

## L'influence des écoulements de la matière sur l'évolution des contraintes résiduelles durant le procédé de soudage

Y. Saadlaoui<sup>1</sup>, H. Sallem<sup>1</sup>, E. Feulvarch<sup>1</sup>, T. Sayet<sup>2</sup>, J.-B. Leblond<sup>3</sup>, J.-M. Bergheau<sup>1</sup>

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

<sup>2</sup>PRISME, Univ. Orléans, Orléans France, thomas.sayet@univ-orleans.fr

<sup>3</sup>IJLRDA, Université de Pierre et Marie Curie, Paris France, jbl@lmm.jussieu.fr

---

**Résumé** — L'objectif de ce travail est de montrer numériquement, au cours du procédé de soudage, l'influence des écoulements de la matière dans le bain fondu sur l'évolution des contraintes résiduelles générées. Ainsi deux approches numériques différentes sont adoptées afin d'assurer le couplage des différents états de la matière liquide et solide, y compris la solidification dans zone pâteuse. Dans la première approche, les écoulements fluides dans le bain fondu sont modélisés, les différents états de la matière sont couplés en se basant sur un formalisme Arbitrairement Lagrangien Eulérien (ALE). Dans la deuxième approche, les simulations sont réalisées en adoptant une approche Lagrangienne où les écoulements dans le bain fondu ne sont pas pris en compte.

**Mots clés** — Soudage, Bain fondu, Tension de surface.

---

### 1. Introduction

Le soudage est un procédé d'assemblage majeur, largement utilisé dans différents secteurs industriels. Afin de répondre aux enjeux industriels en termes de performance, de sécurité et de fiabilité des assemblages soudés, l'amélioration et l'optimisation continue de ce procédé demeure nécessaire. Dans ce contexte, plusieurs approches de simulation numérique sont développées afin d'améliorer la qualité des assemblages mécano-soudés et de mieux maîtriser les effets induits par ce procédé sur les structures soudées.

Durant le procédé de soudage, les cycles thermiques engendrent des changements de la microstructure du matériau. Ceux-ci peuvent affecter la distribution du champ de température, la morphologie du bain fondu et par la suite la distribution des contraintes résiduelles [1]. D'autres phénomènes physiques liés à la dynamique du bain fondu peuvent affecter aussi ces grandeurs en particulier ceux liés au gradient de la tension superficielle connu sous le nom de « effet Marangoni » (Figure 1).

Ainsi l'objectif de cette étude est de montrer numériquement, les effets des écoulements fluides dans le bain fondu, sur la distribution des phases et des contraintes résiduelles générées. Un modèle de simulation par élément fini 3D représentatif de soudage hybride arc /laser est étudié. Deux approches numériques sont adoptées. Dans la première, une simulation thermo-fluide est réalisée prenant en compte la tension de surface (effet Marangoni) et la flottabilité. Cependant, dans la deuxième approche les écoulements fluides dans le bain fondu sont négligés. Dans les deux approches, un couplage faible entre la thermique, la métallurgie et la mécanique est considéré.

Dans les deux cas, la transition entre les phases liquide et solide est assurée par un couplage faible. Ce dernier consiste à lancer un premier calcul thermique, avec ou sans écoulement. L'état métallurgique est ensuite obtenu à partir du champ de température obtenu. Enfin, pour obtenir les contraintes résiduelles un calcul mécanique élasto-plastique est réalisé en se basant sur les résultats des simulations thermo-métallurgiques [2].

