

DETERMINATION DE LA NOUVELLE PRESSION MAXIMALE DE SERVICE D'UN PIPE CORRODE

D. BENZERGA

Département de Mines et Métallurgie, Faculté de Génie Mécanique, USTO, B.P 1505 Oran 31000, Algérie.

E-mail: djeb_benz@yahoo.fr

Résumé :

L'Algérie se trouve actuellement confrontée à une problématique de taille qui concerne la dégradation les moyens de transport du gaz et du pétrole brut depuis les zones de pompage jusqu'à celle de traitement et celles des pays clients alimentés par ces moyens. Cette problématique se trouve encore plus accentuée si l'on considère les populations vivant à proximité et mises en danger par la rupture ou encore l'éclatement des pipelines qui constituent, à ne point en douter, une menace réelle et imminente pour elles ainsi que pour l'environnement. Dans ce contexte et pour répondre à cette préoccupation, nous nous sommes intéressés à l'une des causes susceptibles de conduire à la rupture d'un gazoduc. Les crevasses de corrosion dues à l'agressivité du sol affaiblissent la structure et engendrent une diminution de la pression maximale de service du gazoduc. L'objectif de ce travail est d'étudier l'endommagement au voisinage d'un défaut de corrosion d'un pipe en acier X65, afin de construire un outil de simulation numérique de la rupture permettant de déterminer la nouvelle pression maximale de service que pourrait supporter un pipe en présence d'un défaut de corrosion. La modélisation du phénomène d'endommagement s'appuie sur le concept de la Mécanique de l'Endommagement Continu (CDM) qui a atteint actuellement un stade de maturité lui permettant de modéliser tout type de dégradation. La méthode développée dans le cadre de ce travail a été implantée dans le code commercial de calcul ANSYS ver. 11.0. Les résultats obtenus ont été comparés à ceux de la norme ASME/ B31G.

Abstract :

Algeria is currently confronted to important problems which relates to degradation of gas and oil pipelines from the zones of pumping until that of treatment and those of countries customers supplied with these pipelines. These problems are more accentuated even if one considers the populations living in the vicinity and settings in danger by the rupture or the bursting of the pipelines which constitute, not to doubt it, a real threat and imminent for them like for the environment. In this context and to meet this need, we were interested in the one of the causes likely to lead to the rupture of a gas pipeline. The cracks of corrosion due to the aggressiveness of the ground weaken the structure and generate a maximum allowable operating pressure decrease of the gas pipeline. The objective of this work is to simulate a local failure criterion for corroded pipe in API X65 steel to construct a numerical simulation tool to determine the maximum allowable internal pressure. The modeling of damage leans on the concept of Continuum Damage Mechanics (CDM). Based on detailed finite element (FE) code analyses with the proposed local failure criterion, burst pressures of corroded pipe are estimated and compared with experimental and ASME/B31G data.

Mots clés : pression maximale, pipe, corrosion, endommagement

1. Introduction

Notre motivation principale dans ce travail a été de montrer que cette méthode est une contribution à la réhabilitation des pipes corrodés. L'étude et l'analyse de l'endommagement au voisinage d'un défaut de corrosion d'un pipe en acier X65, ont été abordées afin de construire un outil de simulation numérique de la rupture permettant de déterminer la nouvelle pression maximale de service que pourrait supporter un pipe en présence de crevasses de corrosion. La modélisation du phénomène d'endommagement s'appuie sur le concept de la Mécanique de l'Endommagement Continu (CDM) qui a atteint actuellement un stade de maturité lui permettant de modéliser tout type de dégradation. En utilisant le langage programmable du code ANSYS ver. 11.0, un sous programme a été développé et implanté dans le code principal pour la détermination de la zone la plus sollicitée (M^*) au niveau de la crevasse de la corrosion où de potentielles fissures peuvent s'y développer. Dans une deuxième étape, un post-processeur basé sur la méthode itérative de Newton, a été appliqué à cette zone critique pour la détermination de la pression maximale que pourrait supporter un pipe en présence d'un défaut de corrosion longitudinal. La pression maximale est la valeur de la pression qui correspond à la valeur critique de l'endommagement D_C (amorçage d'une fissure). Les résultats obtenus ont été comparés à ceux de la méthode ASME/B31G.

