

# Etude de la Corrélation Entre les Déplacements et la Largeur des zones soudées par aluminothermie du rail

O. BOUZAOU, A. CHOUAF et M. CHERGUI

*Ecole Nationale Supérieure d'Électricité et de Mécanique (ENSEM),  
Laboratoire de Contrôle et Caractérisation Mécanique des Matériaux et des Structures (LCCMMS),  
Casablanca, Maroc*

E-mail : [BOUZAOU.Oussama@gmail.com](mailto:BOUZAOU.Oussama@gmail.com) ou [a.chouaf.ensem@gmail.com](mailto:a.chouaf.ensem@gmail.com)

## Résumé

Les endommagements des zones soudées par aluminothermie sont la principale cause des accidents ferroviaire de nos jours. Nous rappelons que ce processus, génère une chaleur dans le volume de la masse fondue, pouvant engendrer des déformations et des contraintes résiduelles au cours de la soudure. En effet, on a localement l'effet du changement de gradient de température et de la dilatation thermique sous forme d'un couplage entre les aspects mécaniques et thermiques. Le changement d'état et les modifications de la microstructure après refroidissement, sont à l'origine de l'hétérogénéité des déformations plastiques entre la zone fondue et le métal de base. Ces interactions entre les aspects métallurgiques et mécaniques se manifestent, sous forme des réorientations cristallographiques et d'une variation du volume. Elles sont principalement les causes de la naissance de déformations et des déplacements. Dans la présente étude, nous avons déterminé par une approche numérique basée sur la méthode des éléments finis, les distorsions et les déplacements développés particulièrement dans la jonction des rails. En analysant ces champs de déplacements, nous avons pu montrer une corrélation entre leur niveau et la largeur des zones soudées.

**Mots clés :** Soudure, Aluminothermie, Température, Modélisation ; Déplacement ;

## 1. Introduction

Le procédé de soudage par aluminothermie est largement utilisé pour le raccordement des rails dans le domaine Ferroviaire. Ce procédé de soudage par coulée de métal en fusion, obtenu par une réaction exothermique consiste à fondre et solidifier des métaux de base et un matériau de remplissage dans une zone de fusion localisée, génère une source de chaleur transitoire pour former un joint entre les extrémités de rails à assembler. La source de chaleur provoque des distributions de température très hétérogène à travers le métal de base (rail). Par conséquent, la dilatation thermique et la contraction pendant le chauffage et le refroidissement ultérieur ainsi que la déformation plastique du matériau à des températures élevées entraînent des distorsions inévitables et des déplacements, ce qui affecte fortement la qualité des joints soudés [1,2]. Cet article présente une simulation thermomécanique de procédé de

soudage aluminothermique en utilisant la méthode des éléments finis. Un modèle de source de chaleur est proposé sur la base du couplage des aspects thermique et mécanique développé, afin de définir la source de chaleur distribuée dans les simulations. L'effet de la largeur de la soudure sur le champ de déplacement a été étudié. Les résultats ont montré que la distribution du déplacement pour les différentes zones est sensible aux paramètres de distribution de la source de chaleur et surtout à la largeur de la zone de soudure.

## 2. Modélisation Numérique

### 2.1 Chargement thermique

Pour modéliser le champ des déplacements dans le rail et particulièrement dans la zone de soudure, nous avons réalisé des simulations numériques par la méthode des éléments finis basée sur un ensemble couplé de phénomènes thermiques et mécaniques. Les effets de ces phénomènes sont très prononcés dans la zone de fusion et dans la zone affectée thermiquement au cours des phases du processus de soudage. À travers notre modélisation de la composante thermique, nous allons mettre en évidence la distribution de la température générée selon les conditions de soudages adoptées [3].

#### - Loi de transfert de chaleur par conduction

La loi de Fourier de l'état de transfert de flux de chaleur par conduction de densité  $q^*$  [ $J/mm^2.s$ ] dans les faces isothermes de la soudure aluminothermique est proportionnelle à la valeur négative du gradient de température  $\frac{\partial T}{\partial n}$  [ $K/mm$ ] perpendiculaire à cette zone en fonction du coefficient de conductivité thermique  $\lambda$ . [ $J/mm.s.K$ ]:

$$q^* = -\lambda \frac{\partial T}{\partial n} \quad (1)$$

L'emplacement géométrique de tous les points de la soudure et les faces du rail qui ont la même température est désigné par la face isotherme. Le coefficient de conductivité thermique des deux zones dépend de la composition chimique, de l'état microstructural et de la température.