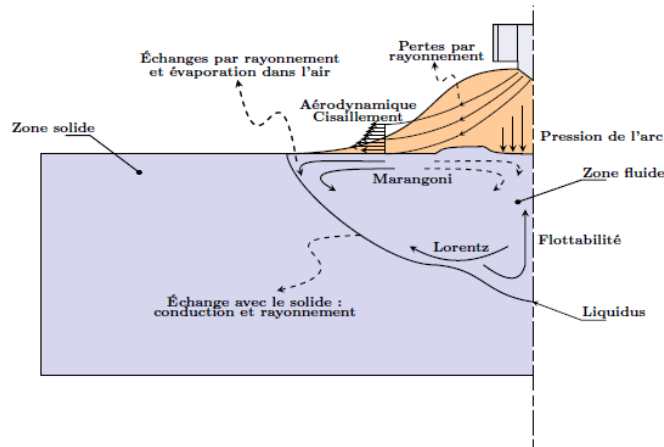


Figure 1 : Schéma simplifié de l'état de matière et des écoulements fluides dans le bain fondu [3]

## 2. Les approches numériques

Deux types de simulations numériques sont réalisés en se basant sur deux approches. La seule différence entre ces deux approches est la considération ou non des écoulements fluides dans le bain fondu. Les deux simulations consistent en plusieurs étapes :

- Durant la deuxième approche (B), un calcul transitoire thermo-métallurgique classique est effectué. Alors que pour la première approche (A), un calcul thermo-fluide-métallurgique est réalisé afin de prendre en compte les écoulements fluides dans le bain fondu. Dans l'approche (A), le liquide est considéré comme un fluide Newtonien, dilatable et thermiquement compressible. Cependant la zone solide est modélisée par un comportement élastique.

- Ensuite, un calcul mécanique est mené prenant en compte les effets thermiques et métallurgiques. Un comportement élasto-plastique est adopté pour la zone solide et une formulation mixte solide/liquide dans la zone pâteuse.

Les calculs de l'approche (B) sont réalisés dans le cadre d'une approche Lagrangienne. Cependant un formalisme Arbitrairement Lagrangien Eulérien (ALE) est utilisé pour l'approche (A) qui intègre les calculs thermo-fluides. Dans le contexte d'une approche ALE, les nœuds suivent le matériau dans la zone solide et la surface libre, ce qui n'est pas le cas dans la zone liquide où le matériau passe à travers un maillage fixe. On rappelle que dans les deux types de simulations, l'interaction de la mécanique sur les propriétés thermiques et métallurgiques est négligée (couplage faible). Ce couplage ne permet pas de reproduire exactement les interactions physiques au cours d'une opération de soudage, mais il reste une solution pratique pour la simulation numérique de ce procédé. Certains auteurs [3] ont essayé de développer un couplage fort qui consiste à garder l'interaction entre la thermique et la mécanique pour chaque incrément de temps (formulation forte). Mais, ils étaient confrontés à des difficultés de convergence vue la grande différence de comportement entre les deux milieux liquide et solide.

## 3. Modèle numérique

Dans cette partie, un modèle EF tridimensionnel représentatif du procédé de soudage hybride arc/laser est décrit. Le modèle est réalisé en utilisant le logiciel EF SYSWELD® [4]. Il s'agit d'une simulation de soudage hybride appliquée à un bloc de longueur 70 mm, de largeur 40 mm et de hauteur 30 mm. Le bloc dispose d'une symétrie suivant le plan YZ. Seule la moitié de la structure est donc modélisée. Le maillage est donné sur la figure 2. Il comprend 187939 éléments tétraédriques

linéaires, 9662 éléments triangulaires linéaires (éléments de peau) et 33897 nœuds, soit 169485 degrés de liberté. On note que le modèle est maillé par des éléments finis linéaires P1/P1 pour l'approche (B), et par des éléments de type P1+/P1 pour l'approche (A) [5].

