

Réparation par patch composite des pipelines sous charge de la pression interne

**E. ABDELOUAHED^a, H. BENZAAMA^b, B. AOUR^c, M. MOKHTARI^d,
A.A. TADJEDDINE^e**

a. Laboratoire LABAB, ENP Oran MA, Algérie, heabamine@gmail.com

b. Laboratoire LABAB, ENP Oran MA, Algérie, habenza@yahoo.fr

c. Laboratoire LABAB, ENP Oran MA, Algérie, ben_aour@yahoo.fr

d. Laboratoire LaRTFM, ENP Oran MA, Algérie, mokhtarimohamed44@yahoo.fr

e. Laboratoire SCAMRE, ENP Oran MA, Algérie, atadj1@gmail.com

Résumé :

Dans cette étude, en utilisant la méthode des éléments finis tridimensionnels pour analyser les effets des contraintes thermiques résiduelles dues au durcissement de l'adhésif sur l'efficacité de la réparation par patch composite collée des pipelines fissurés. La variation du facteur d'intensité de contrainte au fond de fissure est utilisée pour évaluer les performances de réparation. Les effets des propriétés géométriques et mécaniques du patch composite et de l'adhésif sur l'efficacité de la réparation ont été mis en évidence. Les résultats obtenus montrent que les contraintes thermiques résiduelles augmentent significativement le facteur d'intensité de contrainte au fond de la fissure ce qui réduit l'efficacité de la réparation.

Mots clefs : FEM, réparation par patch composite, pipeline, fissuration, pression interne, température, FIC

1 Introduction (16 gras)

Pour la réparation du pipeline, il convient de prendre en compte un certain nombre de problèmes de conception technique qui peuvent être importants en fonction des circonstances de la réparation. L'application d'une réparation collée sur un pipeline pose un certain nombre de problèmes techniques de conception de matériaux qui peuvent être importants en fonction des circonstances de la réparation. [5] Un exemple est le développement de contraintes résiduelles lorsqu'un adhésif à température de durcissement élevée est utilisé pour coller un patch de réparation sur un substrat ayant un coefficient de dilatation thermique différent. [6] Le principal inconvénient de l'utilisation de gr / ep (graphite / époxy), b / ep (bore / époxy) et g / p (verre / époxy) résulte d'une divergence des coefficients de dilatation thermique entre le composite et le métal. [7] Les contraintes thermiques résiduelles sont particulièrement importantes lorsque des adhésifs durcissant à haute température sont utilisés pour coller le timbre.

Par exemple, dans une réparation typique appliquée à des structures de pipeline, la région renforcée est initialement chauffée à une température d'environ 100 à 120 ° C sous pression pendant environ 1 heure, puis refroidie à la température ambiante après durcissement de l'adhésif. [8] En raison des différences entre les propriétés élastiques et les propriétés de dilatation thermique du patch composite et du pipeline métallique, des contraintes thermiques résiduelles peuvent se produire. Il est reconnu depuis longtemps que, dans certains cas, le stress thermique résiduel est un problème sérieux pour

l'efficacité de la réparation des patchs composites. [9] Si le matériau de réparation est différent du substrat, le niveau de contrainte résiduelle doit être calculé pendant le processus de conception. [dix] De nombreuses tentatives ont été faites ces dernières années pour estimer les valeurs de ces contraintes résiduelles. Köppler et al. [11] ont utilisé une méthode analytique basée sur la mécanique de la rupture élastique linéaire et la méthode des éléments finis et ont considéré un pipeline en acier présentant un défaut traversant la paroi réparé avec un matériau composite. Zarrinzadeh et al. [12] ont utilisé le logiciel ABAQUS pour mieux simuler les résultats expérimentaux de tuyaux en aluminium fissurés avec réparation de patchs sous fatigue. T. Nateche et al. [13] ont utilisé un patch composite pour réparer les canalisations endommagées. C'est une méthode rapide et économique sans interruption de service.

Mhamdia et al. [14] ont analysé les effets de la contrainte thermique résiduelle sur la variation du facteur d'intensité de contrainte dans une plaque d'aluminium réparée avec un patch composite bore / époxy.

