

ETUDE DE LA RESISTANCE A LA FATIGUE DES ACIERS POUR PIPELINE X70

Adel Deliou^{1,2,*}, Benattou Bouchouicha², Khmissi Belkaid¹, Sofiane Boulkroune¹, Mohamed Chaour¹, Ghania Slimani¹

¹Research Center in Industry technologies CRTI, P.O.Box 64, Cheraga 16014, Algiers, Algeria

²LMSR, Département de Génie Mécanique, Université de Sidi Belabbe, Algérie

*del032003@yahoo.fr

Abstract—L'objectif de notre travail est d'étudier la propagation de la fissure en fatigue dans les différentes zones du joint soudé en acier API 5L X70 utilisé pour la fabrication des pipelines, le procédé de soudage est à l'arc sous flux. Dans une première partie de cette étude on a caractérisé notre matériau par des essais mécaniques de contrôles destructifs comme la traction, la microstructure et la dureté dans les différentes zones du joint soudé. Pour une meilleure compréhension des processus conduisant à la déchirure ductile des matériaux soudés, nous avons vérifié l'évolution de l'intégral J et le déplacement de l'ouverture en fond de fissure en fonction de l'avancée de la fissure par la méthode des éléments finis en utilisant un code de calcul Abaqus dans les deux matériaux ; le métal fondu et le métal de base.

Keywords— Joint soudé X70, Intégral J, CTOD, Rupture ductile

I. INTRODUCTION

La mécanique de la rupture a pour but d'étudier le comportement mécanique des structures contenant des fissures ou défauts [1]. Lorsque la plasticité est plus développée, les équations de champs de contraintes et de déformations plastiques basées sur la théorie d'élasticité ne sont pas vérifiées et il devient indispensable de faire appel à d'autres concepts et particulièrement à ceux de la mécanique élastoplastique de la rupture[2]. Plusieurs approches énergétiques globales ont été proposées. Cherepanov[3] et Rice[4] ont défini une intégrale de contour appelé Intégral J, caractérisant le taux de restitution d'énergie d'une structure contenant une fissure, lors de l'avancée de celle-ci. L'interprétation énergétique de l'intégrale J a conduit Begley [5] à proposer la première méthode expérimentale d'évaluation du paramètre J. Elle nécessite l'utilisation de plusieurs éprouvettes identiques contenant des fissures de longues différentes. Le comportement d'une fissure peut être décrit aussi par l'écartement des deux surfaces en fond de fissure (CTOD: Crack Tip Opening Displacement) [6]. Utilisant le modèle de plastification proposé par Dugdale, cette ouverture physique et à la frontière de la zone plastique a été calculée par Burdekin et Stone[7] en fonction de la contrainte appliquée, de la limite d'élasticité et de la longueur de la fissure. Des études expérimentales effectuées par Haesler [8-9] pour étudier l'influence de Mis-matching sur les paramètres énergétiques J et CTOD, en modélisant le joint soudé par une éprouvette CCP, ont été montrées que la plasticité se développe du côté du métal fondu en cas d'under-matching et du côté du métal de base en cas d'over-matching. Dans cet article, nous avons étudié l'évolution de l'intégral J et le déplacement de l'ouverture en fond de fissure CTOD en fonction de l'avancée de la fissure par

l'utilisation de la méthode des éléments finis (Abaqus) pour les deux matériaux : le métal de base et le métal fondu du joint soudé X70 et on a montré par les résultats de cette méthode que le métal fondu présente les meilleures résistances mécaniques à la fatigue.

II. COMPORTEMENT MÉCANIQUE

A. Matériau utilisé

Le matériau étudié est un acier à haute limite d'élasticité de grade API X 70 utilisé pour la fabrication de pipelines, le procédé de soudage est à l'arc sous flux (Submerged Arc Welding SAW).