2. Modélisation

Pour modéliser le pipeline nous avons utilisé le logiciel ANSYS avec deux cas de figure, un modèle sans cavité (absence de corrosion, figure 1) et un modèle avec cavité (pipeline corrodé, figure 2). Etant donnée la symétrie du pipeline, nous avons modélisé un quart de cylindre. Les dimensions de la structure sont : longueur, rayon externe, rayon interne et épaisseur. Pour cela, on a créé une surface

rectangulaire de même longueur que le pipeline, d'une largeur équivalente à l'épaisseur du pipeline. En faisant une rotation de 90° de cette surface autour de l'axe x, on a obtenu un volume de la forme d'un quart de cylindre. Pour le maillage de la structure, nous avons utilisé des éléments volumiques à 20 nœuds Solid95. Ces éléments ont des formes compatibles de déplacement, et sont bien adaptés pour modéliser des frontières incurvées. Le maillage du volume est fait de façon à obtenir une concentration d'éléments autour du côté où sera représentée la cavité (figure 2). Pour les conditions aux limites, nous avons respecté les conditions de symétrie, mais aussi celles de l'expérience.

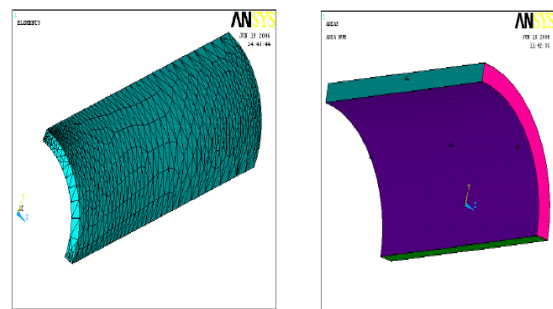


Figure. 1. Pipe sans cavité (non corrodé)

Concernant le pipe corrodé (modèle avec cavité), on a gardé les mêmes données utilisées dans le modèle sans cavité, et on a créé une cavité qui représente le défaut de corrosion sur le pipeline. Pour cela on a créé une surface parabolique sur l'épaisseur du quart du cylindre, d'une longueur équivalente à la longueur du défaut, et de largeur égale à la profondeur du défaut. Le volume de la cavité est obtenu par une rotation de 90° autour de la ligne supérieure de la paroi du pipeline. Ce volume est soustrait du volume du pipeline non corrodé (figure 2). Le même maillage est utilisé avec un affinement autour de la cavité. Nous avons fait varier les valeurs de la profondeur et de l'extension de la cavité

(défaut de corrosion, voir figure 2). La pression de rupture est déterminée en fonction des caractéristiques géométriques de chaque cavité. La pression critique, c'est-à-dire la pression maximale que pourra supporter un pipe corrodé est celle qui correspondra à la valeur critique de l'endommagement (valeur qui dépend du matériau et de la température).

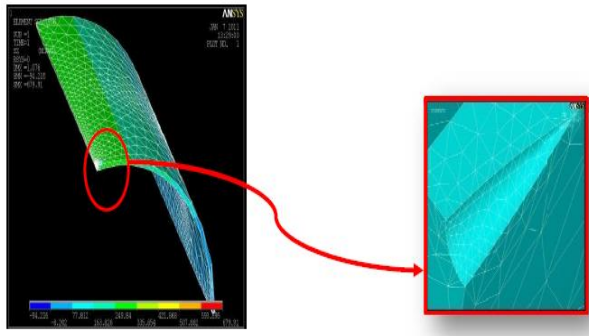
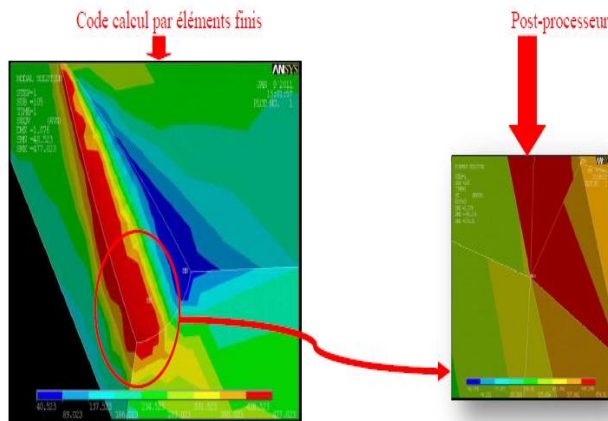


Figure 2. Modèle avec cavité

En utilisant le langage programmable du code ANSYS ver. 11.0, un sous programme a été développé et implanté dans le code principal pour la détermination de la zone la plus sollicitée (M^*) au niveau de la crevasse de la corrosion (voir figure ci-dessous) où des fissures peuvent s'y développer.



