

# ÉVALUATION DE L'ENDOMMAGEMENT DES TUBES CORRODÉS

Zohra LABED<sup>1</sup>, Fateh AGGOUNE<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup>Laboratoire de Mécanique, Département Génie Mécanique, Faculté Des Sciences De La Technologie,  
Université Des Frères Mentouri, Constantine, Campus Chaab Erssas, 25000 Constantine, Algérie,

<sup>1</sup>zohra\_labed @yahoo.fr, <sup>2</sup>fatehagg@gmail.com

## RÉSUMÉ

La demande internationale de gaz augmente jour après jour. Alors, il est nécessaire d'augmenter le débit de ses approvisionnements tout en augmentant la pression de fonctionnement ou l'augmentation du réseau de pipelines. Ainsi, l'augmentation de la résistance de la conduite devient une nécessité. Par conséquent, l'épaisseur du tube doit être augmentée et ses caractéristiques mécaniques et chimiques doivent être améliorées, en prenant en considération les différents problèmes auxquels font face ces tubes tels que la corrosion qui participe en grande partie à la diminution de la pression maximale, à laquelle peut résister le tuyau. L'évaluation du tube corrodé a été réalisée en utilisant les méthodes semi empirique et qui a été validé par le code de calcul ANSYS.

**Mots Clés:** Acier, Tube Corrodé, Corrosion, Pression Interne, Eléments Finis, Simulation Numérique.

---

## NOMENCLATURE

### Symboles :

$R_{int}$ rayon interne de cylindre, mm	$\sigma_e$ contrainte équivalente Von Mises
$R_{ext}$ rayon externe de cylindre, mm	$\sigma_{\theta\theta}$ la contrainte circonférentielle, MPa
$D_{ext}$ Diamètre extérieur du tuyau, mm	$\sigma_{zz}$ la contrainte de traction, MPa
$D_i$ Diamètre interne du tuyau, mm	$L$ la longueur de défaut
$D_{moy}$ Diamètre moyenne, mm	$T$ L'épaisseur de tube, mm
$R_m$ Limite d'élasticité, MPa	$2C$ L'extension longitudinale de la la corrosion, mm
$P_i$ Pression interne du tuyau, MPa	$a$ Profondeur du défaut, mm
$\sigma_{rr}$ la contrainte radiale, MPa	$P_{ult}$ Pression ultime du tuyau, MPa

---

## 1. INTRODUCTION

Les canalisations sont des éléments de structures dont les avaries entraînent des risques pour les vies humaines et l'environnement écologiques, associés à des pertes d'exploitations avec souvent un préjudice qui peut être considérables.

Les causes des défaillances des gazoducs sont de diverses natures. Elles peuvent se manifester soit par une rupture, soit par une fuite. La plupart de ces défaillances sont causées par des piqures de corrosion ou par des fissurations de corrosion sous contrainte, mais il existe également des problèmes liés aux défauts de soudage. L'objectif de ce travail est d'évaluer l'endommagement de tube corrodé en utilisant les méthodes semi empiriques. Nous avons considéré le cas d'un tube idéal et d'un tube corrodé. Une comparaison des résultats a été réalisée par le code de calcul ANSYS.

## 2. MODELE MATHEMATIQUE

Etude analytique de la variation des rapports contrainte, pression interne et celle des diamètres moyens et épaisseur pour les tubes spéciaux mince à l'état idéal et à l'état corrodé.

a) Etat idéal

Les tubes de Pipeline sont des tubes minces, cela est dû au fait que l'épaisseur de la conduite est inférieure au diamètre extérieur  $\frac{t}{D_{ext}} < 10\%$ . Les données géométriques du tubes sont le diamètre extérieur et son épaisseur.