Selon Albedah et al. [15] La contrainte thermique résiduelle a entraîné une réduction de la durée de vie en fatigue des structures aéronautiques réparées. Pour atténuer les effets de la contrainte thermique résiduelle sur les performances de réparation, la température de durcissement et les propriétés adhésives doivent être optimisées. Lam et al. [16] ont également envisagé un tube circulaire réparé par un patch composite afin d'étudier son effet sur la réduction des facteurs d'intensité de stress.

Le but de cette étude est d'analyser l'effet de la variation du facteur de contrainte de contrainte de la fissure réparée dans les pipelines en acier avec un patch composite collé. Les nouveautés de ce travail sont les études paramétriques des effets des propriétés géométriques, thermiques et mécaniques du composite sur la variation du facteur d'intensité de contrainte à la fin des fissures réparées avec un patch composite collé.

2 Modèle d'éléments finis

Le pipeline en acier de craquage qui est réparé par une patche composite sous une charge de pression interne comme représenté sur la figure 1. L'API 5L X70 de pipeline élastique en acier cylindrique ayant les dimensions suivantes: Dpipe diamètre = 12 pouces, Lpipe longueur = 1.000 mm, EPIPE épaisseur = 4 mm. Une fissure transversale de longueur 2a par rapport à l'axe du tuyau est supposée exister dans le pipeline. Cette fissure est réparée avec un patch composite de bore / époxy de 2 mm d'épaisseur et de longueur 4a. L'adhésif utilisé pour le collage est le FM-73 avec une épaisseur $e_a = 0,2$ mm, le diamètre intérieur est égal au diamètre extérieur du patch composite. Le diamètre intérieur du patch composite est égal au diamètre extérieur du pipeline. La colle est durcie à 120 ° C et la température ambiante est considérée comme étant égale à 20 ° C. Les propriétés élastiques et thermiques du pipeline et du composite sont également indiquées dans le tableau 1.

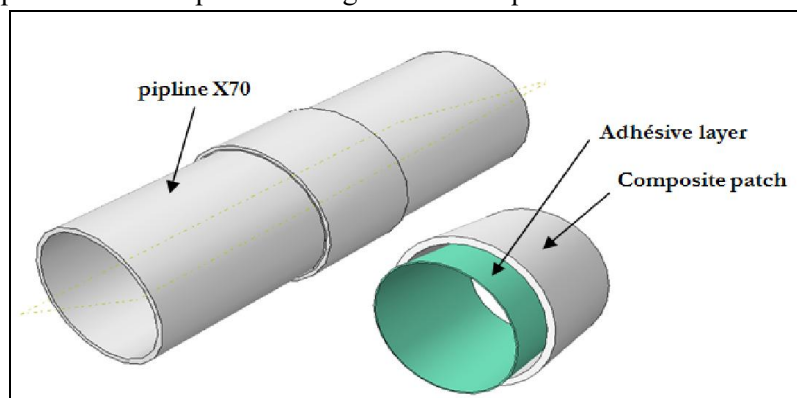


Fig. 1. Schéma d'un tuyau d'aluminium fissuré réparé par un patch composite

Tab.1. Propriétés élastiques et thermiques pour différents matériaux

E_1	E_2	E_3	G_{12}	G_{13}	G_{23}	ν_{12}	ν_{13}	ν_{23}	α_{12}	α_{13}	α_{23}
-------	-------	-------	----------	----------	----------	------------	------------	------------	---------------	---------------	---------------

	(GPa)	(GPa)	(GPa)	(GPa)	(GPa)	(GPa)				(10 ⁻⁶ °C)	(10 ⁻⁶ °C)	(10 ⁻⁶ °C)
API 5L X70	207						0.33			22.5		
Adhesive (FM-73)				0.42			0.30					
Bore/époxy	200	19.6	19.6	7.2	5.5	5.5	0.3	0.28	0.28	4.5	23	23
Glass/époxy	50	14.5	14.5	2.56	2.56	2.24	0.33	0.33	0.33	5.5	15	15
Carbone/époxy	134	10.3	10.3	5.5	5.5	3.2	0.33	0.33	0.53	-1.2	34	34