Zone la plus sollicitée Point critique (M^*)

En suite, la loi de comportement du point critique (M^*) où la contrainte équivalente σ^* est maximum, obtenue à l'aide du code ANSYS ver.11.0, est implantée dans le post-processeur

basée sur la méthode itérative de Newton. [Lemaitre et Doghri, 1994] :

$$\sigma^*(M) = \text{Sup}(\sigma^*)$$

$$\text{avec } \sigma^* = \sigma_{eq} R_v^{1/2}$$

$$R_v = \frac{2}{3}(1+\nu) + 3(1-2\nu) \left(\frac{\sigma_H}{\sigma_{eq}} \right)^2 \quad (2)$$

Dans la plus part des cas, ce critère est satisfait dans les zones de grande concentration de contrainte avec une valeur élevée du coefficient de triaxialité σ_H/σ_{eq} .

La troisième étape consiste à déterminer l'évolution du dommage en résolvant les lois constitutives suivantes :

$$E_{ij} = E_{ij}^e + E_{ij}^p$$

$$E_{ij}^e = \frac{1+\nu}{E} \frac{\sigma_{ij}}{1-D} - \frac{\nu}{E} \frac{\sigma_{kk}}{1-D} \delta_{ij}$$

$$E_{ij}^p = \frac{3}{2} \frac{\tilde{\sigma}_{ij}^D}{\sigma_{eq}} P \quad \text{Si } f = f_0$$

$$D = \frac{\sigma_{eq}^2}{2ES} R_v P \quad \text{Si } p \geq p_0 \quad (1)$$

En utilisant une méthode pas à pas simultanément avec la méthode (schéma) implicite de Newton qui assure une bonne convergence [Benallal et al, 1988]. La méthode développée ci-dessus donne en fonction de la pression interne du pipe, la valeur du dommage, la déformation plastique cumulée et les composantes des contraintes σ_{ij} à chaque instant, jusqu'à amorçage d'une fissure macroscopique au niveau du défaut de corrosion, ce qui permet de déterminer la nouvelle pression maximale de service que pourra supporter un pipe présentant un défaut de corrosion.

3. Validation de la méthodologie

Afin de pouvoir valider notre modèle, nous avons comparé nos résultats à ceux de la norme ASME/B31G et les résultats expérimentaux obtenus par T.A. Netto [Netto, 2005]. Pour le modèle sans cavité nous avons pris la valeur analytique $P_{rupt} = 50,89\text{MPa}$

N°	d (mm)	L (mm)	Prup(MPa) Expérimental	Prup(MPa) ASME/B31G	Prup(MPa) Numérique	Ecart en %
T1	-	-	57.33	50.89	53.4	6.85
T2	1.58	42	37.02	35.05	36	2.75
T3	1.59	21	44.65	42.53	44.7	0.11
T4	1.87	42	32.47	30.85	32.5	0.099
T5	1.91	21	41.28	38.93	42.5	2.95
T6	2.13	42	26.76	24.50	29.5	10.23
T7	2.14	21	34.55	34.86	36.8	6.51

La figure 7 illustre les résultats obtenus par les trois méthodes, l'expérimental, la méthode ASME /B31G et numériques.

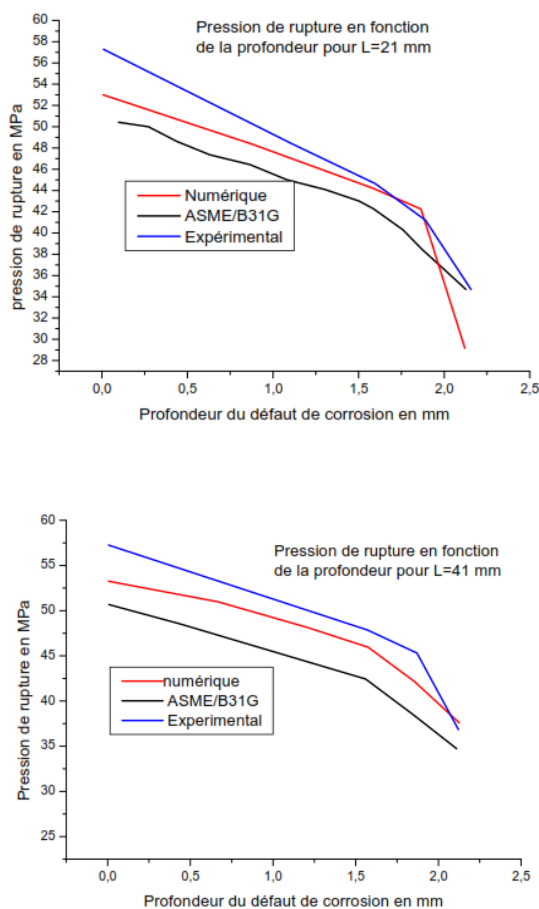


Figure 7. Pression de rupture en fonction de la profondeur du défaut de corrosion pour deux extensions L= 21mm et L= 41 mm.

