

Approche Globale à deux paramètres: Estimation de la Contrainte T dans un Tuyau de Transport de Gaz portant un Dé- faut Externe

M. Hadj Meliani

Département de Mécanique;
FSSI, B.P 151, Hay Salem, Université de Chlef 02000, Algérie. hadjmeliani@univ-metz.fr,

M. Benarous

Département de Mécanique;
FSSI, B.P 151, Hay Salem, Université de Chlef 02000, Algérie. Benaous@yahoo.fr

M. Aberkane

Laboratoire de Physique théorique et Physique des Matériaux,
FSSI Université de Chlef 02000. Algérie.

H. Moustabchir

Laboratoire de Fiabilité Mécanique,
LFM-ENIM, ile de saulcy 57045 , Université de Metz, France.

Z. Azari

Laboratoire de Fiabilité Mécanique,
LFM-ENIM, ile de saulcy 57045 , Université de Metz, France.

Résumé

Cette étude est une application de la mécanique de la rupture au domaine des structures sous pression, portant des défauts sous forme d'entaille semi elliptique de surface. Elle a pour objectif de proposer une étude numérique, définissant le Facteur d'Intensité de Contraintes K et la contrainte transversale T, par l'application de la méthode des éléments finis. Elle se base intégralement sur l'extension de l'approche globale et consiste en la détermination des deux paramètres de la rupture, en 2D, sur un tuyau de transport de gaz de l'acier API X52 soumis à une pression interne. L'effet de géométrie est intimement lié à celui du taux de triaxialité, paramètre représentant une éprouvette donnée et son confinement, et une distribution des contraintes. Le Model d'elements finis et les procédures d'analyses employés ont été vérifiés en utilisant les solutions existantes pour le Facteur d'Intensité de Contraintes et la contrainte élastique T en meme temps. Pour couvrir une gamme pratique, quatre valeurs différentes du rapport du rayon intérieur du cylindre à l'épaisseur, R_i/t , ont été choisies ; en outre, quatre valeurs différentes du rapport de la profondeur de l'entaille à l'épaisseur, a/t , s'étendant de 0.1 à 0.75 et quatre valeurs différentes de pression s'étendant de 20 à 50 bars, ont été choisies. Les solutions présentées sont de grandes précisions, et les informations fournies, ainsi, sont valable pour donner l'évaluation de l'intégrité des structures en prenant compte de la triaxialité à la pointe de l'entaille.

Abstract

In this study one applies the mechanics fracture for pipes under pressure with an external longitudinal defect. The objectives are to determinate the SIF and the T-stress by the finite element method. Internal pressure is considered. The FE model and the procedure employed in the analysis were verified using existing solutions for botch stress intensity factor and elastic T stress. To cover a practical range, four different values of the ratio of the inner radius of cylinder to the thickness, R_i/t , were selected; furthermore, four different values of the ratio of the crack depth to the thickness, a/t ranging from 0.1 to 0.75 and four different values of pressure ranging from 20 to 50 bars were selected. On the basis of FE analyses results, polynomial approximations were proposed at deepest point. On the basis of the detailed 2D elastic FE analysis results, solutions presented are believed to be the most accurate, and thus provide valuable information for structural integrity assessment considering a notch-tip constraint.

1. PROBLEMATIQUE

Pour "enrichir" le Facteur d'Intensité de Contraintes K , le paramètre T est introduit pour modéliser le champ des contraintes élastiques en pointe d'une entaille [1-3]. Cependant, plus de détails sur les caractérisations à deux paramètres, sont disponibles dans l'article de Parks [4]. Des exemples d'application sont trouvés pour trois types de géométrie, Wu et al.[5] et Martin et al.[6]. Mais en dehors des éprouvettes classiques de laboratoire telles les éprouvettes CT, SENB et SENT, nous avons relevé peu d'applications à des composants industriels de ces approches. D'ailleurs, Parks [4] insiste bien sur le fait que les différentes approches globales, à deux paramètres, ont chacune des avantages et des inconvénients, mais qu'aucune ne décrit complètement les champs de contraintes en pointe de fissure. Dans les multiples cas de triaxialité. Zerbst et al.[7] montrent que le comportement d'un défaut dans un piquage en T^* est similaire à celui d'une éprouvette de laboratoire, si les conditions locales de géométrie, contraintes et déformations sont comparables en pointe de fissure. Ils dénomment l'ensemble de ces conditions. Pineau [8] analyse les effets de la taille d'une structure sur la rupture ductile et la rupture fragile. La ténacité K_{IC} est une fonction décroissante de l'épaisseur de l'éprouvette, dans les cas de la plasticité confinée et en déformations planes.