Le modèle d'éléments finis comprend trois sous-sections ; pipeline fissuré, patch adhésif et composite. En raison de la symétrie, seule la moitié du pipeline réparé est prise en compte. Pour générer le front de fissure, un certain nombre d'éléments créés à l'origine autour du fond de fissure sont remplacés par un "bloc de fissure". Ce bloc de fissures est maillé avec des éléments quadratiques, qui sont cartographiés dans l'espace des éléments d'origine et fusionnés avec un maillage quadratique. Le maillage a été raffiné près de la zone d'extrémité de la fissure en utilisant au moins 10 éléments à l'avant et à l'arrière du fond de la fissure. Nous avons affiné le maillage proportionnellement au nombre d'éléments ce qui donne la convergence des résultats. Nous avons utilisé des éléments quadratiques basés sur des fonctions d'interpolation linéaire afin d'obtenir un coût de calcul faible. Un point de Gauss est utilisé par élément, ce qui nous permet d'avoir un schéma d'intégration réduit. La figure 2 montre le maillage global du modèle et son raffinement dans la zone du fond de fissure. Le facteur d'intensité de contrainte au front de fissure a été calculé à l'aide de la technique de fermeture virtuelle de la fissure; C'est une technique d'extraction FIC très intéressante en raison de sa bonne précision, de son algorithme d'application relativement simple et de son aptitude à calculer les facteurs d'intensité de contrainte pour les trois modes de fracture.

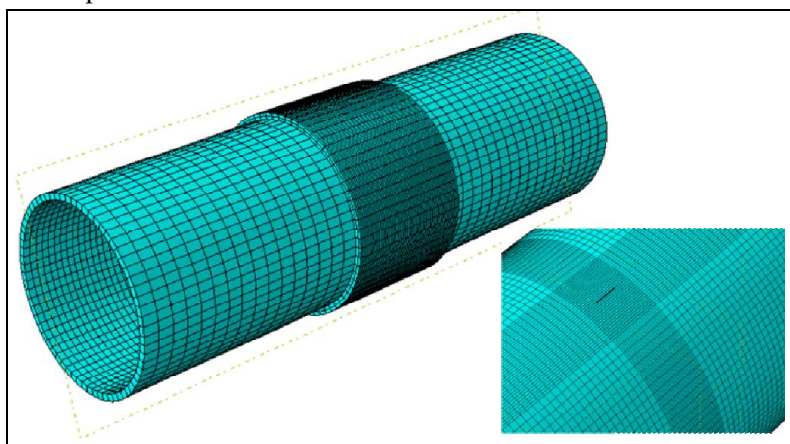


Fig.2. Maillage global de l'échantillon

3 Résultats et discussion

3.1 Effet de la pression interne

La figure 3 montre la variation du facteur d'intensité de contrainte dans le pipeline fissuré et réparé selon trois types de patch composite (bore / époxy, verre / époxy et carbone / époxy) en fonction du changement de pression interne dans la rupture du pipeline. Le facteur d'intensité de contrainte (KI) est calculé dans la direction de la fibre (parallèlement à la direction de la charge appliquée). Nous pouvons voir que le processus de durcissement par adhésif implique un niveau relativement élevé de FIC au niveau du front de fissure dans le pipeline. Cela signifie que l'adhésif et le patch sont en tension. Les contraintes de traction sont exercées par le pipeline sous pression. L'intensité des

contraintes dans le patch est moins importante comparée à la contrainte dans le pipeline. En effet, le coefficient de dilatation thermique de l'acier est supérieur à celui de (bore / époxy, carbone / époxy et verre / époxy). Cependant, les contraintes dans le composite sont relativement importantes en raison du transfert des contraintes du pipeline en acier à la pièce composite à travers la couche adhésive. D'autre part, on peut également dire que le meilleur composite pour la réparation sous haute pression est le bore / époxy

