

"Amorçage et Propagation des Fissures au Voisinage des Soudures Aluminothermiques des Rails"

"Oussama BOUZAOUI"¹

"Abdelkrim CHOUAF "¹

" Zakaria ELMASKAOUI"²

¹ "Ecole Nationale Supérieure d'Électricité et de Mécanique (ENSEM), Laboratoire de Contrôle et Caractérisation Mécanique des Matériaux et des Structures (LCCMMS), Maroc, E-mail : BOUZAOUI.Oussama@gmail.com"

² " Ecole Nationale Supérieure d'Électricité et de Mécanique (ENSEM), Laboratoire Technologies de Constructions et des Systèmes Industriels (TC&SI) Casablanca, Maroc"

Résumé :

" Précisons que notre objectif principal tout au long de cet article était d'étudier les endommagements des rails de chemin de fer, à partir des défauts de soudure aluminothermique dans les rails. La compréhension des effets des défauts sur l'endommagement des rails, permet de mieux maîtriser la sécurité du transport ferroviaire. Pour décrire plus précisément le processus d'endommagement par rupture des zones soudées, cet article sera consacré à l'étude de l'initiation et de la propagation des fissures à partir d'un défaut. Nous allons donc étudier expérimentalement et numériquement le procédé d'amorçage et de la progression des fissures au voisinage des défauts. Les simulations numériques par la méthode des éléments finis sont effectuées afin de déterminer les historiques de développement des contraintes élasto-plastiques. À partir de ces simulations, nous avons traité la distribution de champ de contrainte et de déformation, et nous avons décrit la sévérité des déformations plastiques au fond de l'entaille sous un chargement statique. Cela nous permettra de montrer une corrélation entre le niveau de ces dernières et l'apparition des microfissures, qui sont les principales causes de la rupture fragile des zones soudées des rails."

1. Introduction

Certes, le transport ferroviaire est vital pour l'économie locale et mondiale, en l'occurrence marocaine. Mais comme pour tout mode de transport, il y a également des risques associés, en particulier, les accidents de train posent des risques pour la sécurité du public et des chemins de fer, de sorte que les pratiques efficaces de prévention des accidents constituent un élément indispensable de gestion des risques. Ainsi, l'industrie ferroviaire consacre à la prévention des déraillements ferroviaires une priorité absolue et grandissante. Parmi toutes les causes d'accidents des rails, on peut considérer, que les endommagements des zones des soudures par aluminothermie constituent les causes de déraillement les plus fréquentes. Et ce pour décrire plus précisément le processus d'endommagement par rupture des zones soudées. Cet article sera consacré à l'étude de l'initiation et de la propagation des fissures à partir des défauts de la soudure aluminothermique. Tout d'abord, une modélisation théorique de l'amorçage et de la propagation des fissures est développée. Elle est suivie par des essais expérimentaux qui ont été élaborés afin d'assimiler ces défauts à une entaille sur des éprouvettes issues de différentes zones du rail et soumises à des sollicitations de flexion trois points. Ces essais ont été réalisés au laboratoire (TC&SI) de l'ENSEM [1]. En effet, notre objectif dans le présent article est d'étudier expérimentalement dans un premier temps l'influence de ces défauts sur le comportement mécanique des joints soudés du rail. Dans un second temps des simulations numériques du procédé d'amorçage et de la propagation des fissures au voisinage de ces défauts, par la méthode des éléments finis sont effectuées afin de mieux comprendre le mécanisme d'endommagement qui s'initie à partir de certains défauts. À partir des simulations, nous avons traité la distribution de champ de contrainte et de déformation [2], et nous avons décrit la sévérité des déformations plastiques au fond de l'entaille sous un chargement statique. Cela nous permettra de montrer une corrélation entre le niveau de ces dernières et l'apparition des microfissures [3-4], qui sont les principales causes de la rupture fragile [5-6] et qui se manifestent à partir des interactions entre les aspects métallurgiques et mécaniques, sous forme des réorientations cristallographiques et des dislocations des plans [7]. Elles sont principalement les causes de la naissance des distorsions et les déplacements développés particulièrement au voisinage des défauts.

