

# Analyse du Champ de Déformations Dans les Zones Soudées par Aluminothermie des Rails

O. Bouazaoui, A. Chouaf, 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 : [BOUZAOUI.Oussama@gmail.com](mailto:BOUZAOUI.Oussama@gmail.com) ou [a.chouaf.ensem@gmail.com](mailto:a.chouaf.ensem@gmail.com)

## Résumé.

La sécurité dans le domaine du transport ferroviaire exige avant tout la qualité de la voie du chemin de fer. Pour obtenir cette qualité, il faut une maîtrise des opérations de réalisation, de la soudure aluminothermie qui assure le raccordement des rails. Afin d'éviter les endommagements et les accidents, Il est indispensable de bien cerner les effets de principaux paramètres intervenants ou générés lors de l'assemblage par ce type de soudage. Parmi ces paramètres, nous pouvons citer les déformations qui retiennent une attention particulière compte tenu de leur effet sur la tenue mécanique de la jonction de soudure. Dans cette étude, nous avons étudié par une approche numérique la description de ces déformations. Par la suite, nous avons mis en évidence leur corrélation avec la largeur de la soudure. Enfin, les résultats obtenus ont été discutés par rapport au risque d'endommagement au voisinage de la zone de soudure.

**Mots clefs :** Soudure, Aluminothermie, Déformations, Simulation, endommagement.

## 1. Introduction

Le soudage par aluminothermie dans le domaine ferroviaire est fort apprécié à travers le monde grâce à ses qualités à savoir sa simplicité, son économie, et sa portabilité [1,4]. Ces qualités dépendent en grande partie des conditions thermiques pendant le soudage par fusion [5,6].

Dans cette présente étude, nous avons développé une démarche numérique. Pour analyser donc l'effet des déformations thermomécanique, nous avons tout d'abord étudié leur distribution dans les rails, en faisant appel à des simulations numériques par la méthode des éléments finis montrent que le non respect des intervalles recommandés pour les largeurs des zones soudées provoque une augmentation locale des taux de déformations. Selon le niveau de ces déformations et les distorsions, des endommagements peuvent se développer.

Notre analyse des déformations indique que ces grandeurs sont très sensibles à la taille de la largeur des zones soudées. Pour minimiser les éventuels risques

d'endommagement, nous avons mis en évidence, un intervalle de largeurs à respecter rigoureusement [7-10].

## 2. Modélisation théorique

La concentration de chaleur engendre de très forts gradients de température au sein de la soudure aluminothermique, et la variation de leurs propriétés mécaniques en fonction de la température entraîne alors l'apparition des déformations pouvant atteindre la limite d'élasticité des matériaux. En effet, une élévation de température  $d\theta$  d'un volume  $V$  entraîne une variation de volume  $dV = \alpha.V.d\theta$ ,  $\alpha$  étant le coefficient de dilatation thermique volumique. Plus la source de chaleur est localisée, plus le gradient thermique entre deux éléments est élevé. Afin d'écrire les équations constitutives, le tenseur des déformations est décomposé en plusieurs parties :

– une partie élastique  $\epsilon_e$ , où la déformation augmente linéairement avec la contrainte. Dans le cas des petites déformations pour un matériau isotrope, cette proportionnalité s'exprime par la loi de Hooke, reliant le tenseur de Cauchy  $\sigma$  au tenseur des déformations  $\epsilon_e$  par la relation de souplesse :

$$\mathbf{E}\epsilon_e = \frac{1}{2\mu}\sigma - \frac{\lambda}{2\mu(3\lambda+2\mu)} \text{Tr}(\sigma)\mathbf{I}$$

Avec  $\mu$  et  $\lambda$  les coefficients de Lamé définis en fonction du module d'Young  $E$  et du coefficient de Poisson  $\nu$  du matériau par :

$$\lambda = \frac{E\nu}{(1+\nu)(1-2\nu)} \quad \text{et} \quad \mu = \frac{E}{2(1+\nu)}$$

– une partie thermique  $\epsilon_{th}$ , dont les effets mécaniques sont dus à la variation du coefficient de dilatation en fonction de la température.

$$\epsilon_{th} = \int_{T_{ref}}^T \alpha(T) \cdot dt$$

Avec  $T_{ref}$ , la température à laquelle  $\epsilon_{th} = 0$ .

– une partie plastique  $\epsilon_p$  dont l'évolution dépend du mode d'écroutissage du matériau (isotrope, cinématique, voire les deux). Par définition, la déformation plastique est celle qui correspond à la configuration relâchée :

$$\varepsilon_p = \varepsilon(\sigma = 0)$$

Les éléments nécessaires à la modélisation du comportement plastique sont un critère de plasticité, une loi d'écoulement et une loi d'écrouissage. Le critère de plasticité, délimitant toujours une surface de plasticité convexe, est dit isotrope si la contrainte de chargement est invariante par changement de repère.