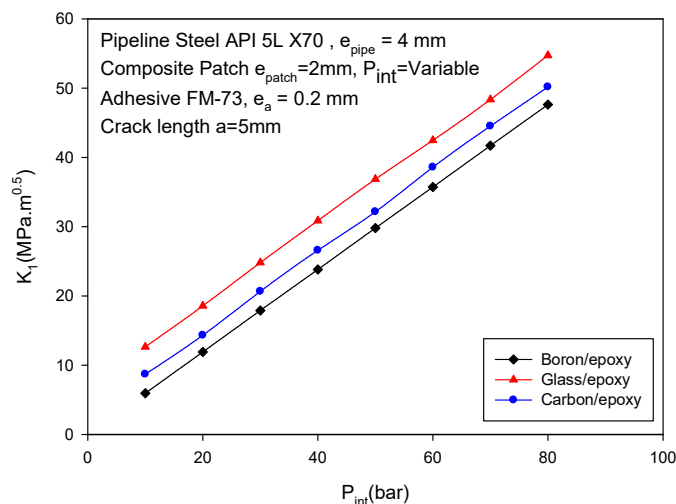


Fig.3. Variation de FIC en fonction de la pression interne

3.2 Effet de la température

La figure 4 utilise la variation du facteur d'intensité de contrainte dans le pipeline fissuré et réparé selon trois types différents de patches composites (bore / époxy, verre / époxy et carbone / époxy) en fonction de la température dans l'environnement extérieur du composite. Nous remarquons que le facteur d'intensité de contrainte est plus élevé lorsque la température augmente, cela signifie que l'augmentation de la température réduit la qualité de la réparation. Sur le graphique (Figure 4), on peut dire que parmi les trois composites, le bore / époxy est le plus résistant dans les zones où la température est élevée pour la réparation de pipelines de transport fissurés.

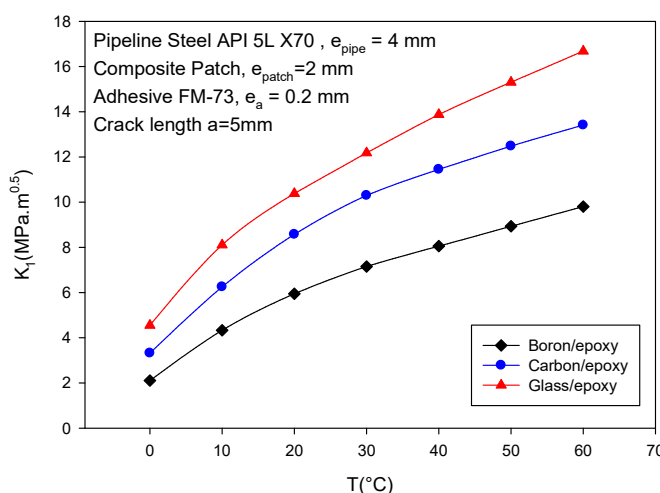


Fig.4. Variation de FIC en fonction de la température de milieu extérieur

3.3 Effet de la profondeur de la fissure

La figure 5 montre l'évolution du facteur d'intensité de contrainte au bas de la fissure du tuyau en acier API 5L X70 réparée du composite en fonction du changement de profondeur de la fissure par rapport à l'épaisseur de la conduite. Nous avons remarqué que le KI augmente avec la profondeur de la fissure

émérgée, de sorte que les contraintes sont très importantes à l'avant de la fissure. On en déduit que la qualité de la réparation diminue dans les cas où la fissure est très profonde.