2. Approche Théorique

La modélisation théorique du comportement mécanique des endommagements brutaux des zones soudées par aluminothermie du rail, sous l'effet des défauts a permis, dans un premier temps, de décrire les champs de contraintes et de déformations singulières au voisinage de la pointe de fissure [8-11]. Cela a établi une liaison entre le niveau de ces champs à la géométrie et la position des défauts, et aussi au chargement global, avec des critères énergétiques nécessaires à l'initiation et la cinétique de propagation des fissures [12-13]. Le bilan énergétique, développé par Griffith (1920), décrit l'énergie avant et après propagation de la fissure, en fonction de l'énergie de surface engendrée par l'avancée de la fissure.

La définition de l'énergie potentielle totale \mathbf{P} du corps dépend principalement de la géométrie du corps de la longueur de la fissure l et du chargement \mathbf{C} . Cette énergie potentielle totale se décompose en termes d'énergie élastique et d'efforts extérieurs. Elle s'exprime en fonction du champ de déplacement virtuel $\underline{\xi}'$ par :

$$\mathbf{P}(\underline{\xi}') = \mathbf{W}(\underline{\xi}') - \mathbf{L}(\underline{\xi}') \quad (1)$$

Avec $\mathbf{W}(\underline{\xi}')$, l'énergie élastique du corps pour un champ de déplacement cinématiquement admissible $\underline{\xi}'$, et $\mathbf{L}(\underline{\xi}')$ le potentiel des efforts extérieurs. Cette énergie élastique est donnée par :

$$\mathbf{W}(\underline{\xi}') = \int_{\Omega} \rho(\underline{x}) \omega(\underline{\varepsilon}(\underline{\xi}')) d\Omega \quad (2)$$

Avec $\rho \omega(\underline{\varepsilon}) = \frac{1}{2} \underline{\varepsilon} : \underline{\underline{C}} : \underline{\varepsilon}$ est la densité d'énergie élastique du matériau.

Pour notre cas de domaine occupé par le milieu déformable au point de la fissure, on souhaite étudier l'équilibre des contraintes et des déformations à la pointe d'une entaille, d'une éprouvette soumise à des

forces de volume \mathbf{F} , et un déplacement imposé \mathbf{u}_d sur une section $\mathbf{S_u}$ de son bord et à une densité surfacique d'efforts \mathbf{T}^d .

$$L(\underline{\xi}') = \int_{\Omega} \rho(\underline{x}) \underline{F}(\underline{x}) \cdot \underline{\xi}'(\underline{x}) d\Omega + \int_{S_T} \mathbf{T}^d(\underline{x}) \cdot \underline{\xi}'(\underline{x}) da \quad (3)$$

Nous rappelons que l'énergie potentielle mécanique \mathbf{P} est décrite en fonction du champ de déplacement $\underline{\xi}$, de la géométrie du corps et du chargement considéré, donc de la longueur de fissure l et des paramètres de chargement \mathbf{C} [14]:

- Si $\mathbf{P}(l, \mathbf{C}) + W^s(l) < \mathbf{P}(l + dl, \mathbf{C}) + W^s(l + dl)$, la fissure n'évolue pas et conserve sa longueur l .
- Si $\mathbf{P}(l, \mathbf{C}) + W^s(l) \geq \mathbf{P}(l + dl, \mathbf{C}) + W^s(l + dl)$, la fissure se propage.

Et l'évolution de la fissure décrite par le critère de propagation des fissures est donc donnée par le signe de la quantité :

$$\frac{\mathbf{P}(l+dl, \mathbf{C}) - \mathbf{P}(l, \mathbf{C})}{dl} + 2\gamma \quad (4)$$

Avec γ : énergie de surface.

Après avoir rappelé cette approche théorique relative au comportement singulier de la pointe de l'entaille, nous allons dans ce qui suit développer notre analyse expérimentale sur la criticité de l'entaille que nous avons assimilée à un défaut soudure.