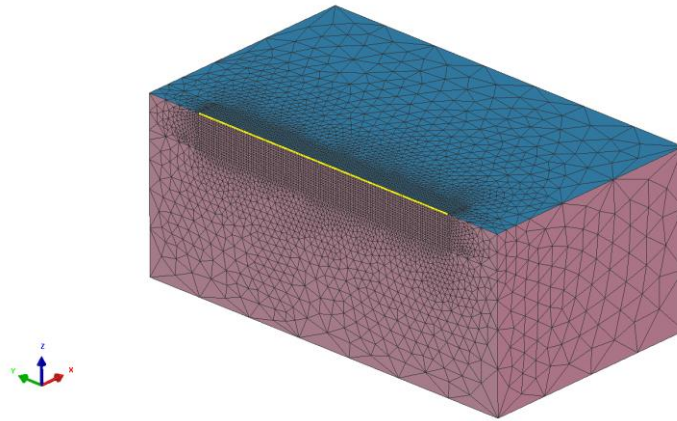


Figure 2 – Modèle EF : géométrie et maillage

Le matériau utilisé dans cette étude est l'acier S355J2G3 multi-phasique dont les propriétés mécaniques et physiques dépendent de la température [4]. Une seule passe de soudage est réalisée avec une vitesse de  $13,33 \text{ mm.s}^{-1}$ . La phase de chauffe dure 3,4 s comprenant 1 s de création du bain et 2,4 s d'avance de source. Cela correspond à une longueur de cordon égale à 50 mm. Le chargement thermique correspondant à l'arc et la source laser est modélisé respectivement par une source volumique (double ellipsoïde) et une source gaussienne surfacique [6]. Le refroidissement pour atteindre la température ambiante est obtenu au bout de 1200 s. Des transferts thermiques par convection et rayonnement sont pris en compte. Le gradient de la tension de surface en fonction de la température  $\frac{d\gamma}{dT}$  « Marangoni » est appliqué en se basant sur l'approche de Leblond et al. [7]. Il est pris constant positif égale à  $10^{-4} \text{ N.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ .

Le calcul métallurgique est réalisé à partir de l'histoire thermique en se basant sur le modèle cinétique de Leblond pour des transformations métallurgiques isothermes [8]. Le matériau utilisé est initialement ferritique. Les transformations métallurgiques suivantes sont considérées : (ferrite  $\rightarrow$  austénite), (austénite  $\rightarrow$  bainite) et (austénite  $\rightarrow$  martensite).

Pour le calcul mécanique, un comportement élasto-plastique est utilisé. Les propriétés mécaniques dépendent de la température et des différentes phases du matériau. Elles sont extraites de la base de données de SYSWELD [4].

## 4. Résultats

### 4.1. Calculs thermique et thermo-fluide

Dans ce paragraphe, une comparaison entre les résultats thermiques obtenus par les simulations avec et sans considération des écoulements dans le bain fondu est exposée. En plus du champ de températures, la simulation thermo-fluide (avec écoulement) permet d'avoir la distribution de champ vitesse d'écoulement de la matière dans le bain fondu. Les écoulements considérés sont ceux engendrés par la tension de surface (courant de Marangoni) et la flottabilité.