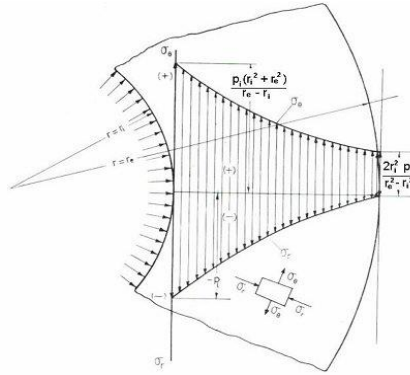


Figure 1. Variation des contraintes circonférentielle et axiales en fonction de l'épaisseur

Exemples; ( $D_{ext} = 219mm, t = 6mm$ ), ( $D_{ext} = 762mm, t = 17.5mm$ ), ( $D_{ext} = 459.4mm, t = 8mm$ ). Les contraintes dans le tube sont : La contrainte radiale  $\sigma_{rr}$ , la contrainte circonférentielle  $\sigma_{\theta\theta}$  et la contrainte de traction  $\sigma_{zz}$ . Celles-ci s'expriment par les relations suivantes en fonction de la variable r voir la figure suivante.

$$(\sigma_{rr}) = \frac{P_i \times (R_{int}^2)}{(R_{ext}^2 - R_{int}^2)} \times \left(1 - \frac{R_{ext}^2}{R}\right), (\sigma_{\theta\theta}) = \frac{P_i \times (R_{int}^2)}{(R_{ext}^2 - R_{int}^2)} \times \left(1 + \frac{R_{ext}^2}{R}\right), (\sigma_{zz}) = \frac{2 \times P_i \times (R_{int}^2)}{(R_{ext}^2 - R_{int}^2)}$$

Le critère de Von-mises en coordonnées cylindriques peut être exprimé de la manière suivante :

$$\sigma_e = \frac{1}{\sqrt{2}} \times \sqrt{(\sigma_{\theta\theta} - \sigma_{zz})^2 + (\sigma_{zz} - \sigma_{rr})^2 + (\sigma_{rr} - \sigma_{\theta\theta})^2}$$

Nous avons pris, pour compenser les équations précédentes l'équation de Von Mises, on peut trouver analytiquement:

$$\sigma_e = \frac{1}{\sqrt{2}} \times \sqrt{\left(\frac{P_i \times (R_{ext}^2 + R_{int}^2)}{(R_{ext}^2 - R_{int}^2)} - \frac{P_i}{\left(\frac{R_{ext}}{R_{int}}\right)^2 - 1}\right)^2 + \left(\frac{P_i}{\left(\frac{R_{ext}}{R_{int}}\right)^2 - 1} - P_i\right)^2 + \left(-P_i - \frac{P_i \times (R_{ext}^2 + R_{int}^2)}{(R_{ext}^2 - R_{int}^2)}\right)^2}$$

$$\sigma_e = \frac{P_i}{\sqrt{2}} \times \sqrt{\left(\frac{(R_{ext}^2 + R_{int}^2)}{(R_{ext}^2 - R_{int}^2)} - \frac{R_{int}^2}{(R_{ext}^2 - R_{int}^2)}\right)^2 + \left(\frac{R_{int}^2}{(R_{ext}^2 - R_{int}^2)} + \frac{(R_{int}^2 - R_{ext}^2)}{(R_{ext}^2 - R_{int}^2)}\right)^2 + \left(\frac{(R_{int}^2 - R_{ext}^2)}{(R_{ext}^2 - R_{int}^2)} - \frac{(R_{ext}^2 + R_{int}^2)}{(R_{ext}^2 - R_{int}^2)}\right)^2}$$

Pour les tubes à faible épaisseur on a:

$$R \approx R_{ext} \approx R_{int} \approx \frac{D_{Moyen}}{2}$$

$$\sigma_e = \frac{\sqrt{6}P_i}{\sqrt{2} (R_e^2 + R_i^2)} \sqrt{(R_e^2)^2}$$

Le critère de Von Mises en cordonnée cylindrique peut être exprimé de la manière Suivante :

$$\frac{(\sigma_e)_{max}}{P_i} = \frac{\sqrt{3}}{4} \left( \frac{t}{D_{Moyen}} \right) \quad \frac{(\sigma_{\theta\theta})_{max}}{P_i} = \frac{1}{2} \left( \frac{t}{D_{Moyen}} \right) \quad \frac{(\sigma_{zz})_{max}}{P_i} = \frac{1}{4} \left( \frac{t}{D_{Moyen}} \right) \quad \frac{(\sigma_{rr})_{max}}{P_i} = -1$$