3. Approche Expérimentale

Dans la présente étude, des essais de flexion 3 points sont réalisés sur des éprouvettes entaillées en V, composées de bi-matériau l'acier dur utilisé notamment dans les rails (métal de base) et le matériau de la soudure aluminothermique. Ces éprouvettes ont été prélevées depuis une portion du rail qui contient une soudure.

La géométrie et les dimensions de ces éprouvettes que nous avons considérées ont été préconisées par la norme ISO 13586, elles sont rappelées par la figure 1. Il convient en particulier de vérifier que la longueur de l'entaille "l" se situe dans un intervalle compris entre (0,15 et 0,30 fois la largeur 2h des éprouvettes d'essai), cette dernière étant égale à deux fois leur épaisseur "e".

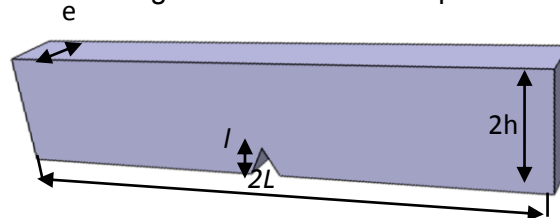


Figure 1. Eprouvette de flexion 3 points normalisée [15]

L'éprouvette soumise à une charge qui a pour effet de faire avancer la fissure jusqu'à la rupture, sans trop de déformation plastique à la pointe de l'entaille. La mesure de la valeur critique du paramètre de chargement conduisant à une propagation de la fissure permet une évaluation de la ténacité.

Les résultats des différents essais effectués seront présentés dans le paragraphe « Résultats et Discussions ».

La partie qui suit sera consacrée à l'étude numérique de cet essai. Nous détaillerons les moyens utilisés pour ce fait, pour pouvoir faire une comparaison entre les résultats expérimentaux et numériques.

4. Approche Numérique

1. Introduction

Nous avons simulé notre essai de flexion trois points, pour décrire l'évolution des contraintes et des champs de déformation plastique au fond de l'entaille en vue d'estimer les paramètres critiques d'ouverture des fissures. En plus, un modèle de calcul de l'accumulation des endommagements en point de l'entaille sous forme des contraintes et des déformations en trois dimensions est élaboré pour étudier l'effet d'hétérogénéité métallurgique (Bi-matériau) (zones métal fondu et métal de base). Et pour prédire le

processus complexe d'initiation et de propagation des fissures, nous avons choisi l'outil le plus adapté sous la base du logiciel *Abaqus* avec une loi de comportement élasto-plastique.

2. Modélisation numérique

- Géométrie

La géométrie que nous avons considérée pour notre étude numérique est une éprouvette entaillée en V issue d'une portion de rail soudée. Le présent modèle est constitué de deux zones (Figure 2) la zone 1 contient le métal de base et la zone 2 contient le métal de la soudure et qui peuvent être traités comme des matériaux élasto-plastiques différents.

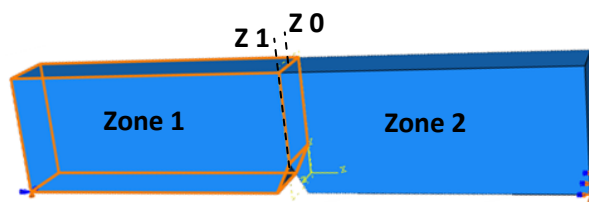


Figure 2. Géométrie de la structure étudiée

- Maillage

Pour le maillage de la structure et particulièrement au niveau de la pointe de l'entaille, nous avons utilisé des éléments volumiques de type tétraédrique à 3 nœuds du code *Abaqus* (Figure 3). Ce maillage a été très raffiné au niveau de l'entaille. En effet, le raffinement du maillage au niveau de cette zone particulière nous permettra de développer notre analyse à partir de résultats précis.