Le but de ce travail est de diminuer les effets liés à la géométrie du chargement. Cependant, l'estimation de la ténacité d'un matériau, par une utilisation unique de critères locaux, reste aujourd'hui très délicate, si l'on considère que cette estimation fait encore appel à des modèles souvent trop simplistes des calculs longs et coûteux. La raison pour laquelle la ténacité d'un matériau se déduit souvent d'une approche globale. Ce choix étant renforcée par le fait qu'il est très rare qu'une approche locale puisse être menée à bien, de bout en bout, sans faire appel à certaines étapes de la démonstration, à des critères relevant d'une approche globale. Nous présentons la mécanique de la rupture appliquée au domaine des structures sous pression interne, portant des défauts sous forme d'entaille semi-elliptique de surface. L'objectif est de proposer une étude numérique, définissant le Facteur d'Intensité de Contraintes K et la contrainte transversale T , par l'application de méthode des éléments finis. Elle se base intégralement sur l'extension de l'approche globale et consiste en la détermination des deux paramètres de la rupture, en 2D, sur un tuyau de transport de gaz en acier API X52 soumis à une pression interne. L'effet des paramètres géométrique (a/t , R/t) et du pression interne P , sont intimement liés à celui du taux de triaxialité, paramètre représentant une éprouvette donnée et son confinement, et une distribution des contraintes. Pour couvrir une gamme pratique, quatre valeurs différentes du rapport du rayon intérieur du cylindre à l'épaisseur, R/t , ont été choisies ; en outre, quatre valeurs différentes du rapport de la profondeur de l'entaille à l'épaisseur, a/t s'étendant de 0.1 à 0.75 et quatre valeurs différentes de pression s'étendant de 20 à 50 bars ont été sélectionnées. Sur la base des résultats d'analyses par éléments finis, nous proposons des approximations polynomiales de la contrainte T et du Facteur d'Intensité de Contraintes au point le plus profond.

2. PRESENTATION DES RESULTATS ET INTERPRETATIONS

On considère un cylindre avec une entaille de surface longitudinale soumise à différentes pressions internes p , Figure 1. L'effet des trois paramètres : le rapport du rayon intérieur du cylindre à l'épaisseur, R/t et le rapport de la profondeur de l'entaille à l'épaisseur de cylindre a/t et à la pression P sur la contrainte T et le Facteur d'Intensité de Contraintes K , sont systématiquement considérés. Pour couvrir les gammes pratiques et intéressantes de ces trois variables, quatre valeurs différentes $R/t = 5, 10, 20$ et 40 ont été choisies. En termes de profondeur de défaut, quatre valeurs différentes de a/t ont été choisies, s'étendant de $a/t = 0.1$ à 0.75 . En termes de pression, quatre valeurs différentes de la pression sont choisies, $P = 20$ bars à 50 bars. Ainsi, un total de 84 différentes installations expérimentales sont considérés, tableau 1.

Dans un corps élastique linéaire isotopique contenant une entaille bidimensionnelle soumise à un chargement symétrique, la distribution du champ de contraintes peut être décrite comme une expansion de série de Williams [2]. Près du font d'entaille, où les termes d'ordre supérieures de l'expansion de série sont négligeables, les contraintes, en mode I, peuvent être écrites sous la forme :

$$\begin{aligned}
 \sigma_{xx} &= \frac{K_I}{\sqrt{\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left(1 - \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right) + T & \sigma_{yy} &= \frac{K_I}{\sqrt{\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left(1 + \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right) \\
 \sigma_{zz} &= \frac{K_I}{\sqrt{\pi r}} 2\nu \cos \frac{\theta}{2} + E\varepsilon_{zz} + \nu T, & \sigma_{xy} &= \frac{K_I}{\sqrt{\pi r}} \sin \frac{\theta}{2} \cos \frac{\theta}{2} \cos \frac{3\theta}{2}
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

P	R/t	a/t	P	R/t	a/t	P	R/t	a/t	P	R/t	a/t		
20	5	0.1	30	5	0.1	40	5	0.1	50	5	0.1		
		0.3			0.3			0.3			0.3		
		0.5			0.5			0.5			0.5		
		0.75			0.75			0.75			0.75		
	10	0.1		10	0.1		10	0.1		10	0.1	10	0.1
		0.3			0.3			0.3			0.3		
		0.5			0.5			0.5			0.5		
		0.75			0.75			0.75			0.75		
	20	0.1		20	0.1		20	0.1		20	0.1	20	0.1
		0.3			0.3			0.3			0.3		
		0.5			0.5			0.5			0.5		
		0.75			0.75			0.75			0.75		
	40	0.1		40	0.1		40	0.1		40	0.1	40	0.1
		0.3			0.3			0.3			0.3		
		0.5			0.5			0.5			0.5		
		0.75			0.75			0.75			0.75		

Tableau 1 : Liste des cas étudié par l'analyse des éléments finis

Les indices inférieurs x, y et z suggèrent qu'un cartésien local coordonne le système constitué par la contrainte normale à l'avant de l'entaille et au contrainte tangentielle à la pointe de l'entaille ; r et θ sont les coordonnées polaires locales, K_I est le Facteur d'Intensité de Contraintes en mode I, E le module de Young et ν le coefficient de Poisson. Dans l'équation (1), T est la contrainte, représentant la contrainte de traction/compression active parallèlement dans le sens principal de la propagation de la fissure.