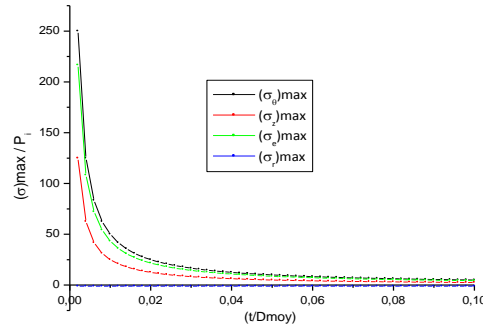


Figure 2. Distribution des contraintes radiale, circonférentielle et axiale en fonction de l'épaisseur

b) Etat corrodé

Selon les codes d'évaluation, l'équation de la rupture de tubes corrodés est établie à partir des données expérimentales et exprimée à partir des deux conditions suivantes :

- Premièrement, la contrainte circonférentielle globale maximale ne peut pas excéder la limite d'élasticité du matériau.
- Deuxièmement, un défaut de corrosion court est assimilé à sa projection selon une forme parabolique et un défaut de corrosion long est projeté selon une forme rectangulaire

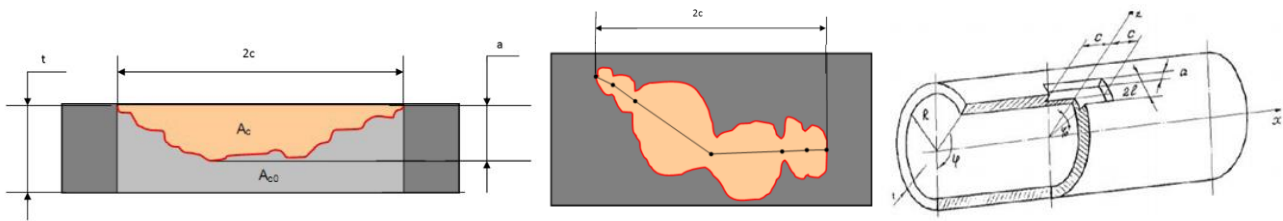


Figure 3. Face imaginaire d'un défaut de corrosion

On va évaluer le défaut extérieur de corrosion par plusieurs codes. ASME B31G, ASME B31G modifié ou 085DL, DNV RP-F101, Méthode RPA au 085dl modifié, Méthode PCORRC, Choi, Cas du code Choi :

En se basant sur l'hypothèse d'analyse limite, les essais d'éclatement et l'analyse par élément finis Choi et al ont proposé des solutions pour obtenir la pression ultime dans les tuyaux corrodés en fonction de ses facteurs  $\{D_{ext}, t, a, 2C, R_{int}\}$  :

- Cas1

$$\left(\frac{2C}{\sqrt{R_{int} \times t}}\right) < 6$$

$$P_{ult} = 0.9 \frac{2 \times t \times R_m}{D_{int}} \left[ C_0 + C_1 \left(\frac{2C}{\sqrt{R_{int} \times t}}\right) + C_2 \left(\frac{2C}{\sqrt{R_{int} \times t}}\right)^2 \right]$$

- Cas2

$$\left(\frac{2C}{\sqrt{R_{int} \times t}}\right) \geq 6$$

$$P_{ult} = 0.9 \frac{2 \times t \times R_m}{D_{int}} \left[ C_3 + C_4 \left(\frac{2C}{\sqrt{R_{int} \times t}}\right) \right]$$

$$C_0 = 0.06 \left(\frac{a}{t}\right)^2 - 0.1035 \left(\frac{a}{t}\right) + 1 \quad C_1 = -0. -0.69136 \left(\frac{a}{t}\right)^2 + 0.14548 \left(\frac{a}{t}\right) - 1.1447$$

$$C_2 = 0.1163 \left(\frac{a}{t}\right)^2 - 0.1035 \left(\frac{a}{t}\right) + 0.0292 \quad C_3 = -0.0071 \left(\frac{a}{t}\right) + 0.0126$$

$$C_4 = -0.9847 \left(\frac{a}{t}\right) + 1.1101$$

### 3. SIMULATION NUMERIQUE

Nous avons considérés trois types de matériaux de types API XL X52, X65 et X80 en utilisant quatre codes d'évaluation Tableau 2.