#### - Loi de transfert de chaleur par convection

La convection se produit au cours et après la solidification de la soudure sous forme d'échange thermique entre les particules de l'air et la soudure. Pour les éléments de la

surface latérale de la soudure entrant en contact avec l'air ou avec un liquide, la densité d'écoulement thermique  $q_c^*$ , selon la loi de Newton est proportionnelle à la différence entre la température superficielle  $T$  et la température de l'air ou du liquide  $T_0$  à travers le coefficient de transfert de chaleur par convection  $\alpha$  [J / mm<sup>2</sup> sk] [4];

$$q_c^* = \alpha c(T - T_0) \quad (2)$$

Le coefficient de transfert de chaleur par convection  $\alpha$  dépend des conditions d'écoulement à la surface. La dépendance est présentée au moyen de formules empiriques utilisant des paramètres sans dimension.

#### - Loi du transfert de chaleur par rayonnement

L'échange par rayonnement thermique durant le processus de soudage se propage comme une onde électromagnétique dans l'espace. Les corps sont donc dans un état d'échange mutuel de chaleur. La chaleur rayonnée par unité de surface et de temps de la soudure avec une densité de la chaleur  $q_r^*$  est proportionnelle à la quatrième puissance de la température superficielle  $T$  [K] par le coefficient de rayonnement  $\varepsilon C_0$  [J / mm<sup>2</sup> sK<sup>4</sup>] [4]:

$$q_r^* = \varepsilon C_0 T^4 \quad (3)$$

La dissipation de chaleur pour le cas du soudage par aluminothermie du refroidissement, est relativement petite d'une température corporelle  $T$ , dans un environnement relativement étendu de la température corporelle  $T_0$ , se produit au moyen du rayonnement s'exprimer par la forme suivante :

$$q_r^* = \varepsilon C_0 (T^4 - T_0^4) \quad (4)$$

Nous rappelons que l'évolution de la température, en fonction du temps, dans la zone de soudure aluminothermique est régie par l'équation de la chaleur, qui traduit le bilan énergétique [4,5]:

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t}(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{z}, t) = -\nabla \cdot \vec{q}(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{z}, t) + Q(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{z}, t) \quad (5)$$

Avec:

$$\vec{q} = -\lambda \nabla T$$

Selon cette équation, la détermination du champ de température  $T$  dépendra de la masse volumique  $\rho$ , de la chaleur spécifique  $C$ , du vecteur de flux de chaleur  $\vec{q}$ , de la conductivité thermique  $\lambda$  et éventuellement d'une source de chaleur interne  $Q$ , qui sera prise en compte dans certains types de procédé de soudage suivant la nature de l'apport de chaleur.  $x$ ,  $y$  est  $z$  sont les coordonnées dans le système de référence, est le temps  $t$ , et  $\nabla$  est l'opérateur du gradient spatial. En tenant compte de tous ces phénomènes, nous avons déterminé numériquement le champ de température développé dans la structure lors de l'opération de la soudure aluminothermie de deux portions de rail. C'est à partir de ce résultat que nous allons formuler notre cas de charge pour déterminer le champ de déplacement.

## 2.2 Géométrie et Maillage

Nous avons considéré pour notre étude un morceau du rail de profil UIC 60, définie par la norme NF A 45-317 [6]. Le maillage de cette portion du rail a été réalisée à partir des éléments volumiques tridimensionnels en brique du type Hex 8 nœuds du code ABAQUS (Fig. 1) [7].

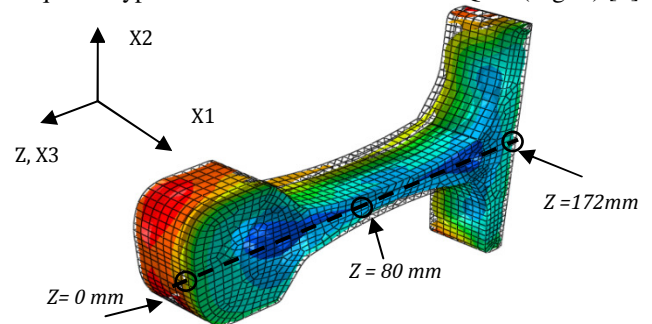


Figure 1. Géométrie et maillage d'une portion du rail.

Le matériau que nous avons considéré est un acier destiné à l'industrie ferroviaire. Toutefois, les deux zones (MB et ZF) ont été différenciées par leurs caractéristiques mécaniques spécifiques [8].