Dans le mode I de chargement, l'équation (1) montre que la contrainte σ_{xx} comporte le terme singulier T. Ceci implique que T peut être déterminée le long de n'importe quelle direction où le terme singulier de la contrainte σ_{xx} tend vers zéro par superposition avec la contrainte σ_{yy} . Il correspond, en mode I, à la position autour de la pointe de l'entaille. La contrainte T change avec différentes géométries de l'entaille et du type de chargement. Elle joue un rôle dominant sur la forme et la taille de la zone plastique, le degré de la contrainte local au fond d'entaille, et également dans la ténacité de la rupture.

La méthode des éléments finis a été employée pour déterminer les paramètres T et le FIC au fond d'entaille, pour les tuyaux de transport de gaz API L5 X52. La structure a été modélisée par le code de calcul CASTEM 2000 en deux dimensions dans des conditions de contraintes planes en utilisant les éléments triangulaires isopérimètres. Seulement la moitié de la structure a été modélisée. L'essai des analyses élastiques comporte 31485 d'éléments et 63526 noeuds. Un maillage focalisé au bout de l'entaille apporte plus de précision. De plus, une étude détaillée de la sensibilité au maillage a été exploitée davantage pour l'amélioration des résultats. L'écart type donne des erreurs inférieures à 1%. La géométrie de tuyau de canalisation est illustrée dans la figure 1. L'épaisseur de la paroi est de 10 millimètres et la longueur de 40 millimètres, figure 1. Les conditions du chargement de l'état limite symétrique sont employées dans ce modèle.

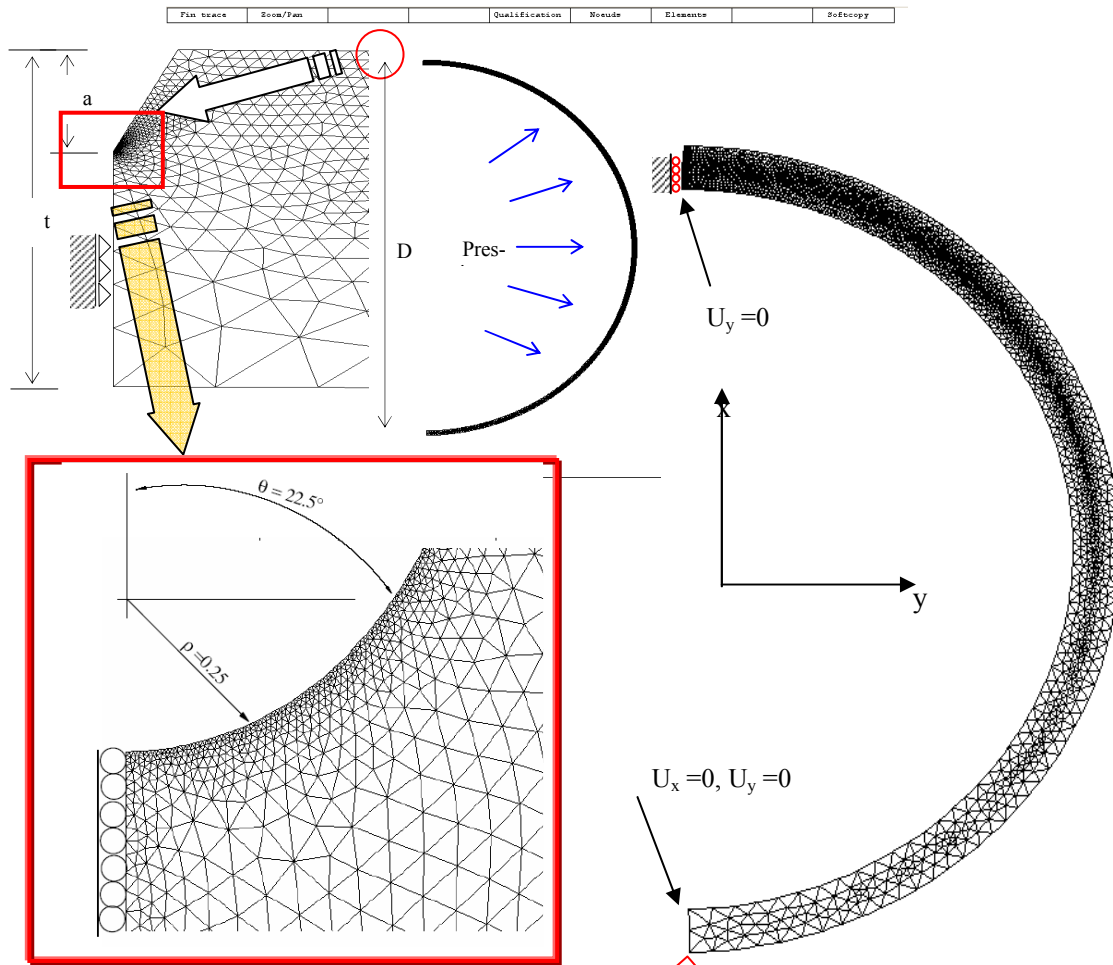


Figure 1 : Conditions limites de la géométrie et de configuration du chargement utilisant la moitié du maillage de la canalisation en 2D.