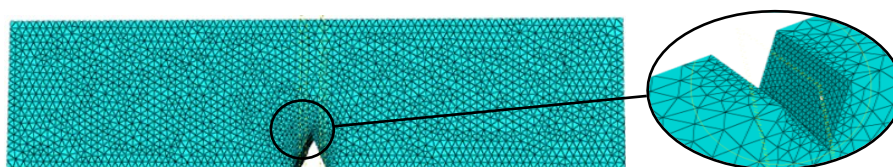


Figure 3. Maillage 3D de l'éprouvette

- Matériaux

Nous rappelons que parmi nos éprouvettes, certaines comportent deux zones comme le montre la figure 2. Pour les deux zones (Métal de Base ; Zone Soudée), le matériau que nous avons considéré est un acier destiné à l'industrie ferroviaire. Toutefois, les deux zones (MB et ZS) ont été différenciées par leurs paramètres [16]. Chacune de ces zones est caractérisée par ces propriétés présentées dans le tableau 1 ci-dessous et qui seront utiles pour notre modélisation.

Tableau1. Paramètres des matériaux affectés aux zones 1 et 2 [16].

	Module d'Young (GPa)	Coefficient de Poisson	Résistance à la limite élastique (MPa)	Densité (g/mm ³)
Zone (MB)	200	0,3	430 MPa	0,788
Zone (ZS)	243	0,3		

Dans cette étude, nous avons utilisé un modèle élasto-plastique, avec écrouissage cinématique linéaire qui a été jugé suffisant. La non-linéarité géométrique dans *Abaqus* a été également utilisée.

- Conditions aux limites et chargement

Pour les conditions aux limites, nous avons représenté exactement les conditions de contact entre les traverses de la machine et les éprouvettes. Nous avons donc modélisé ces conditions par une pièce de forme similaire en géométrie ainsi que celle dont la taille correspond au rayon de courbure des extrémités de la traverse mobile.

Pour les simulations en statique, nous avons appliqué pour les conditions initiales un déplacement de la traverse mobile ou milieu de l'éprouvette et nous avons bloqué le déplacement de l'éprouvette.

Les conditions aux limites que nous avons donc considérées pour cette sollicitation en flexion trois points sont représentées sur la Figure 3 :

Au niveau de la ligne L1 : $U_x = 0$; $U_y = 0$; $U_z = 0$.

Au niveau de la ligne L2 : $U_y = 0$.



Figure 4. Conditions aux limites et chargement de la structure

Après avoir décrit le protocole suivi dans notre approche expérimentale ainsi que la démarche de la simulation numérique, nous allons présenter dans le paragraphe suivant les résultats obtenus. Ces résultats seront discutés en confrontant les approches expérimentale et numérique.

5. Résultats et Discussions

Dans cette partie de notre étude, les résultats expérimentaux et numériques, seront présentés et discutés en vue d'analyser l'effet d'entaille sur le comportement mécanique d'une éprouvette en flexion trois points. De cette analyse, nous essayerons d'interpréter l'influence des défauts de la soudure aluminothermique sur le niveau des champs de contraintes et de déformations, qui sont les principales causes de la nucléation et de la propagation des fissures.

Après avoir simulé l'essai de flexion trois points avec une loi de comportement élasto-plastique, nous avons présenté en premier temps l'évolution de la contrainte en fonction de la distance.

1. Influence de l'entaille sur la distribution des contraintes

La figure 5, montre l'évolution des contraintes (σ_{xx} , σ_{yy} , σ_{zz}) depuis le fond de l'entaille jusqu'à la surface libre de l'éprouvette suivant l'axe **Z0** (Figure 2). Ces distributions ont été déterminées par la méthode des éléments finis, en considérant un modèle élasto-plastique.

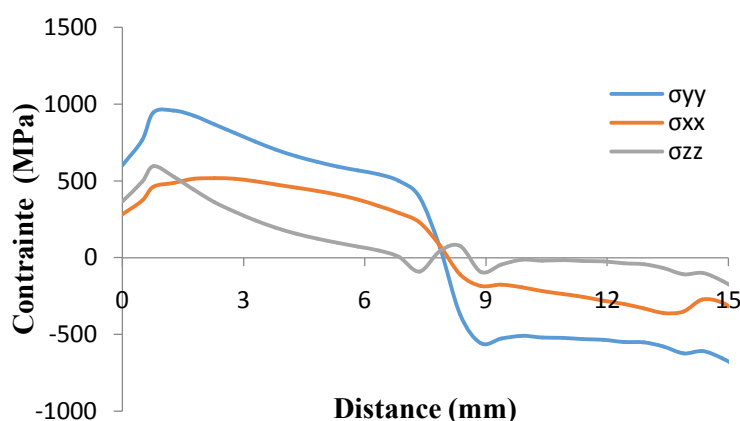


Figure 5. Distribution des contraintes σ_{xx} σ_{yy} σ_{zz} élasto-plastique en fonction de la distance au fond d'entaille

