencer les écoulements du fluide dans le bain fondu. Dans ce contexte, un travail est en cours pour coupler dans une formulation ALE, les écoulements du fluide dans le bain avec les déformations du solide dans le métal de base.

## Références

- [1] J.-M. Bergheau, J.-B. Leblond, *Coupling between heat flow, metallurgy and stress-strain computations in steels - The approach developed in the computer code SYSWELD for Welding or Quenching, Modeling of Casting, Welding and Advanced Solidification Processes V*, Edited by M. Rappaz, M.R. Ozgu and K.W. Mahin, pp. 203-210, 1991.
- [2] Z. Zhang, P. Ge, G.-Z. Zhao, *Numerical studies of post weld heat treatment on residual stresses in welded impeller*, Int. J. Press. Vessels Piping, pp. 1-14, 2017.
- [3] Y. Saadlaoui, E. Feulvarch, A. Delache, J.-B. Leblond, J.-M. Bergheau, *A new strategy for the numerical modeling of a weld pool*, C. R. Mecanique 346, pp. 999-1017, 2018.
- [4] Y. Saadlaoui, E. Feulvarch, J.-B. Leblond, J.-M. Bergheau, *A PRAGMATIC STRATEGY FOR THE NUMERICAL SIMULATION OF THE FLUID FLOW DURING WELDING PROCESSES*, CILAMCE 2018 CONGRESS AT PARIS, pp. 594-598, 2018.
- [5] J.-B. Leblond, H.-A El Sayed, J.-M. Bergheau, *On the incorporation of surface tension in finite-element calculations*, C. R. Mecanique 341, pp. 770-775, 2013.
- [6] M.-C. Nguyen, *Modélisation et simulation multiphysique du bain de fusion en soudage à l'arc TIG*, PhD thesis, AMU, 2015.