B. Composition chimique

Les analyses chimiques de l'acier à haute limite élastique HSLA, micro allié de type API-X70 selon les normes des API (American Petroleum Institute), dont la composition chimique est donnée en tableau 1 et celle du métal fondu au tableau 2. Les teneurs en carbone équivalent du métal de base (MB) et celle du métal fondu (MF), calculée d'après la formule 1 ci-dessous proposée par l'Institut International de Soudure [10], sont respectivement de 0.40 et 0.39 %.

$$C_{\text{éq}} = c + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr+Mo+V}{5} + \frac{Ni+Cu}{15} \quad (1)$$

TABLEAU1. COMPOSITION CHIMIQUE DE L'ACIER X70 EN FONCTION % MASSIQUE

C	Mn	Si	Cr	Ni	Mo	V
0.064	1.640	0.290	0.051	0.009	0.021	0.050
Al	Ti	Nb	Cu	P	Sn	S
0.038	0.020	0.056	0.023	0.011	0.036	0.004

TABLEAU2. COMPOSITION CHIMIQUE DU METAL DEPOSE EN FONCTION % MASSIQUE

C	Mn	Si	Cr	Ni	Mo	V
0.070	1.610	0.250	0.035	0.030	0.133	0.060
Al	Ti	Nb	Cu	P	Sn	S
0.017	0.017	0.040	0.046	0.014	0.003	0.004

C. Analyse micrographique

L'analyse micrographique de l'acier a été réalisée à l'aide de microscope optique, après une attaque chimique au moyen de réactif Nital de 3%, on a comparé les images dans les différentes zones du joint soudé (une coupe transversale). Les microstructures obtenues sont les suivantes :

A cause du laminage, l'acier X70 présente une structure fine orientée en bande alternées de ferrite et perlite : ferrite en blanc et perlite en foncé(Fig.1a). Cette structure est produite par la ségrégation en Mn et P. A l'approche du cordon de soudure en proche de la ZAT on remarque une organisation plus homogène des grains, dans la ZAT (Fig.1b) ils apparaissent des grains de ferrite aciculaire sous forme d'aiguilles à grains fin. Les précipités des micros alliage affinent les grains d'austénite mène après la transformation à une structure ferritique polygonale à grains fin. La microstructure du métal fondu(Fig.1c) est constituée de ferrite polygonale dominante ferrite aciculaire autour des inclusions et des ilots de perlite.

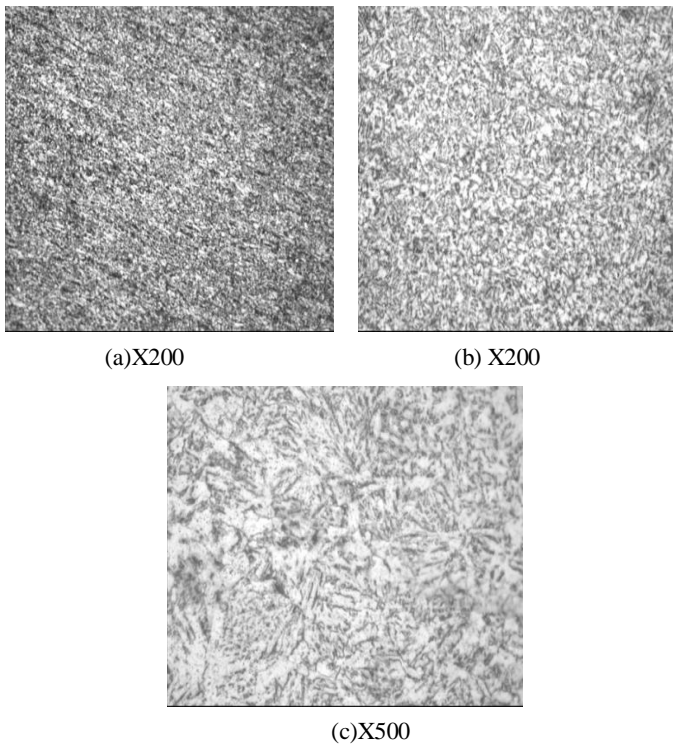


FIGURE 1. MICROGRAPHIES OPTIQUES MONTRANT LA MICROSTRUCTURE DU METAL DE BASE(A), METAL FONDU(B) ET ZONE AFFECTEE THERMIQUEMENT(C)

D. Mesure de dureté

Des filiations de dureté Vickers sous 10KgF de charge, ont été effectuées à raison d'un millimètre dans l'épaisseur du joint soudé sur une coupe transversale au milieu. Les mesures de dureté ont présentées dans la figure 2. Les résultats de la dureté représentant le cordon de soudure ont montré une uniformité des valeurs entre le métal de base et le cordon de soudure signe de bonne propriété. Les grandes valeurs de la dureté sont les points de la ZAT.