Selon ces distributions des contraintes (σ_{xx} , σ_{yy} , σ_{zz}) suivant l'axe **Z0** que nous avons déjà définis dans la figure 2, l'allure est celle d'une contrainte de flexion classique. En effet, les contraintes passent d'un état de tension en pointe de l'entaille à un état de compression en surface libre. Au niveau de ces deux extrémités (pointe de l'entaille et surface libre), la contrainte σ_{xx} atteint des valeurs critiques de l'ordre de 1000 MPa à une distance de 1,8 mm de la pointe de l'entaille. Nous remarquons la même distribution pour les autres contraintes (σ_{yy} , σ_{zz}) mais avec un niveau plus bas que celui de la contrainte σ_{xx} .

Comme cet axe **Z0** passe par le milieu de l'éprouvette et comme la limite élastique du matériau considéré est de 430 MPa, le processus de l'endommagement de l'éprouvette s'initie en pointe de l'entaille et au milieu de l'éprouvette. Ce processus peut se développer sous l'influence d'un état triaxial de la contrainte.

Pour les composantes des contraintes (σ_{xx} ; σ_{yy} et σ_{zz}), nous avons constaté que sa distribution est très sensible aux défauts (Entaille).

2. Influence de l'entaille sur la distribution des déformations

Comme pour la distribution de la contrainte σ_{xx} , la déformation ϵ_{xx} atteint des valeurs très critiques en pointe de l'entaille, 0,35 pour l'axe **Z1** et 0,77 pour l'axe **Z0** (Figure 6). Plus on s'éloigne de l'entaille ces valeurs diminuent et tendent vers zéro à une distance de 7,5 mm de l'entaille. Ces valeurs critiques

provoquent le mécanisme de glissement des plans atomiques les uns sur les autres, ce glissement de plans atomiques se fait grâce au déplacement de défauts linéaires sous forme des dislocations, qui génèrent des déformations plastiques macroscopiques significatives.

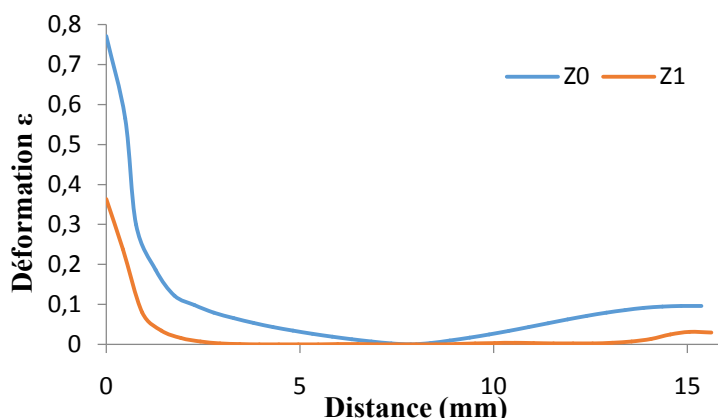


Figure 6. Evolution de la déformation à partir de la pointe de l'entaille suivant les deux axes **Z0** et **Z1**

À travers l'ensemble de ces distributions (Déformation et Contrainte), nous avons bien montré qu'au niveau de la point de l'entaille se développe de fortes concentrations de contraintes et de déformations. Ce sont ces concentrations qui génèrent les différentes phases de l'endommagement sous forme d'initiation et propagation de la fissure dans l'éprouvette.

Après avoir déterminé numériquement les champs de distributions des contraintes et déformations, nous avons réalisé des observations permettant de visualiser et d'interpréter les modes de fissuration générés sur nos éprouvettes de flexion trois points.