### 3. Modélisation numérique

La simulation thermique du procédé de soudage aluminothermique a été réalisée à l'aide du modèle de source de chaleur développé au cours de l'opération du soudage. C'est à partir de ce résultat que nous allons formuler notre cas de charge pour déterminer le champ de déformations. Dans l'analyse thermique, le champ de température transitoire  $T$  de la zone soudée est en fonction du temps  $t$  et des coordonnées spatiales  $(x, y, z)$ , et est déterminée par l'équation de transfert thermique non linéaire :

$$-\lambda \frac{\partial T(t)}{\partial n} = h \cdot (T - T_0) + \xi \cdot \sigma_{SB} \cdot (T^4 - T_0^4) + Q_S(x, y, z, t)$$

Nous avons déterminé numériquement les déformations issues du champ de distribution des températures que nous avons déterminées précédemment [11].

La géométrie, les conditions aux limites ainsi que le maillage considérés dans notre modélisation sont définis ci-dessous (Figure .1).

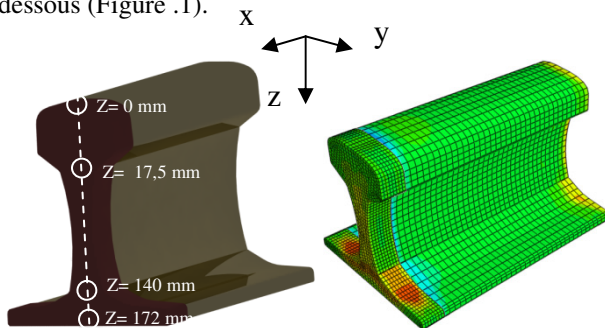


Fig.1. Portion du rail comportant une jonction de soudure avec le Repérage des différents plans situant les zones de contrôle.

### 3. Résultats et Discussion

Nous avons réalisé des simulations numériques. Dans cette simulation, nous avons tout d'abord déterminé le champ de température développé dans la structure lors de l'opération de soudure [12]. En suite, les résultats de l'analyse thermique ont été appliqués en tant que charge thermique pour déterminer les champs de déformations.

Nous avons donc appliqué notre démarche numérique sur six tronçons, pour étudier l'effet de largeur de la zone soudée sur le champ de déformations [7]. Nous rappelons que les résultats ont été obtenus en différentes zones  $Z$  et le long des axes  $X_0$ . Ces résultats sont représentés par des courbes pour chaque tronçon dans la figure 2.

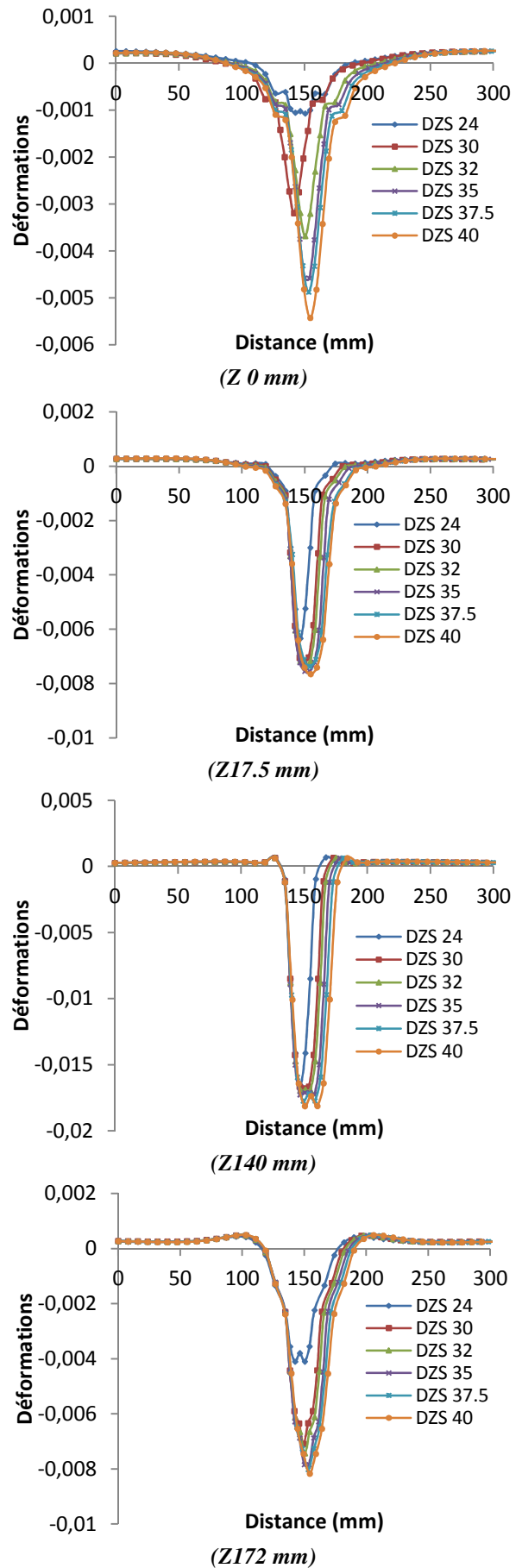


Figure 2 : Distribution de champ de déformations en fonction de la distance suivent  $X_0$ , pour les six cas de largeur de soudure

Selon ce résultat nous constatons que la distribution des déformations sur le profil du rail varie en fonction de la largeur  $d_{zs}$  de la zone soudée. En effet pour le tronçon dont la largeur ( $d_{zs} = 40$  mm), la valeur maximale de déformation est de l'ordre de **0,0054**, par contre pour le tronçon de ( $d_{zs} = 37.5$  mm), elle est de l'ordre de **0,005**, et pour le tronçon ( $d_{zs} = 30$  mm), elle est de l'ordre de 0,0038 mm. Il semble donc que lorsque la largeur de la soudure augmente, le niveau de déformation augmente aussi. Selon le niveau des déformations atteint, des processus d'endommagement peuvent se développer.