L'équation de la méthode de différence des contraintes, SDM, est donnée par :

$$T = \sigma_{xx} - \sigma_{yy} \Big|_{r=0, \theta=0} \quad (2)$$

Cette méthode détermine la contrainte T le long du ligament. La définition de la contrainte nominale, notée σ_{∞} , dans un cylindre soumis à une pression interne sans défaut, est donnée par :

$$\sigma_{\infty} = \frac{PR_i}{t} \quad (3)$$

P est la pression interne, R_i le rayon interne et t l'épaisseur de cylindre.

3. MESOFRACTURE VOLUMETRIQUE METHODE

Beaucoup de travaux donnent l'évaluation du Facteur d'Intensité de Contraintes en présence de la contrainte T , dans un tuyau de transport de gaz. Ils ont exclusivement employé la mécanique de la rup-

ture pour estimer la ténacité selon des investigations récentes en utilisant seul le paramètre K; d'autres méthodes sont appliquées pour prévoir la contrainte T et le Facteur d'Intensité de Contraintes en même temps. Une de ces méthodes, appelé approche volumétrique, est concernée par la modification de la distribution des contraintes à une certaine distance. L'approche est une méthode macro-mécanique. On suppose que le processus de rupture exige un volume physique. Cette idée est soutenue par le fait que la résistance de rupture est affectée par le mode de chargement, la géométrie structurale et l'effet d'échelle.

En employant la valeur "de la contrainte de point chaud" c.-à-d. la valeur maximale de la contrainte, il n'est pas possible d'expliquer l'influence des différentes paramètres sur la résistance à la rupture. Il est nécessaire de tenir compte de la valeur de la contrainte. Nous assumons que le volume, dans tous les points voisins du processus de rupture, est quasi-cylindrique près d'une entaille plastique. Le diamètre de ce cylindre s'appelle "distance effective". En calculant la valeur moyenne de la contrainte dans cette zone, la contrainte de rupture peut être estimée. Ceci mène à un critère local de la contrainte de rupture basé sur deux paramètres, X_{eff} , distance effective, et σ_{eff} la contrainte effective. Figure 2.

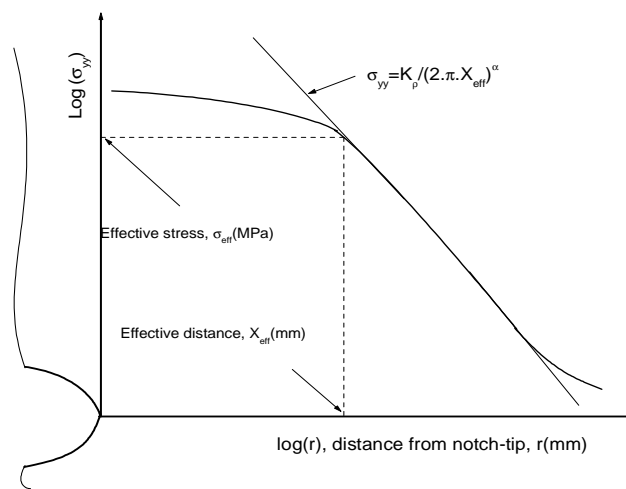


Figure 2 : Distribution de la contrainte d'ouverture dans une échelle bi logarithmique

P (bars)	R/t	a/t	K_p (MPa.m ^{0.5})	X_{eff} (mm)	$T_{eff} / \sigma_{\infty}$
20	5	0.1	0.0664	0.0377	- 0.3450
		0.3	0.1687	0.0281	- 0.8480
		0.5	0.3294	0.0233	- 1.7100
		0.75	0.7028	0.0224	- 3.6500
	10	0.1	0.1390	0.0377	- 0.3600
		0.3	0.3591	0.0238	- 1.0600
		0.5	0.7363	0.0233	- 1.9100
		0.75	1.8485	0.0302	- 3.3800
	20	0.1	0.2830	0.0377	- 0.3650
		0.3	0.7436	0.0238	- 1.0975
		0.5	1.5750	0.0233	- 2.0400
		0.75	4.6123	0.0302	- 4.3000
	40	0.1	0.5535	0.0313	- 0.4113
		0.3	1.5147	0.0238	- 1.1188
		0.5	3.2725	0.0233	- 2.1250
		0.75	10.4382	0.0302	- 4.7250

Tableau 1 : Valeurs du Facteur d'Intensité de Contraintes d'Entailles K_p et de la contrainte effective T_{eff} , relativement à une distance effective X_{eff} et P = 20 bars.