3. Observations des éprouvettes après endommagement

Dans la figure 7, nous avons regroupé les observations des quatre éprouvettes après endommagement par essais de flexion 3 points. Dans ces observations, nous pouvons distinguer les endommagements des éprouvettes suivant leur emplacement dans le rail.

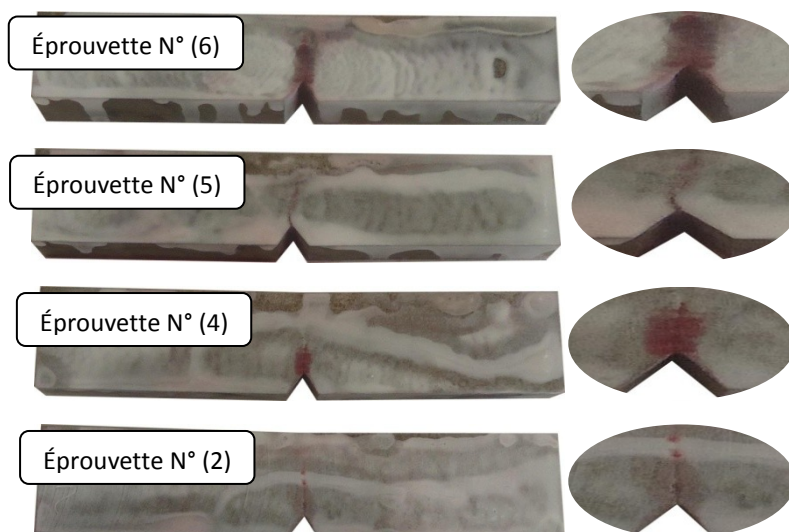


Figure 7. Eprouvettes après rupture par essais de flexion 3 points

Selon ces observations, nous pouvons constater que l'ensemble des éprouvettes présente après rupture par essai de flexion trois points des fissures de longueurs à peu près du même ordre de grandeur (environ 10 mm). Toutefois, pour ces éprouvettes des différences peuvent être relevées comme celles relatives au chemin de la fissure et à la flèche permanente.

4. Initiation et Propagation de la fissure

Pour mettre en évidence l'influence des zones soudées et saines sur l'initiation de la fissure sous la sollicitation de la flexion trois points, nous avons donc réalisé des observations au niveau de la fissure (Figure 7). À partir de ces observations, nous pouvons formuler deux principales remarques. La première est relative à l'initiation de la fissure et la seconde au chemin de propagation de la fissure. Pour l'initiation de la fissure, elle démarre à partir de la pointe de l'entaille pour les éprouvettes saines (N° 2 et N° 4). En

revanche, pour les éprouvettes soudées (N° 5 et N° 6), l'amorce de la fissure s'initie toujours proche de la pointe de l'entaille mais au niveau de son flanc comme le montre bien nos observations. Il semble donc que la différence au niveau de la structure atomique des deux matériaux (Métal de base, zone soudée) a un effet remarquable sur la nucléation de la fissure compte tenu du comportement hétérogène de la distribution métallurgique des graines macro et microscopique dans la zone soudée. Cependant, le métal de soudure dans cette étude présentait également une faible ténacité et ductilité. Les facteurs qui contribuent au comportement fragile du métal de soudage thermite sont la granulométrie grossière de l'austénite avant la transformation et la teneur en inclusion [17-19], ainsi que la présence des défauts.

Selon nos observations, la propagation aléatoire de la fissure démarre de la pointe de l'entaille vers le haut (Figure 7), suivant la section centrale (Interface MB/ZS). Dans cette zone, la fissure se propage par une ouverture combinée des deux modes, le mode I et le mode II. Cependant, les fissures de mode II ont souvent tendance à se ramifier par une nouvelle fissure qui est initiée au niveau de l'un des flancs de fissure. Cette nouvelle fissure a alors tendance à se propager dans la section intermédiaire des deux zones (MB/ZS). La fissure continue de croître dans des conditions de mode mixtes, bien que le facteur de contrainte en mode I devienne plus important. La fissure est exclusivement gouvernée par la flexion et par les contraintes de cisaillement générées par les conditions de chargement résultant d'une superposition des contraintes thermiques et résiduelles. Cependant, la croissance des fissures a lieu sous une influence significative du comportement métallurgique des éprouvettes. La dernière étape de l'extension de fissure est interrompue par la rupture de l'éprouvette lorsque l'intensité de la contrainte le long du front de fissure devient égale ou supérieure à la ténacité de la rupture du matériau.