## 3. Résultats et Discussion

Pour étudier l'effet de largeur de la zone soudée sur les déplacements, nous avons considéré six cas de figure de largeurs notées  $dZS$  (distance de la Zone de Soudure) : ( $dZS = 24$  mm;  $dZS = 30$  mm;  $dZS = 32$  mm;  $dZS = 35$  mm;  $dZS = 37.5$  mm,  $dZS = 40$  mm). Pour chaque cas, nous avons considéré un chargement thermique en tenant compte de la différence des températures, entre l'état final ( $T_f = 20$  °C), et la température de la zone fondue  $T_{zf} = 600$  °C et celle de la zone affectée thermiquement  $T_{zat} = 579$  °C. Parmi les résultats que nous avons obtenus nous avons représenté dans la figure 2, le champ des déplacements  $U_1$ ,  $U_2$  et  $U_3$ , suivant les différentes directions.

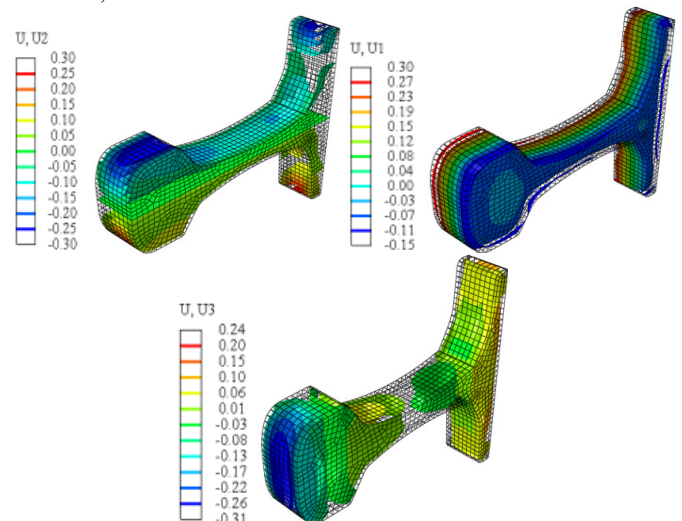


Figure 2. Champs des déplacements  $U_1$ ,  $U_2$  et  $U_3$ .

Nous constatons que la distribution des champs de déplacements sur le profil du rail varie en fonction des zones. L'interface entre la zone fondue et la zone affectée thermiquement présente la valeur la plus élevée de champ de déplacement, elle est de l'ordre de 0,3 mm pour les différentes directions. À partir de ses premiers résultats, nous pouvons constater que le maximum des déplacements

est concentré au niveau des intersections (zone fondue et zone affectée thermiquement). L'effet très marqué de la largeur de soudure sur le champ de déplacement est très bien illustré sur la figure 3.

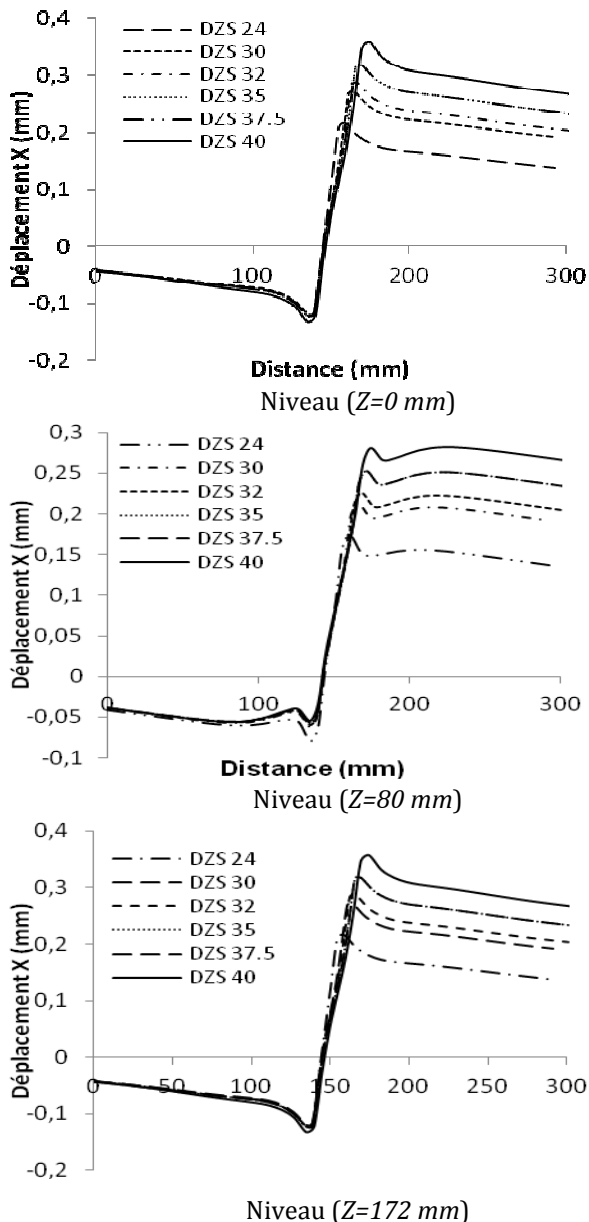


Fig. 3. Composante de déplacement  $U_1$  par niveau  $Z$ , suivant l'axe  $X_1$  pour les 6 cas de largeurs étudiés