Dans un diagramme bi-logarithmique, la détermination de la distance effective et la contrainte effective est indiquée dans la zone de distribution des contraintes d'ouvertures linéaires, puis rejoint d'une façon asymptotique la contrainte globale appliquée. On note que, comme le Facteur d'Intensité de Contraintes K_I , la contrainte T est une contrainte en fonction de la géométrie et des conditions de chargement. Dans les tableaux 2-5, le K_{eff} et le T_{eff} , à une certaine distance effective près du fond d'entaille, sont illustrés en fonction de l'acuité d'entaille $\rho = 0.25$.

P (bars)	R/t	a/t	K_p (MPa.m ^{0.5})	X_{eff} (mm)	T_{eff}/σ_∞
30	5	0.1	0.0961	0.0313	- 0.3813
		0.3	0.2536	0.0238	- 1.0000
		0.5	0.4812	0.0156	- 1.8600
		0.75	1.0543	0.0224	- 3.6533
	10	0.1	0.2085	0.0377	- 0.3600
		0.3	0.5387	0.0238	- 1.0600
		0.5	1.1044	0.0233	- 1.9100
		0.75	2.7595	0.0224	- 4.7667
	20	0.1	0.4330	0.0442	- 0.3300
		0.3	1.1123	0.0281	- 0.9300
		0.5	2.3624	0.0233	- 2.0333
		0.75	6.7313	0.0224	- 5.8333
	40	0.1	0.8302	0.0313	- 0.4108
		0.3	2.2719	0.0238	- 1.1167
		0.5	4.9086	0.0233	- 2.1167
		0.75	15.6576	0.0302	- 4.7250

Tableau 2 : Valeurs du Facteur d'Intensité de Contraintes d'Entailles K_p et de la contrainte effective T_{eff} , relativement à une distance effective X_{eff} et $P = 30$ bars.

P (bars)	R/t	a/t	K_p (MPa.m ^{0.5})	X_{eff} (mm)	T_{eff}/σ_∞
40	5	0.1	0.1329	0.0377	-0.3445
		0.3	0.3374	0.0281	-0.8500
		0.5	0.6589	0.0233	-1.7150
		0.75	1.4056	0.0224	-3.6550
	10	0.1	0.2779	0.0377	-0.3600
		0.3	0.7168	0.0281	-0.9000
		0.5	1.4726	0.0233	-1.9100
		0.75	3.6793	0.0224	-4.7750
	20	0.1	0.5660	0.0377	-0.3663
		0.3	1.4873	0.0238	-1.0988
		0.5	3.1335	0.0194	-2.4875
		0.75	8.9751	0.0224	-5.8250
	40	0.1	1.0581	0.0255	-0.4525
		0.3	3.0168	0.0281	-0.9438
		0.5	6.5210	0.0194	-2.5875
		0.75	20.8065	0.0224	-6.6875

Tableau 3 : Valeurs du Facteur d'Intensité de Contraintes d'Entailles K_p et la contrainte effective T_{eff} , relativement à une distance effective X_{eff} et $P = 40$ bars.

4. APPROXIMATION POLYNOMIALE

La Figure 3 montre un exemple de variation des valeurs du Facteur d'Intensité de Contraintes d'Entaille FICE et de la contrainte effective T_{eff} aux points les plus profonds des entailles longitudinales de surfaces, dans les tuyaux, pour différentes profondeurs relatives a/t . D'après cette figure, nous remarquons que les valeurs du FICE et de la contrainte effective T augmentent avec la croissance de la taille relative de l'entaille a/t et du diamètre R/t , pour les mêmes profondeurs a/t , lorsque a/t tend vers 0.1, les valeurs du Facteur d'Intensité de Contraintes d'entaille et la contrainte effective T donnent des valeurs proches. Plus nous rapprochons des entailles très courtes, les deux paramètres de ruptures ne sont pas influencés par a/t et R/t et atteignent leurs valeurs maximales pour les rapports $a/t = 1$. Dans une telle classe de grandeur, plus l'entaille est profonde, plus son influence de surface est dangereuse dans le tuyau.