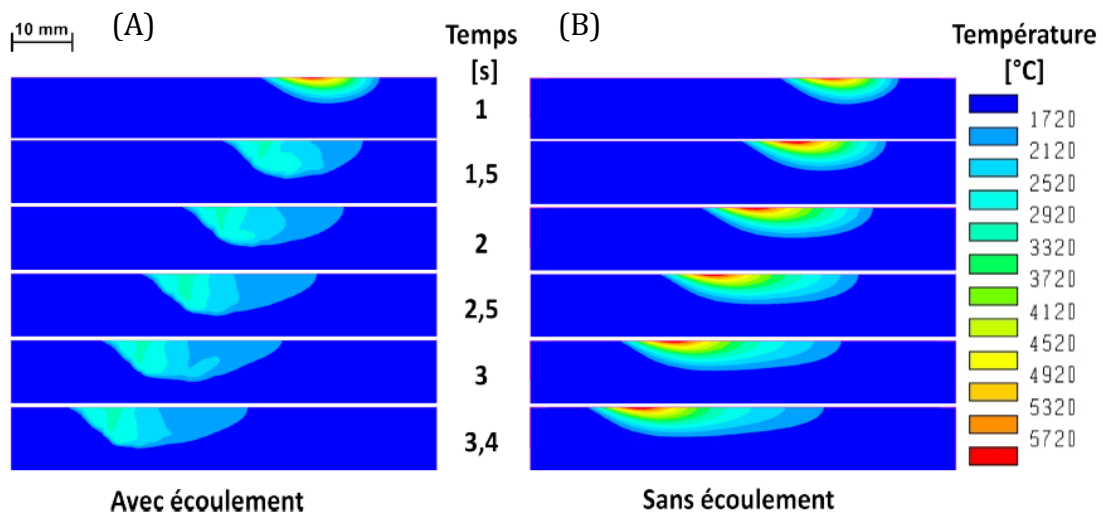


Figure 3 – La distribution de température dans le plan de symétrie

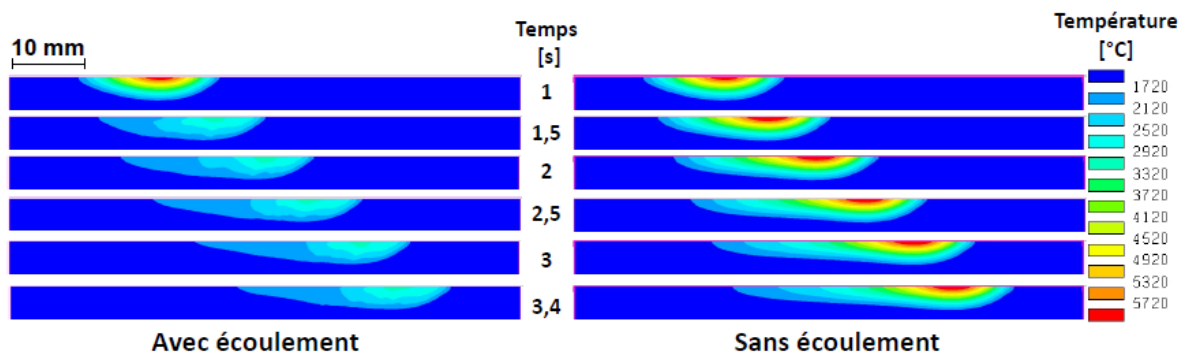


Figure 4 – La distribution de température sur la face supérieure de la pièce

Sur les figures 3 et 4, on remarque que l'influence des écoulements est flagrante. Une chute de température remarquable est constatée dans le cas A. La température maximale atteinte, est pratiquement divisée par deux par rapport au cas B. Cela s'explique par le fait qu'un  $\frac{dy}{dT}$  positif génère des bains pénétrants, donc il ramène la matière « froide » depuis les frontières vers le centre du bain, point le plus chaud. Ce changement de température engendre une différence de la taille des deux bains fondus d'à peu près 14 mm en longueur, 0,7 mm en largeur et 0,2 mm en profondeur. Le bain est plus profond et moins large dans le cas A que dans le cas B.

En termes de vitesse d'écoulement, on note une vitesse maximale d'environ  $0,6 \text{ m.s}^{-1}$  au début des écoulements, puis une vitesse maximale d'environ  $0,4 \text{ m.s}^{-1}$ . Cette valeur de vitesse, après la stabilisation du bain, est cohérente avec les valeurs trouvées dans la littérature (environ  $0,3 \text{ m.s}^{-1}$ ). Ainsi, plus  $\frac{dy}{dT}$  est grand, plus la vitesse d'écoulement est importante. Quant au sens de l'écoulement, comme le montre la figure 5, il est dirigé depuis les frontières de la zone fluide vers le centre de l'application de la source. Un vortex pénétrant est donc créé. Ce vortex est à l'origine du changement de la morphologie du bain.