5. Comparaison des résultats Expérimentaux et Numériques

Pour une comparaison de nos résultats expérimentaux et numériques, nous avons représenté sur la figure 8, une cartographie numérique de la distribution des contraintes critiques et nos éprouvettes endommagées. Selon cette représentation, nos simulations numériques reproduisent bien les allures aléatoires des fissures par flexion trois points. Nous rappelons que le modèle numérique (XFEM) de l'initiation et de la propagation des fissures du logiciel *Abaqus* a été utilisé pour établir les mécanismes de croissance des fissures. De même, l'influence de la liaison entre les deux zones (Métal de Base, Zone Soudée), a été modélisée.

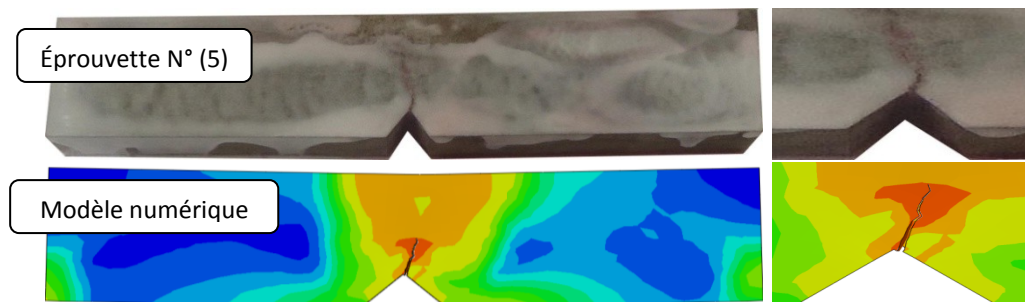


Figure 8. Comparaison des résultats numériques et expérimentaux (globale)

À travers cette bonne concordance, nous pouvons qualifier notre modèle numérique de fiable et nous pouvons l'exploiter pour simuler les éventuelles propagations des fissures dans différentes configurations. Par rapport à la structure du rail, lorsque nous précisons la position et la taille d'un défaut donné nous pouvons par des simulations numériques prédire si une fissure peut s'initier à partir de ce défaut.

6. Conclusion

Dans le présent article, l'effet des défauts de la soudure aluminothermique sur la nucléation et la croissance des fissures ont été analysées sous des charges statiques. Dans notre analyse nous avons tout d'abord développé une modélisation théorique de la concentration des contraintes au fond de la fissure à différents stades de l'initiation et de la propagation d'une fissure. Compte tenu de la complexité du problème, nous avons assimilé le comportement des défauts d'adhésion à celui d'une entaille en V dans une éprouvette issue de différentes zones du rail. Pour ces éprouvettes, nous avons distingué le cas de bi-matériau avec des éprouvettes constituées de deux zones (Zone soudée, et métal de base), et des éprouvettes homogènes prélevées du métal de base. Sur ces éprouvettes, nous avons réalisé des essais de flexion trois points. Les premiers résultats de ces essais ont clairement montré que l'ensemble des éprouvettes présente après rupture des fissures de longueurs à peu près du même ordre de grandeur (environ 10 mm). Toutefois, pour ces éprouvettes (saines et avec soudure) des différences peuvent être

relevées comme celles relatives au chemin de la fissure et à la flèche permanente. Et parallèlement à ces essais expérimentaux, nous avons effectué des simulations numériques dans des conditions similaires à l'expérience réelle qui nous ont permis de conclure que les résultats numériques et expérimentaux convergent. À partir de cette convergence, nous avons approfondi notre analyse par des simulations numériques et nous avons obtenu les conclusions suivantes :

Les fissures apparaissent à un niveau de contraintes dépassant la limite élastique du matériau, après une concentration importante des contraintes plastiques ou fond de l'entaille. Par les simulations, nous avons confirmé que la zone d'initiation de la fissure est située au niveau du flan de l'entaille du côté de la soudure, comme cela a été observé. En ce qui concerne la propagation de la fissure, les simulations ont montré que le chemin avec diverses déviations est bien gouverné localement par les distributions singulières des contraintes.