P (bars)	R/t	a/t	K_p (MPa.m ^{0.5})	X_{eff} (mm)	T_{eff}/σ_{∞}
50	5	0.1	0.1718	0.0514	- 0.2804
		0.3	0.4227	0.0238	- 1.0000
		0.5	0.8196	0.0194	- 2.0880
		0.75	1.7571	0.0224	- 3.6560
	10	0.1	0.3474	0.0377	- 0.3600
		0.3	0.8979	0.0238	- 1.0600
		0.5	1.8295	0.0194	- 2.3200
		0.75	4.5991	0.0224	- 4.7600
	20	0.1	0.7075	0.0377	- 0.3660
		0.3	1.8591	0.0238	- 1.1000
		0.5	3.9169	0.0194	- 2.4900
		0.75	11.5309	0.0302	- 4.3000
	40	0.1	1.4396	0.0377	- 0.3725
		0.3	3.7865	0.0238	- 1.1200
		0.5	8.1812	0.0233	- 2.1200
		0.75	26.0076	0.0224	- 6.7000

Tableau 4 : Valeurs du Facteur d'Intensité de Contraintes d'Entailles K_p et la contrainte effective T_{eff} , relativement à une distance effective X_{eff} et $P=50$ bars.

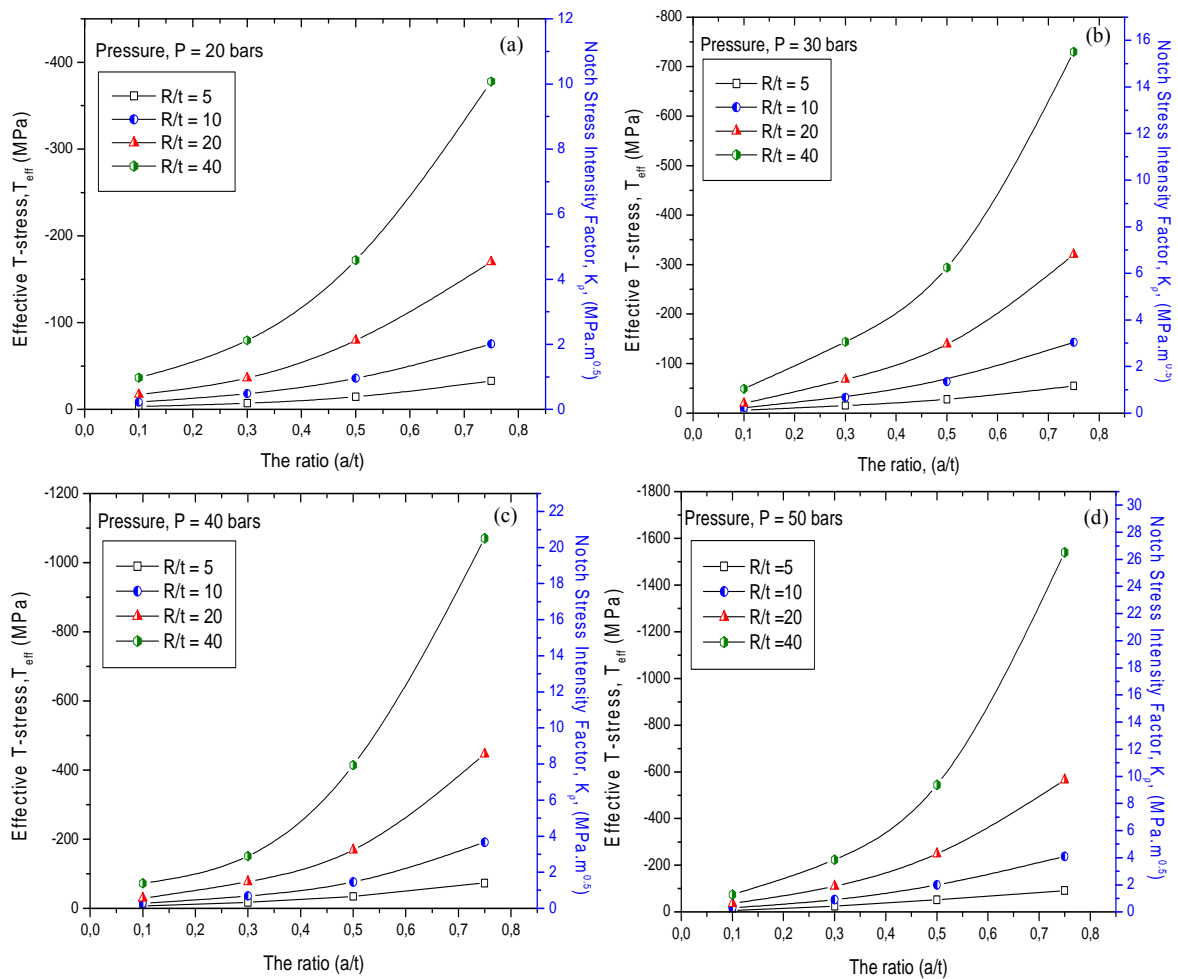


Figure 3 : Distribution du Facteur d'Intensité de Contrainte d'Entaille et de la contrainte effective T_{eff} en fonction de la profondeur dans le cas des différents diamètres et différentes pressions.