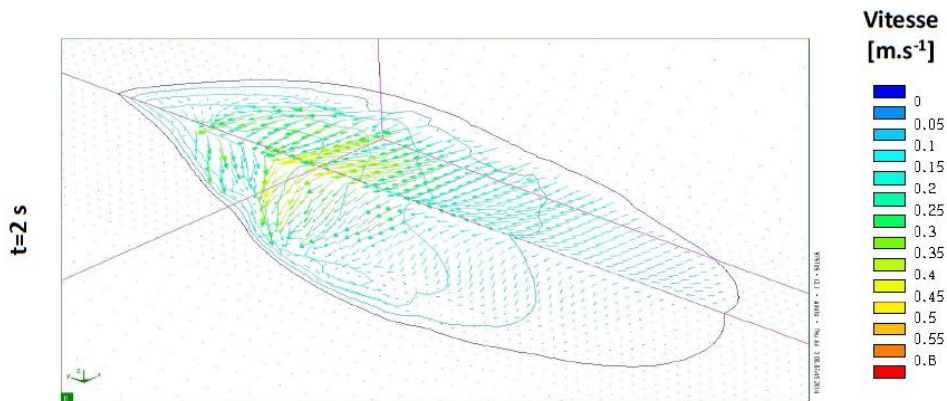


Figure 5 – Champ de vitesse à l’instant  $t = 2$  s

#### 4.2. Calcul métallurgique

Lors de la phase de chauffage, la phase ferritique initiale se transforme en une phase austénitique dans la zone où la température dépasse la température  $Ac_3$ , égale à  $870\text{ °C}$ , comme le montre la figure 6. En effet, la proportion de phase austénitique est égale à 1 dans toute la zone fondue et dans la ZAT (Zone affectée thermiquement), notamment à la fin du chauffage, soit  $t = 3,4$  s.

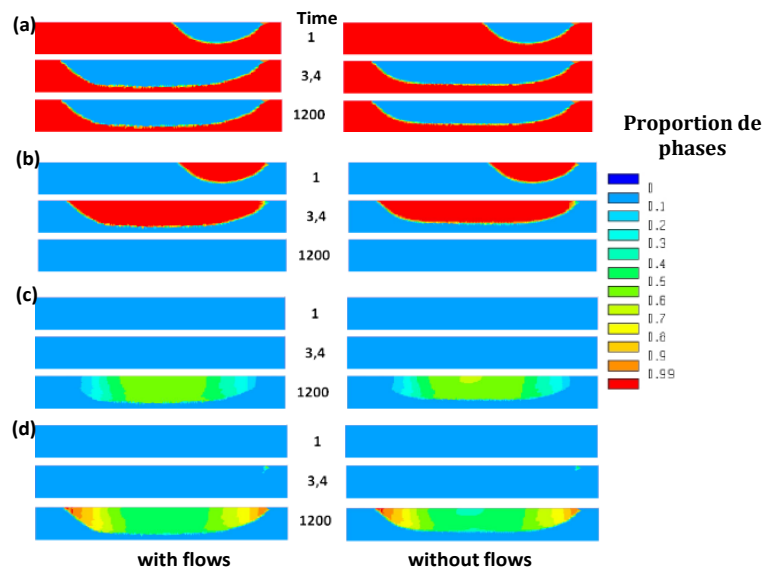


Figure 6 – Distribution des phases dans le plan de symétrie : (a) ferrite, (b) austénite, (c) bainite, (d) martensite

Cependant, les transformations de martensite et de la bainite sont contrôlées par la cinétique de refroidissement. Les phases formées sont des phases riches en carbone et présentent une dureté supérieure à celle du métal de base.

On constate une bonne corrélation concernant la distribution des proportions de phases dans les deux cas. Cependant, on relève dans le cas A une dureté supplémentaire en profondeur, due au fait que le bain est plus profond et que la formation des phases martensitique et bainitique est plus importante en profondeur.