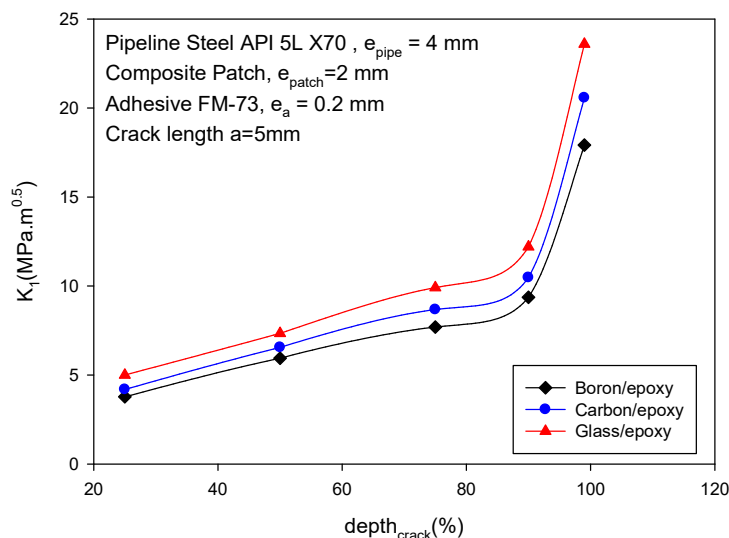


Fig.5. Variation de FIC en fonction de la profondeur de fissure du pipeline

3.4 Effet de l'épaisseur du patch

La figure 6 montre l'évolution du facteur d'intensité de contrainte au niveau du front de fissure de la canalisation en acier réparée API 5L X70 en fonction de la variation d'épaisseur de la pièce composite indépendamment du bore / époxy, du verre / époxy ou du carbone / époxy. On note que le KI diminue lorsque l'épaisseur du patch augmente, dans les trois cas de réparation différents, et atteint sa valeur la plus basse lorsque l'épaisseur du patch est égale à l'épaisseur du pipeline.

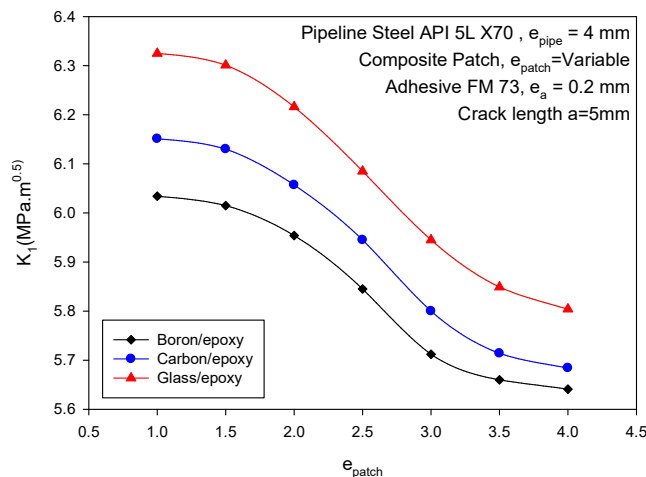


Fig.6. Variation de FIC en fonction de l'épaisseur du patch composite

3.5 Effet de la variation de la longueur de la fissure

La figure 5 montre la variation du facteur d'intensité de contrainte au niveau du front de fissure dans un pipeline réparé par trois types différents de patches composites (bore / époxy, verre / époxy et carbone / époxy) en fonction de la longueur de la fissure.

A partir de cette figure 5, nous remarquons que le développement de la fissure nous donne des valeurs de KI plus grandes, ce qui signifie que la qualité de la réparation par patches composites diminue. Nous notons également que le matériau le plus efficace pour la réparation en cas de fissures longues est le bore / époxy.