À partir de ses premiers résultats, nous pouvons constater que le déplacement maximal est concentré au niveau des zones (interface zone fondue/zone affectée thermiquement, et zone affectée thermiquement). Dans ces zones, la valeur de déplacement varie de 0,2 mm pour une largeur de la zone soudée  $d_zs = 24$  mm à une valeur de 0,35 mm pour une largeur  $d_zs = 40$  mm. Cette première composante  $U_1$ , nous a donc permis de préciser les zones qui risquent d'être potentiellement critiques. Les résultats ont également montré que le champ de déplacement de compression apparaît dans la première zone (de symétrie), tandis que le champ de déplacement de traction apparaît dans le reste du rail. La partie symétrique par rapport l'axe ( $Z_0$ ), et la partie centrale de la soudure présente la valeur nul, pour les différents cas étudiés. Il semble donc que lorsque la largeur de la soudure augmente, le niveau de déplacement

augmente aussi. C'est pour cela que la norme de fabrication impose une épaisseur de la zone soudée de l'ordre de 27 mm. Au delà de cette épaisseur, des éventuels risques d'endommagement notamment d'origine thermique deviennent importants.

#### 4. Conclusion

À travers l'étude que nous avons menée, nous avons proposé une démarche basée sur la méthode des éléments finit pour déterminer le champ de déplacement au niveau de la jonction de la soudure aluminothermique dans les rails. Pour ce faire, nous avons développé une série de simulations à travers lesquelles l'effet de la largeur de la jonction de soudure dans les rails sur la distorsion et le déplacement a été mis en évidence. En effet, la largeur préconisée souvent n'est pas respectée. Par conséquent, selon certaines largeurs le niveau des déplacements devient très critique et peut engendrer localement des endommagements. Les résultats de nos simulations nous ont permis de localiser les zones critiques et discuter la sévérité des distorsions engendrées par des déplacements hétérogènes. Les résultats obtenus ont montré que le champ de déplacement atteint sa valeur maximale au milieu de la soudure et passe par une inversion de signe dans la zone affectée thermiquement avant de s'annuler au milieu de la zone fondue. Finalement, plus l'épaisseur est grande plus le niveau de déplacement est élevée et peut engendrer des endommagements. Il est impérativement conseillé de respecter l'épaisseur optimale  $d=27$  mm.

#### Références

- [1] O. Bouazaoui, A. Chouaf, Sévérité des contraintes résiduelles en fonction de la largeur de soudure dans les rails, 22<sup>ème</sup> Congrès Français de Mécanique, Lyon, 24 au 28 Août 2015.
- [2] O. Bouazaoui, A. Chouaf, Effet de la température de préchauffage sur les contraintes résiduelles dans les zones soudées des rails, (0147\_M), Congrès Algérien de Mécanique du 25 au 29 octobre 2015.
- [3] A. Skyttebol\*, B.L. Josefson, J.W. Ringsberg, (2005) "Fatigue crack growth in a welded rail under the influence of residual stresses", Engineering Fracture Mechanics 72 271–285.
- [4] Lu (F.), Tang (X.), Yu (H.) et Yao (S.). – Numerical simulation on interaction between tig welding arc and weld pool. Computational Materials Science, Vol.35, pp. 458-465, 2006.
- [5] S. A. Tsirkas, P. Papanikos, Th. Kermanidis, Numerical simulation of the laser welding process in butt-joint specimens, Journal of Materials Processing Technology 134, 2003, pp. 59 – 69.
- [6] NF A 45-317 Produits sidérurgiques laminés à chaud, Rail Vignole type 60 kg/m et éclisse, Profil : caractéristiques et tolérance.
- [7] ABAQUS / CAE. Documentation for version 6.14 Student Edition. Dassault System Simulia.
- [8] O. Bouazaoui, A. Chouaf, Distribution of Residual Stresses in welded rails, (ICMCSF-124), International Conference on Mechanics of Complex Solids and Fluids, 17 au 22 Mai 2015, Lille, France