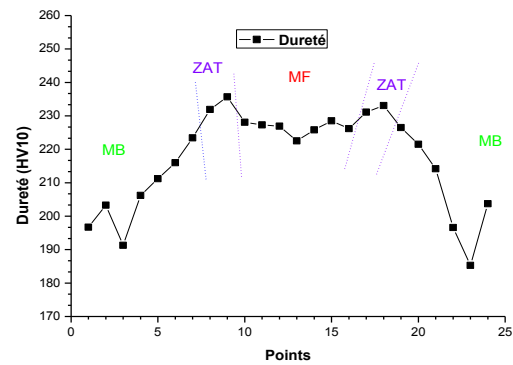


FIGURE 2. FILIATIONS DE DURETE EFFECTUEES SUR LE JOINT SOUDE EN TRANSVERSALE AU CORDON DE SOUDURE

E. Essai de traction

Afin d'évaluer la courbe de contrainte de charge et les propriétés mécaniques du X70, des éprouvettes plates conformes aux exigences de l'API ont été utilisées. Les essais de traction ont été réalisés sur une machine d'essai servo-hydraulique de type MFL PRUFSYSTEM d'une capacité de 600 KN et avec une faible vitesse de déformation (1mm / min). Les échantillons ont été prélevés dans le sens du laminage (Fig.3).

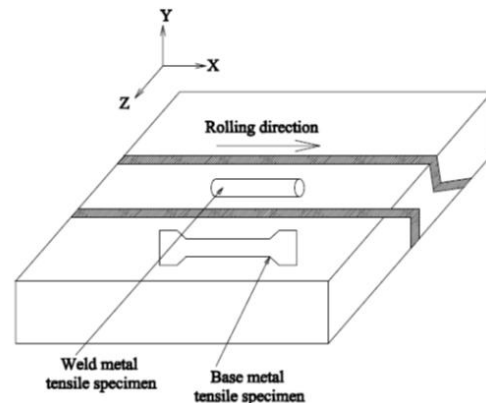


FIGURE3. SCHEMA DE LA DIRECTION DE PRELEVEMENT DES EPROUVETTES

Les dimensions des éprouvettes de métal fondu utilisées conformément aux normes ASTM A370 et API 5L sont présentées à la figure 3.

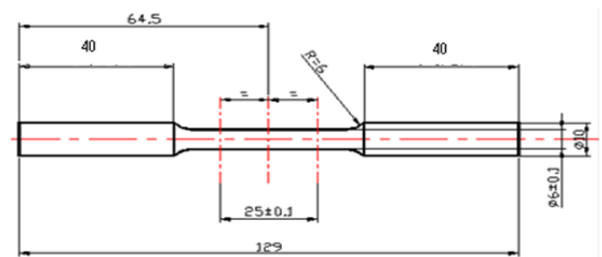


FIGURE4. DIAGRAMME ET DIMENSIONS DES EPROUVETTES DE METAL SOUDE UTILISEES POUR LES ESSAIS DE TRACTION

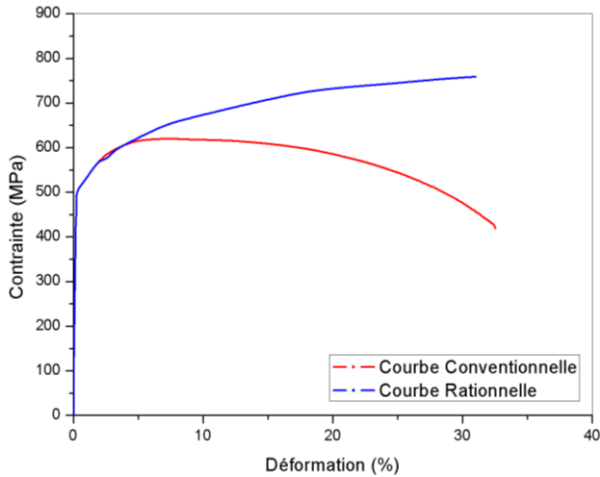


FIGURE 5. COURBE DE TRACTION CONVENTIONNELLE ET RATIONNELLE DE METAL DE BASE X70

La figure 5 présente les résultats de la traction conventionnelle et rationnelle de l'évolution de la contrainte en fonction de la déformation du métal de base X70. L'allure totale de cette courbe a mis en évidence un comportement ductile. Le tableau 3 présente Les propriétés mécaniques du métal de base X70 trouvés par l'essai de traction.