### 4.3. Calcul mécanique

Dans cette partie, on s'intéresse à l'état de contraintes dans la pièce au cours du soudage ainsi qu'à la fin du refroidissement. Les résultats en termes de contraintes résiduelles tiennent compte de la plasticité de transformation lors des changements de phases. Le premier concerne les contraintes de von Mises pour les cas A et B,

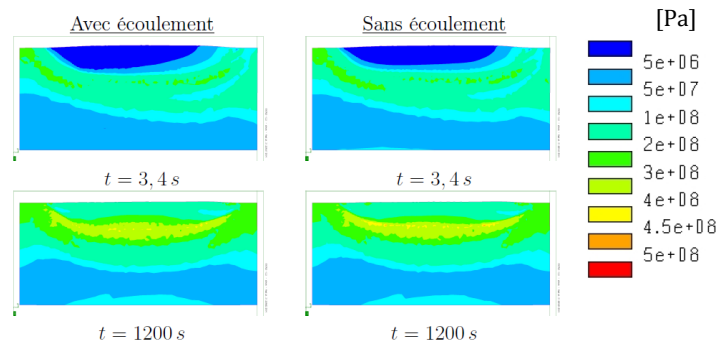


Figure 7 – Contraintes de von Mises dans le plan de symétrie

Sur la figure 7, on remarque dans un premier temps que les résultats obtenus pour les cas A et B sont très comparables. À la fin de la phase de chauffage (3,4 s), on note un état de contraintes nul dans la zone fondue. L'état de contraintes est un peu plus pénétrant dans le cas A. En revanche, cela n'a pas beaucoup d'effet sur les contraintes finales après refroidissement. Les valeurs de contraintes résiduelles obtenues sont de l'ordre de 400 MPa dans la ZAT.

## 5. Conclusion

Dans ce travail, un exemple représentatif d'une opération de soudage hybride d'un acier de type S355J2G3 est modélisé. Cet exemple a été abordé de deux manières différentes pour tester l'influence des écoulements fluides sur la métallurgie et sur l'état de contraintes générées au cours du procédé de soudage. Les écoulements considérés sont ceux engendrés par la tension de surface (à gradient positif) et ceux engendrés par la flottabilité.

Les résultats en termes de température et de vitesse concordent avec le signe de gradient de tension de surface. Nous obtenons un bain pénétrant et moins chaud à cause de la matière froide amenée depuis les frontières vers le centre d'application de la source. Les écoulements conduisent à une forme de bain plus réaliste et permettent de calculer la microstructure par le biais du modèle CA-FE [9].

Les contraintes résiduelles obtenues dans la ZAT sont du même ordre de grandeur dans les deux cas. Ce faible impact des écoulements fluides sur la distribution des contraintes résiduelles peut être dû au couplage faible utilisé. Ce couplage faible ne prend pas en considération les interactions physiques entre les états de la matière au cours du chauffage et pendant la solidification.

En continuité de ce travail, une nouvelle méthodologie est en cours de développement, elle permet d'éviter les complexités numériques en trouvant le compromis entre ces deux types de couplage. Elle permet de reproduire les interactions physiques au cours de procédé de soudage. Le calcul se fait en couplage faible entre les différents états de la matière à chaque incrément de temps ainsi et les résultats obtenus seront pris en compte pour l'incrément suivant.

## Références

- [1] J-M. Bergheau, Techniques de l'ingénieur, BM7758, 1–15, (2004)
- [2] H. Sallem, E. Feulvarch, H.Amin-El-Sayed, B.Souloumiac, J-B. Leblond, J-M. Bergheau, COMPLAS XIII (2015)
- [3] AMINE-EL-SAYED, Simulation numérique du soudage : Couplage des écoulements dans le bain fondu avec les déformations de la partie solide. Thèse ENISE 2014.
- [4] ESI Group, User manual,(2015)
- [5] E. Feulvarch, H. Amin-El-Sayed, J-C Roux, J-M Bergheau, International Journal of Material Forming, (2015)
- [6] J. Goldack, A. Chakravati, M. Bibby, Metallurgical transactions 15B 299–305, (1984).
- [7] J.-B. Leblond, H.Amin-El-Sayed, J.-M. Bergheau, Comptes Rendus Mécanique, 341, 770-775 (2013)
- [8] J-B. Leblond, J-C. Devaux, Acta. Metallurgica, 32-1, 137–146, (1984).
- [9] H. C-A. Gandin, J-L. Desbiolles, M. Rappaz, P. Thevos, Metallurgical and materials transaction A, (1999).