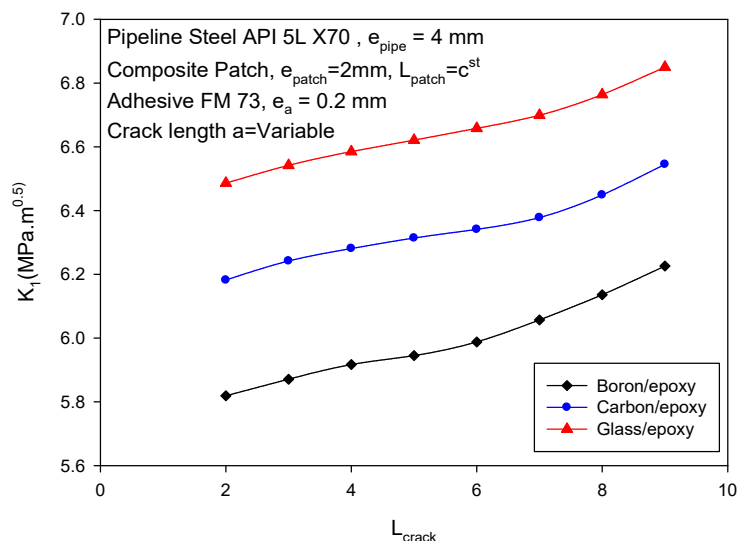


Fig.7. Variation de FIC en fonction de la longueur de la fissure du pipeline

4 Conclusion

Cette étude s'est focalisée par une simulation numérique sur l'évaluation du facteur d'intensité de contrainte sous différents effets : variation de la température, variation de la pression, variation du patch, variation de l'épaisseur du patch et variation de la taille de la fissure d'un tube en acier fissuré et réparé par un composite. Les conclusions suivantes peuvent être déduites des résultats obtenus :

- Les correctifs et les adhésifs jouent un rôle crucial dans la réparation. Toute efficacité de réduction est limitée par la résistance de l'adhésif.
- La réparation d'efficacité est directement liée à la rigidité du patch composite. Si le composite est plus rigide, l'efficacité de la réparation est élevée.
- Une augmentation de l'épaisseur du patch augmente la rigidité, ce qui entraîne une augmentation de l'efficacité.
- L'efficacité de la réparation diminue avec l'augmentation de la longueur et de la profondeur de la fissure. Ce qui par la suite mine le travail de l'adhésif.
- Les contraintes thermiques affaiblissent la capacité de l'adhésif en accumulant des charges, ce qui explique l'augmentation du facteur d'intensité de contrainte.

Références

- [1] Min Wu, Björn Johannesson, Mette Geiker, A review: Self-healing in cementitious materials and engineered cementitious composite as a self-healing material, *Construction and Building Materials* 28 (2012) 571–583.
- [2] D. Djokic, A. Rogers, P. Lee-Sullivan, N. Mrad, Residual stress development during the composite patch bonding process: measurement and modeling, *Composites: Part A* 33 (2002) 277-288.
- [3] Alan Baker, Bonded composite repair of fatigue-cracked primary aircraft structure, *Composite Structures* 47 (1999) 431-443.
- [4] Juha Komonen, Vesa Penttala, Effects of High Temperature on the Pore Structure and Strength of Plain and Polypropylene Fiber Reinforced Cement Pastes, *Fire Technology*, 39, 23–34, 2003.

-
- [5] Wai Tuck Chow, Satya N. Atlim, Composite Patch Repairs of Metal Structures: Adhesive Nonlinearity, Thermal Cycling, and Debonding, AIAA JOURNAL Vol.35, No.9, 1528-1535, September 1997.
- [6] D.D. Gu, W. Meiners, K. Wissenbach, R. Poprawe, Laser additive manufacturing of metallic components: materials, processes and mechanisms, International Materials Reviews (2012) VOL.57, No.3, 133-164.
- [7] M. Köpple, S. Lauterbach, W. Wagner, Composite repair of through-wall defects in pipework –Analytical and numerical models with respect to ISO/TS 24817, Compos. Struct.95 (2013) 173 –178.
- [8] H. Zarrinzadeh, M.Z. Kabir, A. Deylami, Crack growth and debonding analysis of an aluminum pipe repaired by composite patch under fatigue loading, Thin-Walled Structures 112 (2017) 140–148.
- [9] T. Nateche, M. HadjMeliani, Shafique M.A. Khan, Y.G. Matvienko, NesarMerah, G. Pluvinage, Residual harmfulness of a defect after repairing by a composite patch, Engineering Failure Analysis 48 (2015) 166–173.
- [10] R. Mhamdia, B. Bachir Bouadjra, B. Serier, et al. Contrainte intensity factor for repaired crack with bonded composite patch under thermo-mechanical loading. J Reinf Plastic Compos 2011; 30: 416–424.
- [11] A. Albedah, BachirBouiadjra B, Aminallah L, et al. Numerical analysis of the effect of thermal residual constraints on the performances of bonded composite repairs in aircraft structures. Compos: Part B 2011; 4: 511–516.
- [12] C. Lam, J. Cheng, C. Yam, Finite element study of cracked steel circular tube repaired by FRP patching, Procedia Eng. 14 (2011) 1106 –1113.