TABLEAU 3. PROPRIETES EN TRACTION DE X70

	E [Gpa]	v	σ_Y [Mpa]	σ_U [Mpa]	A (%)	K	n
X70	221	0.3	500.3	573.14	33	840	0.25

Où E le module de Young, v le coefficient de Poisson, σ_Y la limite d'élasticité, σ_U la résistance ultime, A% la ductilité et k et n sont les paramètres de Hollomon. Le tableau 4 présente les propriétés mécaniques du métal soudé obtenu.

TABLEAU 4. PROPRIETES MECANQUES DU JOINT SOUDE

Matériau	σ_Y [Mpa]	σ_U [Mpa]	Elongation (mm)
MF	603.44	642.80	4.33

III. EVOLUTION DES CONCEPTS DE LA MECANIQUE DE LA RUPTURE

A. Evolution de l'intégral J en fonction de l'avancée de la fissure

L'étude énergétique d'une éprouvette fissurée, dont le comportement est non linéaire, s'effectue à l'aide du taux de restitution d'énergie non linéaire ou intégrale J nommé par Rice. Ce paramètre caractérise, de façon unique les champs des contraintes et de déformation au voisinage de l'extrémité d'une fissure dans un matériau non linéaire. L'étude numérique par la méthode des éléments finis est effectuée sur des éprouvettes CT 50 (Fig.6) en comparant l'évolution des concepts de la mécanique de la rupture de l'intégral J et le CTOD pour les deux zones : le métal de base MB et le métal fondu MF présentant des zones ayant des caractéristiques mécaniques différentes.

La figure 7, présentant l'évolution de J en fonction du déplacement imposé montre que l'intégral J a le même spectre pour les deux éprouvettes étudiées (MB et MF). Les valeurs les plus élevées sont observées pour les éprouvettes dont la fissure est en métal de base MB égale à 64.78 kJ/m², cependant, le métal fondu présente une ténacité, exprimée par $J_{0,2}$ égale à 52.88 kJ/m². L'évolution des valeurs de l'intégrale J pour les deux matériaux est presque identique qui montre le bon choix du métal déposé. Le métal de base est le moins résistant à l'avancée de la fissure parce qu'il a de moins propriétés mécaniques (module d'Young et limite élastique)

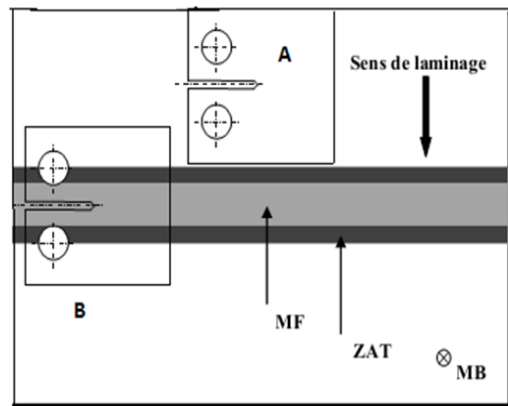


FIGURE 6. LES DEUX ZONES MB ET MF ETUDIÉES AVEC ENTAILLE MECANIQUE DE L'ÉPROUVETTE CT50.

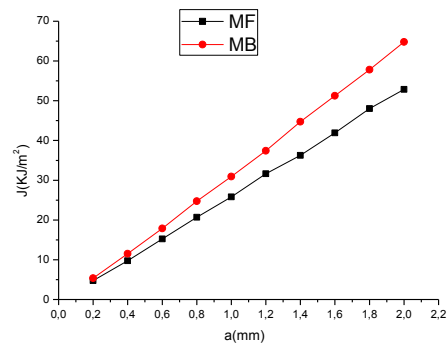


FIGURE 7. EVOLUTION DE L'INTEGRALE J EN FONCTION DU DEPLACEMENT

B. Déplacement de l'ouverture en fond de fissure(CTOD)

La figure 8, présentant l'évolution du CTOD en fonction du déplacement imposé montre que l'ouverture au fond de la fissure présente la même évolution, et presque la même dans les deux configurations étudiées (MB et MF).