4. Analyse et Interprétation des résultats

On constate que les résultats numériques obtenus sont les plus proches de la réalité

(résultats expérimentaux). Ces résultats numériques n'excèdent pas un écart de 10%.

En comparant les deux résultats numériques et ceux de la méthode ASME/B31G, on remarque que l'erreur moyenne est plus petite en numérique. Cela est dû à : la majoration par un facteur de sécurité utilisé par la norme B31G.

La méthode ASME/B31G utilise les caractéristiques géométriques du défaut par une projection de celui-ci, tandis que numériquement on utilise la surface exacte du défaut. La différence entre les résultats numériques et expérimentaux dépend de plusieurs facteurs:

- On a considéré un matériau parfaitement continu, alors qu'en réalité il existe des défauts, discontinuités et des micro-vides dans le matériau, qui peuvent être sources potentielles d'endommagement.
- Il existe toujours des contraintes résiduelles après l'usinage que nous avons ignoré dans les lois de comportement considérées dans cette étude.
- La forme de la cavité n'est pas parfaitement identique pour toutes les éprouvettes.
- Le comportement du matériau est obtenu par lecture sur le graphe "contrainte-déformation" obtenu expérimentalement, il existe alors des erreurs sur les valeurs utilisées numériquement.
- On a considéré une symétrie parfaite, ce qui n'est pas le cas en réalité.
- Pour les conditions aux limites, on a considéré un blocage des surfaces, il existe des petits déplacements qui causent des déformations, ainsi la structure du matériau est modifiée.
- Le maillage n'est pas assez fin, ni assez homogène.
- Les valeurs S (Coefficient d'endommagement), ϵ_{pD} (Déformation plastique seuil d'endommagement) et D_c (endommagement critique) du matériau X65 ont été prises approximativement, les vraies valeurs seraient déterminées par des essais charge-décharge.

La surface de charge a été prise sans écrouissage. Nous avons considéré que l'endommagement ne se produit que lorsque l'écrouissage est saturé.

5. Conclusion

Notre motivation principale dans ce travail a été de montrer que cette méthode est une contribution à la réhabilitation des pipes corrodés. L'étude et l'analyse de l'endommagement au voisinage d'un défaut de corrosion d'un pipe en acier X65, ont été abordées afin de construire un outil de simulation numérique de la rupture permettant de déterminer la nouvelle pression maximale de service que pourrait supporter un pipe en présence de crevasses de corrosion. La modélisation du phénomène d'endommagement s'appuie sur le concept de la Mécanique de l'Endommagement Continu (CDM) qui a atteint actuellement un stade de maturité lui permettant de modéliser tout type de dégradation. En utilisant le langage programmable du code ANSYS ver. 11.0, un sous-programme a été développé et implanté dans le code principal pour la détermination de la zone la plus sollicitée (M^*) au niveau de la crevasse de la corrosion où de potentielles fissures peuvent s'y développer. Dans une deuxième étape, un post-processeur basé sur la méthode itérative de Newton, a été appliqué à cette zone critique pour la détermination de la pression maximale que pourra supporter un pipe corrodé du réseau pipelinier G1Z. La pression maximale est la valeur de la pression qui correspond à la valeur critique de l'endommagement D_C (amorçage d'une fissure).

Les résultats numériques obtenus sont les plus proches des résultats expérimentaux comparés à ceux de la norme B31G. En effet, en comparant les deux résultats numériques et ceux de la méthode ASME/B31G, on remarque que l'écart moyen est plus petit en numérique. Cela est dû à la majoration par un facteur de sécurité utilisé par la norme B31G. La méthode ASME/B31G utilise les caractéristiques géométriques du défaut par une projection de celui-ci, tandis que numériquement on utilise la surface exacte du défaut. Aussi la norme B31G ne tient pas

compte du comportement élasto-plastique du matériau.

Références

- [1] Lemaitre J., Doghri I., *Damage 90: a post processor for crack initiation*, Comput. Methods appl. Mech. Eng. **115** (1994) 197-232.
- [2] Benallal A., Billardon R., et Doghri I., *An integration algorithm and the corresponding consistent tangent operator for fully coupled elastoplastic and damage equations*, Comm. Appl. Numer. Methods **4** (1988) 731-740.
- [3] Netto T.A., Ferraz U.S. and Estefen S.F., *The effect of corrosion defects on the burst pressure of pipeline*, J Constr Steel Res, **61**, pp 1185-1204, 2005