Dans la condition ci-dessus, la distribution du Facteur d'Intensité de Contraintes d'entaille $K_{I\rho}$, et la contrainte effective T , aux points les plus profonds de l'entaille dans un cylindre, peuvent être très bien exprimées par des approximations polynomiales en fonction des différents paramètres géométriques. Notons que les valeurs de T_{eff} et du K_p le long du ligament ont été calculées par, l'analyse élastique en 2D, analyses récapitulées dans les tableaux et les figures appropriées.

Cependant, les formes de solutions sont plus souhaitables pour des applications pratiques. Ainsi, dans cette section, nous proposons les approximations polynomiales suivantes, en utilisant la contrainte effective T_{eff} et le Facteur d'Intensité de Contraintes d'Entailles $K_{I\rho}$. Ils sont exprimés en fonction de a/t et de R/t , pour chaque pression $P = 20, 30, 40$ et 50 bars. Sur la base des résultats d'analyses les équations sont exprimées par :

$$T_{eff}\left(\frac{a}{t}, \frac{R}{t}\right) = \bar{T}_{eff} \quad \text{et} \quad K_{I\rho}\left(\frac{a}{t}, \frac{R}{t}\right) = \bar{K}_{I\rho} \quad (4)$$

Les approximations polynomiales sont fournies au point le plus profonds. Les gammes de validité des approximations proposées sont $5 \leq R/t \leq 40$ et $0.1 \leq a/t \leq 0.75$. Dans le cas de pression interne, les approximations polynomiales de la contrainte effective T sont exprimées comme suit :

$$T_{eff}\left(\frac{a}{t}, \frac{R}{t}\right) = A_0 + A_1\left(\frac{a}{t}\right) + A_2\left(\frac{a}{t}\right)^2 + A_3\left(\frac{a}{t}\right)^3 + A_4\left(\frac{a}{t}\right)^4 \quad \text{pour } R/t = 5 \quad (5.a)$$

$$T_{eff}\left(\frac{a}{t}, \frac{R}{t}\right) = B_0 + B_1\left(\frac{a}{t}\right) + B_2\left(\frac{a}{t}\right)^2 + B_3\left(\frac{a}{t}\right)^3 + B_4\left(\frac{a}{t}\right)^4 \quad \text{pour } R/t = 10 \quad (5.b)$$

$$T_{eff}\left(\frac{a}{t}, \frac{R}{t}\right) = C_0 + C_1\left(\frac{a}{t}\right) + C_2\left(\frac{a}{t}\right)^2 + C_3\left(\frac{a}{t}\right)^3 + C_4\left(\frac{a}{t}\right)^4 \quad \text{pour } R/t = 20 \quad (5.c)$$

$$T_{eff}\left(\frac{a}{t}, \frac{R}{t}\right) = D_0 + D_1\left(\frac{a}{t}\right) + D_2\left(\frac{a}{t}\right)^2 + D_3\left(\frac{a}{t}\right)^3 + D_4\left(\frac{a}{t}\right)^4 \quad \text{pour } R/t = 40 \quad (5.d)$$

Les coefficients A_i , B_i , C_i et D_i sont à extraire à partir des courbes de tendances. Pour le Facteur d'Intensité de Contraintes, équations (6.1-d), nous pouvons écrire :

$$K_{I\rho}\left(\frac{a}{t}, \frac{R}{t}\right) = E_0 + E_1\left(\frac{a}{t}\right) + E_2\left(\frac{a}{t}\right)^2 + E_3\left(\frac{a}{t}\right)^3 + E_4\left(\frac{a}{t}\right)^4 \quad \text{pour } R/t = 5 \quad (6.a)$$

$$K_{I\rho}\left(\frac{a}{t}, \frac{R}{t}\right) = F_0 + B_1\left(\frac{a}{t}\right) + F_2\left(\frac{a}{t}\right)^2 + F_3\left(\frac{a}{t}\right)^3 + F_4\left(\frac{a}{t}\right)^4 \quad \text{pour } R/t = 10 \quad (6.b)$$

$$K_{I\rho}\left(\frac{a}{t}, \frac{R}{t}\right) = G_0 + C_1\left(\frac{a}{t}\right) + G_2\left(\frac{a}{t}\right)^2 + G_3\left(\frac{a}{t}\right)^3 + G_4\left(\frac{a}{t}\right)^4 \quad \text{pour } R/t = 20 \quad (6.c)$$

$$K_{I\rho}\left(\frac{a}{t}, \frac{R}{t}\right) = H_0 + H_1\left(\frac{a}{t}\right) + H_2\left(\frac{a}{t}\right)^2 + H_3\left(\frac{a}{t}\right)^3 + H_4\left(\frac{a}{t}\right)^4 \quad \text{pour } R/t = 40 \quad (6.d)$$

Selon l'analyse de la contrainte T , le confinement croit avec l'augmentation de la profondeur d'entaille. C'est une conséquence des résidus, des termes supérieurs et de l'application de la contrainte de référence constante, tandis que T_{eff} dans l'équation (5.a-d) devient moins négative avec l'augmentation de a/t et R/t . Ces observations sont compatibles avec les résultats publiés par Su et al. [9] et Qu et al. [10]. Ceci ne semble pas conforme au fait que le ligament devient plus plastifié. L'augmentation de la section nette des pipelines, sous pression par l'effet de flexion, réduit visiblement la triaxialité à la pointe de l'entaille. Ces remarques conviennent avec les observations expérimentales de Sumpter et al. [11], pour des éprouvettes de traction comportant une fissure latérale.