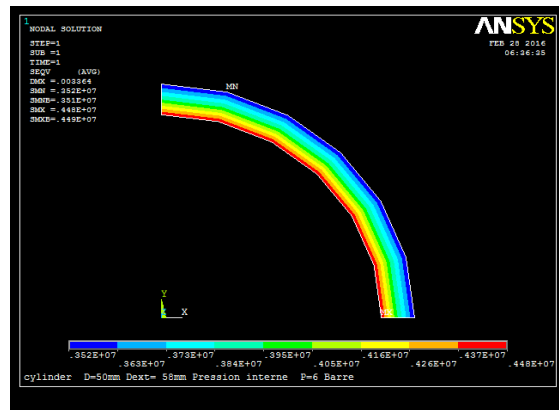


Figure 4.. Distribution des contraintes dans le tube sous pression interne

### 4. RESULTATS

Validation de l'analyse mathématique par la méthode d'éléments finis. Nous comparons ensuite les résultats numériques basés sur le logiciel ANSYS et les résultats d'analyses pour la contrainte équivalente de Von Mises.

t [mm]	D <sub>ext</sub> [mm]	D <sub>int</sub> [mm]	D <sub>moy</sub> [mm]	$\frac{t}{D_{moy}}$	P <sub>i</sub> [MPa]	$\sigma_{\theta}$ [MPa]	$\sigma_r$ [MPa]	$\sigma_z$ [MPa]	$\sigma_{\theta}$ [MPa]	$\sigma_{\theta}$ [MPa]	$\sigma_{\theta}$ [MPa]	erreur %
17.5	762	727	744.5	0.0235	1	21.27	-1	10.63	18.42	19.758	19.758	+6.77
17.5	762	727	744.5	0.0235	5	106.63	-5	53.18	92.11	98.59	98.59	+6.60
17.5	762	727	744.5	0.0235	10	212.71	-10	106.36	184.22	197.583	197.583	+6.77
8	459.4	443.4	451.4	0.0177	1	28.21	-1	14.11	24.43	25.936	25.936	+5.8
8	459.4	443.4	451.4	0.0177	5	141.10	-5	70.53	122.16	130.115	130.115	+6.1
8	459.4	443.4	451.4	0.0177	10	282.12	-10	141.10	244.33	260.231	260.231	+6.1
6	219	207	213	0.0282	1	17.75	-1	8.875	15.372	16.625	16.625	+7.5
6	219	207	213	0.0282	5	88.75	-5	44.375	76.86	83.125	83.125	+7.5
6	219	207	213	0.0282	10	177.5	-10	88.75	153.72	166.25	166.25	+7.5

Tableau 1. Variation des dimensions et de la pression

Les applications des codes d'évaluation nous permettent de calculer les pressions ultimes.

Dimension de tube D <sub>ext</sub> =762mm t=17.5 mm L=2.3m					Pression ultime				
Éprouvette	a [mm]	2c [mm]	2l [mm]	Taux d'endommagement [%]	Codes D'évaluation	API X52	5L X65	API X80	5L X80
	4.375	200	50	25%	ASME B31G	18.977	21.662	27.540	
					RSTRENG	19.820	22.220	27.475	
					0.85dl				
					DNV RP-F01	22.702	28.936	31.731	
					Choi(2003)	19.573	24.490	27.358	

Tableau 2. Pression ultime pour différents codes d'évaluation

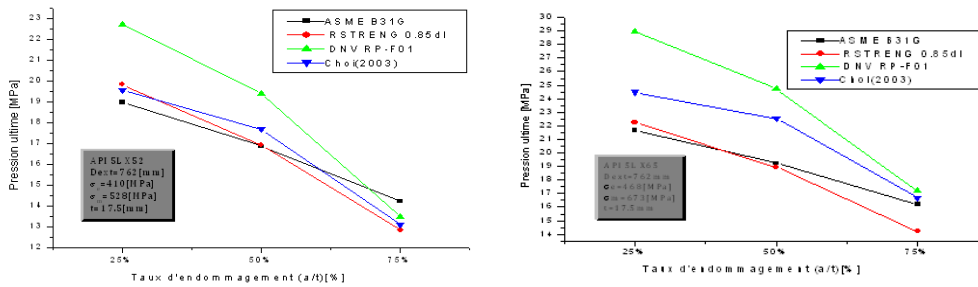


Figure 5. Influence de la profondeur du défaut sur la pression ultime d'un tuyau en acier grade X