7. Bibliographie

- [1] O. BOUAZAOUI ¹, A. CHOUAF ¹, A. EL AMRI ¹, Z. ELMASKAOUI ² "Assimilation du défaut d'adhésion à une entaille pour analyser expérimentalement et numériquement le comportement mécanique des rails" 1ère Conférence Internationale sur la Mécanique des Matériaux et des Structure, du 27 au 29 Nov. 2014, Marrakech.
- [2] O. BOUAZAOUI, A. CHOUAF, M. CHERGUI "Analyse du Champ de Déformations Dans les Zones Soudées par Aluminothermie des Rails", 13ème Congrès De Mécanique 11-14 avril 2017, Meknès, MAROC
- [3] 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.
- [4] O. BOUAZAOUI, A. CHOUAF, Severity of the residual stress depending on the width of welding in the rails. International Review of Mechanical Engineering (I.R.E.M.E.), Vol. 10, N. 7, November 2016. pp. 523-530.
- [5] Dieter Radaj, Heat Effects of Welding Temperature Field, Residual Stress, Distortion. With 265 Figures. Springer-Verlag Springer-Verlag Berlin Heidelberg 1992
- [6] Vincent LE CORRE ; Etude de la compétition déchirure ductile / rupture fragile: application a la tenue mécanique des tubes en acier c -mn et de leurs joints soudés. Doctorat délivré conjointement par l'école centrale de Lille et l'université des sciences et technologies de Lille. 2006.
- [7] Vincent ROBIN, De la Modélisation numérique des procédés et du soudage en particulier au comportement mécanique des assemblages. L'École Nationale Supérieure des Mines de Saint-Étienne. 23 octobre 2009.
- [8] Skyttebol A. Continuous welded railway rails. PhD Thesis, Chalmers University. Sweden; 2004.
- [9] Mutton PJ, Alvarez EF. Failure modes in alumino-thermic rail welds under high axle load conditions. Eng Fail Anal 2004;11(2):151–66.
- [10] A. Skyttebol*, B.L. Josefson, J.W. Ringsberg Fatigue crack growth in a welded rail under the influence of residual stresses. Engineering Fracture Mechanics 72 (2005) 271–285.
- [11] Zerbst U, Ma'dler K, Hintze H. Fracture mechanics in railway applications—an overview. Eng Fract Mech 2005;72(2):163–94.
- [12] H. Desimone, S. Beretta * Mechanisms of mixed mode fatigue crack propagation at rail butt-welds. International Journal of Fatigue 28 (2006) 635–642
- [13] Telliskivi T, Olofsson U. Wheel–rail wear simulation. Wear 2004;257:1145–53.
- [14] Pierre Suquet. Rupture et Plasticité. ENSTA ParisTech Pp 1-80
- [15] Bui, H.D. Mécanique de la Rupture Fragile. Masson, Paris (1978).
- [16] I. Mouallif, A. Chouaf, A. El amri and A. Benali, Effects of alumino-thermic welding defects on the rails mechanical behavior, Mécanique & Industries / Volume 12 / Issue 05 / January 2011, pp 343-351.
- [17] Schroeder, L. C. and Poirier, D. R. The mechanical properties of thermite welds in premium alloy rails. Mater. Sci. Eng., 1984, 63, 1.
- [18] Nenad Ili ,* Milan T. Jovanovi ,* Mi a Todorovi , Milan Trtanj, and Petar aponjic. "Microstructural and Mechanical Characterization of Postweld Heat-Treated Thermite Weld in Rails" MATERIALS CHARACTERIZATION 43:243–250 (1999).
- [19] M. Jezini-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.