Cette constatation signifie que l'ouverture au fond de la fissure dépend essentiellement du comportement du matériau ayant la plus faible limite d'élasticité. Ces ouvertures dépendent du niveau de la résistance de chacun des matériaux adjacents à l'entaille (niveau de Mismatching et la ZAT est plus résistante que le MB). C'est pourquoi l'ouverture se développe d'une manière plus importante du côté du métal de base dont la résistance est la plus faible.

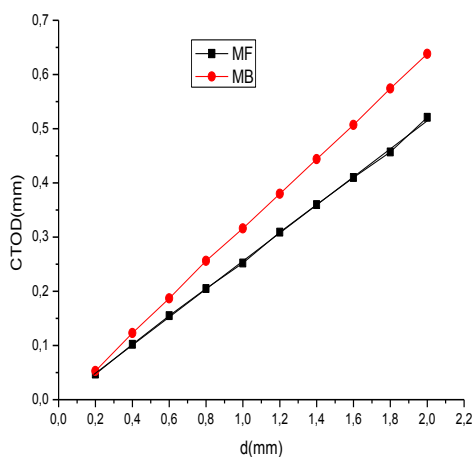


FIGURE 8. ÉVOLUTION DU CTOD EN FONCTION DU DEPLACEMENT IMPOSE

Cette évolution de déplacement de l'ouverture en front de fissure δ est attendu puisqu'elle suit une relation linéaire entre le paramètre J et le CTOD qui se correspond sous la forme:

$$\frac{J}{\sigma_0} = m \delta \quad (2)$$

Où : m est une constante qui dépend de l'état des contraintes et des propriétés du matériau et σ_0 est la limite d'élasticité.

IV. CONCLUSION

Cette étude constitue une contribution à l'étude numérique de la déchirure ductile de l'acier X70. La déchirure ductile, analysée par les méthodes de l'approche globale par l'intégral J et CTOD, intervient dans les études de nocivité des défauts des joints soudés. Les essais mécaniques de contrôle destructifs, des essais de traction, d'analyse de la microstructure et de la dureté dans du cordon de soudure montrent une hétérogénéité des propriétés mécaniques de zones du joint soudé. L'évolution d'une fissure dépend de plusieurs paramètres intrinsèques au matériau, tel que les propriétés géométriques et mécaniques de la structure ou extrinsèques comme l'étendue de cette fissure ou la nature des charges appliquées. Les résultats

obtenus montrent le bon choix du métal déposé lors du procédé du soudage à l'arc sous flux.

REFERENCES

- [1] Hutchinson JW. Singular behaviour at the end of a tensile crack in a hardening material. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids* 1968 ;16:13-31.
- [2] Rice JR, Rosengren GF. Plane strain deformation near crack tip in a power-law hardening material. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids* 1968;16:1-12.
- [3] Cherepanov GP. Crack propagation in continuous media, *Appt Math. and Mech. Translation* 1967; 31: 504-516.
- [4] Rice JR. A path independant integral and the approximate analysis of strain concentration by notches and crack. *Journal of Applied Mechanics* 1967; 35: 379-386.
- [5] Begley J A, Landes JD. The J-integral as a fracture criterion, *ASTM STP 514*, American Society of Testing and Materials, Philadelphia 1972: 1-20.
- [6] Wells AA. Application of fracture mechanics at and beyond general yielding. *British Welding Institute Journal* 1963; 10-11: 563-570.
- [7] Burdekin FM, Stone DEW. The crack opening displacement approach to fracture mechanics in yielding materials, *J. Strain Anal.* 1996; 1: 145
- [8] Haesler V, Bez R. Modèles de charge actualisés du trafic routier pour l'évaluation de ponts existants / Document justificatif, EPFL, ICOM, Lausanne, décembre 1994 (mandat du Département des Travaux Publics du Canton du Valais, rapport ICOM N°643-4).
- [9] Haesler V, Bez R. Modèles de charge actualisés du trafic routier pour l'évaluation de ponts existants / Document d'utilisation, EPFL, ICOM, Lausanne, décembre 1995 (mandat du Département des Travaux Publics du Canton du Valais, rapport ICOM N°643-3 rév. 1).
- [10] Hinton RW, Wisswrsrer RK. Estimating welding preheat requirements for unknown grades of carbon and low-alloy steels. *Welding journal* 2008; 78:273-278.