Les solutions proposées de la contrainte effective T_{eff} ainsi que des valeurs de Facteurs d'Intensités de Contraintes d'Entaille K_p peuvent être appliquées pour évaluer l'intégrité structurale des pipelines

émanant d'entailles longitudinales de surface considérant l'effet de confinement à la pointe de la pointe.

Basant sur notre analyse élastique détaillée en 2 dimensions, nous pensons que les solutions fournissent des informations valables et fortement précises lorsqu'on combine le Facteur d'Intensité de Contraintes K et le paramètre de confinement T.

5. CONCLUSIONS

Ce travail traite des solutions approximatives de l'évolution de la contrainte élastique T_{eff} et du Facteur d'Intensité de Contraintes d'Entaille K_p pour un défaut de surface longitudinal dans un cylindre soumis à une pression interne. Pour couvrir une gamme pratiques de variables, on a choisi différents rapports R/t , a/t et P . A partir d'analyse par éléments finis (FEM), des tableaux et des approximations polynomiales des valeurs de la contrainte effective T_{eff} normalisée et du Facteur d'Intensité de Contrainte d'Entaille sont fournies au point profond de l'entaille. Bien que la contrainte T soit en général faible devant σ_{xx} en pointe de l'entaille, nous montrons qu'elle joue un rôle non négligeable sur le comportement de l'entaille, en particulier sur le développement de la zone plastique. Cette dernière est en compression dans les différents cas étudiés.

En se basant sur le détail de l'analyse par éléments finis en deux dimensions, on pense que les solutions données sont relativement précises. L'analyse fournit plus d'informations une fois combinées la contrainte effective T_{eff} avec le Facteur d'Intensité de Contraintes d'Entaille K_p , lorsqu'on prend en considération l'intégrité des structures comportant des triaxialités à la pointe de l'entaille.

Remerciements : Ce rapport est supporté par une Coopération, projet Tassili, entre l'Université Mouloud Maameri de Tizi-Ouzou, Algérie, et l'Université Paul Verlaine de Metz, France.

6. REFERENCES

1. M. Andrews An analysis of fracture under biaxial loading using the non-singular T-stress," *Fatigue Fract. Eng. Mater. Struct.*, 23, 53–62, (2001)
2. Williams, PD. Ewing. Fracture under complex stress—the angled crack problem. *Int J Fract*; 8(4): 416–41, (1972)
3. N.P. O'Dowd, C.F. Shih. Family of crack tip fields characterized by a triaxiality parameter-I. Structure of fields. *Journal of Mechanics and Physics of Solids* 39, 989–1015, (1991)
4. D.M. Parks. Small-scale yielding analysis of mixed plane strain crack problem," in: *Fracture Analysis (ASTM STP 560)*, Philadelphia, pp. 187–210, (1974)
5. X.Wu. Elastic T-stress for cracks in test specimens subjected to non-uniform stress distributions. *Engng Fract Mech* 69:1339–52, (2002)
6. S. Martin .The influence of the T -stress on the directional stability of cracks. *Int J Fract*; 114 (3): 259 .65, (2002)
7. K. Zerbst.. *Elastic-Plastic Mixed Mode Fracture Criteria and Parameters*, Springer, Berlin (2003). ANSYS V5.4. User's Manual, Swanson Analysis Systems Inc., USA, (1994).
8. Pineau. A finite element investigation of the effect of crack tip constraint on hole growth under mode I and mixed mode loading," *Int. J. Solid Struct.*, 36, 1427–1447,(1999)
9. Su B., Bhuyan Gouri S. Elastic fracture properties of all-steel gas cylinders with different axial crack types. *International Journal of Pressure Vessels and Piping* 76 23-33,(1999)
10. Qu et al. *he Behaviour of Short Fatigue Cracks*, EGF, Mech. Eng. Pub. London, p. 203, (2006).
11. Sumpter JGD, Hancock JW. Status of the J plus T stress. In: Schwalbe K-H, Bergers C, editors. *Proceedings of the Ninth European Conference on Fracture*. Proceedings of the Ninth European Conference on Fracture, vol. 1. Warley, UK: EMAS; p.617–26, (1994).