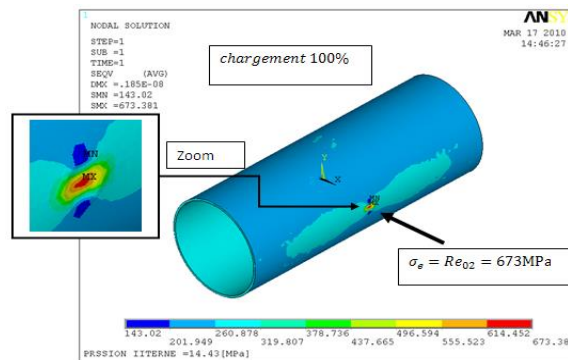


Figure 6. Tube sous pression interne défaut parabolique Pi= 14.43MPa

#### 4. CONCLUSIONS

La multiplication des accidents plus ou moins graves, notamment dus à la corrosion, ainsi que leur incidence sur l'économie mondiale et leur impact sur l'environnement rendent le transport des hydrocarbures de plus en plus préoccupant.

Dans le premier volet, nous avons étudié le comportement du tube sous l'effet de la pression interne, et qui nous a permis de constater que le tube fonctionne dans le domaine élastique. On a même considéré l'effet des conditions aux limites, et qui est négligeable.

Dans le deuxième volet, on a considéré le tube corrodé sous l'effet de deux paramètres différents, le dimensionnement et la pression interne comparée à la contrainte de Von Mises.

Se basant pour le calcul, sur la contrainte ultime, utilisant quatre codes différents, pour chaque défaut séparément. On a pu constater que les résultats obtenus utilisant le code Choi étaient non constructif. La répartition des contraintes est uniforme.

En premier, on a examiné alors, dans le contexte de l'analyse générale quelques aspects du comportement d'un tube sous chargement de pression intérieure. Les résultats obtenus montrent une bonne concordance entre les résultats des analyses mathématiques et ceux obtenus par simulation numérique en ce qui concerne les contraintes dans le domaine élastique.

D'autre part, le modèle de matériau de type bilinéaire à écrouissage cinématique utilisé avec des éléments coque volumique à quatre nœuds permet de suivre l'évolution des contraintes dans la mi- épaisseur où le défaut de corrosion jusqu'à l'apparition de la zone plastifiée.

Ces résultats promettent des perspectives d'exploitation des possibilités de la simulation numérique dans l'évaluation des charges ultimes sous des chargements combinés d'effort axial et de pression intérieure dans les pipelines. Donc les aciers pour tuyaux présentant une grande ductilité d'où l'effet de confinement de la plasticité comme celui de l'écrouissage sont plus au moins pris en compte et contribue a une grande divergence des résultats obtenus entre eux et ceux considérés par rapport à la pression ultime réelle. Cette analyse est acceptable jusqu'à un maximum autorisé.

#### REFERENCES

- [1] C. C. Rita. Silva, João N. C. Guerreiro and R. Patricia C. Drach Automatic finite element solid modeling, burst and error analyses of corroded pipelines, International of mechanics, Volume 2, P82, 2008.
- [2] A.JENKINS. "Introduction to corrosion in oil and gas production », MI production Chemicals, Algiers, 2006.
- [3] FEDERAL DO PARANA, thèse de magistère. AVALIAÇÃO SIMPLIFICADA DA CAPACIDADE DE CARGA DE DUTOS CORROÍDOS.CURITIBA, 2005.
- [4] G.PLUVINAGE et J.CAPELLE. 'Etude d'un dimensionnement de conduite de gaz basée sur la mécanique de la rupture' se l'analyse limite.5èmesjournées de mécanique de l'EMP Bordj El BAHRI, 28-29 MARS 2006.
- [5] TOMASZ.SZARY, thèse de doctorat, the Finite Element Method Analysis for Assessing the Remaining Strength of Corroded Oil Field Casing and Tubing, University Freiberg, 2006.
- [6] RECOMMENDED PRACTICE DNV-RP-F101 CORRODED PIPELINES, OCTOBER 2004.
- [7] T.A.BUBENIC, B.N. LEIS, Primer on design to avoid failure in steel transmission pipelines, Gas Research Institute, GRI-00/0229, January, 2001.