Les résultats ont montré que les déformations de compression apparaissent dans La zone fondue de la soudure, tandis que les contraintes résiduelles de traction apparaissent dans le reste du rail avec un niveau moins élevé. Nous constatons que la distribution des contraintes sur le profil du rail varie en fonction de la distance. La partie centrale de la soudure (zone fondue) présente la valeur la plus élevée de la déformation elle est de l'ordre de **0,0175** pour une largeur  $d_{zs} = 40$  mm. Par contre dans le métal de base, les déformations au fur et à mesure qu'on s'éloigne des zones congé âme champignon ; congé âme patin, tendent vers zéro.

A partir de ces évolutions, nous pouvons distinguer deux types de comportement. En effet, pour la section  $Z = 0$  mm qui correspondent à la surface libre, le champ de déformation est en compression pour la zone fondue. Et nulle pour le métal de base et la zone affectée thermiquement. En revanche pour les sections  $Z = 17.5$  mm ;  $Z = 140$  mm et  $Z = 172$  mm, elles ont en la même distribution de champ de déformation. En revanche la section  $Z = 140$  mm engendrent des niveaux de déformation plus élevés comparativement aux autres. De plus, elles sont très sensibles à la largeur de la zone soudée.

#### 4. Conclusion

À travers l'étude que nous avons menée, nous avons proposé une démarche basée sur la méthode numérique des éléments finit pour déterminer le champ de déformation au niveau de la jonction de la soudure aluminothermique dans les rails. Pour ce faire, les champs de distribution de la température ont été déterminés, Ensuite, les résultats de l'analyse thermique ont été appliqués en tant que charge thermique pour déterminer les champs de déformations. Les résultats obtenus ont montré que la déformation 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 plus loin dans la zone de métal de base. À partir des résultats obtenus, nous avons mis en évidence l'effet de la largeur de soudure sur le niveau de déformation : plus l'épaisseur est grande plus la déformation est élevée et peut engendrer des endommagements. Il est donc impératif de tenir compte des recommandations préconisées pour réaliser la soudure

de la jonction des rails qui respecte en partie une largeur prise entre 27 mm et 30 mm ( $27 < d < 30$ ).

#### BIBLIOGRAPHIES

- [1] Hart, R. N. Thermit welding process, 1987 (Lindsay Publications, Inc., Bradely).
- [2] I. Mouallif<sup>a</sup>, A. Chouaf, <sup>a</sup>. A. El amri and A. Benali, (2011) "Effects of alumino-thermic welding defects on the rails mechanical behavior", Mécanique& Industries / Volume 12 / Issue 05 / January, pp 343-351.
- [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] ERRI,(1993)"Rail rolling contact fatigue. Residual stress measurements on naturally hard and two head-hardened rails by neutron diffraction", UtrechtCommittee D 173/RP42.
- [5] O. Bouazaoui, A. Chouaf, Distribution of Residual Stresses in welded rails, (ICMCSF-124), Internaciona Conference on Mechanics of Complex Solids and Fluids, 17 au 22 Mai 2015, Lille, France
- [6] O. Bouazaoui, A. Chouaf, Effet de la largeur de soudure sur les contraintes résiduelles et l'apparition des défauts dans les rails. (0359), 12ème Congrès de Mécanique, du 21 au 24 Avril 2015, Casablanca.
- [7] O. Bouazaoui, A. Chouaf, Sévérité des contraintes résiduelles en fonction de la largeur de soudure dans les rails, 22ème Congrès Français de Mécanique, Lyon, 24 au 28 Août 2015.
- [8] 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.
- [9]Oussama Bouazaoui, Abdelkrim Chouaf, The Preheating Temperature Effects on the Residual Stresses of the Welded Rails Sections. Springer International Publishing Switzerland 2017. T.Boukharouba et al. Applied Mechanics, Behavior of Materials, and Engineering Systems, Lecture Notes in Mechanical Engineering. pp. 169-178.
- [10] M. Jezzini-Aouad, P. Flahaut, S. Hariri, L. Winiar,(2010) "Optimisation des soudures aluminothermiques : Aspects mécaniques, métallurgiques et fiabilité", Revue de Mécanique Appliquée et Théorique, Vol. 2, 2. pp. 163-172.
- [11] Webster PJ, Wang X, Mills G, Kamg W, Webster GA. (1991)"Residual stress measurements on ORE railway rails by neutron diffraction". UIC, Final Report BRSUIC02/91.
- [12] 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.