

Evaluation de la fiabilité des tubes en Polyéthylène

Rabia KHELIF* Kamel CHAOUI* & Alaa CHATEAUNEUF**

* LR3MI, Département de Génie Mécanique., Université Badji Mokhtar, BP 12, Annaba, 23000, Algérie

** Polytechnique de Clermont Ferrand, LGC – UBP, Complexe Universitaire des Cézeaux, BP 206, 63174 Aubière Cedex, France.

Résumé

Dans ce travail, le modèle « Rate Process Method RPM » est calibré pour donner le meilleur ajustement avec des données expérimentales. Il est ainsi nécessaire d'expliquer les incertitudes du modèle dans la prédiction de la durée de vie de la canalisation. Ensuite, une évaluation de la durée de vie du tube basée sur la fiabilité est effectuée après avoir intégré deux paramètres d'incertitude $\delta 1$ et $\delta 2$ dans le modèle RPM. L'analyse de la fiabilité est effectuée pour un tube en considérant toutes les incertitudes : chargement et géométrie aussi bien que les incertitudes sur les paramètres de RPM. Il ressort que l'influence des incertitudes relatives à la température et au modèle RPM est beaucoup plus importante que les fluctuations de la pression du gaz et la précision de la géométrie. Un des principaux résultats de cette étude réside dans l'utilisation des outils probabilistes pour la qualification des modèles de durée de vie et pour l'évaluation de la sûreté du tube. Celle-ci est obligatoire pour fournir au concepteur et au service de maintenance, une image réaliste du risque de défaillance des canalisations à différents stades de la durée de vie quant au vieillissement de la canalisation. Les résultats obtenus sont aussi très intéressants à la conception basée sur la fiabilité afin d'aboutir à un meilleur rapport coût/ sûreté.

Mots clefs : Fiabilité, durée de vie, Polyéthylène, RPM, Incertitudes.

Abstract

In this work, the model "Misses Process Method RPM" is gauged to give the best adjustment with experimental data. It is thus necessary to explain uncertainties of the model in the prediction of the lifetime of the canalisation. Then, an evaluation of the life duration of the tube based on reliability is carried out after having integrated two parameters of uncertainty $\delta 1$ and $\delta 2$ in model RPM. The analysis of reliability is carried out for a tube by considering all uncertainties: loading and geometry as well as uncertainties on the parameters of RPM. It arises that the influence of uncertainties relating to the temperature and model RPM is much more important than the fluctuations of the pressure of gas and the precision of the geometry. One of the principal results of this study resides in the use of the probabilistic tools for the qualification of the models of lifespan and for the evaluation of the safety of the tube. This one is obligatory to provide the originator and to the service of maintenance, a realistic image of the default risk of the drains at various stages of the lifespan as for the ageing of the drain. The results obtained are also very interesting with the design based on reliability in order to lead to a better cost ratio/safety.

Key words: Reliability, lifetime, Polyethylene, RPM, Uncertainties.

1 Introduction

L'utilisation des tubes sous pression avec les charges extérieures exercées (environnement, trafic,...) nécessite une recherche des conditions optimales d'exploitation et une connaissance des limites de service. Sous un chargement continu et à hautes températures, la durée de vie est régie par la contrainte de fluage. Plusieurs modèles sont disponibles dans la littérature [1-3]. Quelques études comparatives sont menées du point de vue déterministe. Cependant, les incertitudes représentent une partie intrinsèque du comportement du matériau, et par conséquent devraient être convenablement

prises en considération. L'évaluation basée sur la fiabilité des modèles de durée de vie des tubes est effectuée afin de proposer une méthodologie probabiliste pour déterminer les niveaux de sécurité du tube et les paramètres les plus importants influençant sa fiabilité. Cette étude est complétée par une analyse paramétrique sur la configuration du tube, de la pression du gaz et la température de service.

2 Evaluation de la durée de vie basée sur la fiabilité des gazoducs

2.1 Contrainte mécanique

En faisant abstraction de la contrainte résiduelle, la contrainte circonférentielle σ_c est déterminée par la superposition de trois contraintes principales [4,5]:

$$\sigma_c = \sigma_{pc} + \sigma_{sc} + \sigma_{tc} \quad (1)$$

Avec : σ_{pc} la contrainte circonférentielle due à la pression, σ_{sc} la contrainte circonférentielle due au sol et σ_{tc} la contrainte circonférentielle due au trafic.

2.2 Modèle de fiabilité

2.2.1 État limite de conception

- 1.1 La fonction $G(x_i)$ correspond à la marge de sûreté de la durée de vie définie par la différence entre le temps à la rupture et la durée de vie de service requise :
- 1.2

$$G(x_i) = t(x_i) - t_{service} \quad (2)$$

où x_i sont les variables aléatoires dans le système. Dans cette expression, le temps de rupture dépend des paramètres de la contrainte circonférentielle et du modèle reflétant les propriétés du matériau. Pour évaluer la probabilité de défaillance, on peut appliquer les techniques de Monte Carlo pour produire l'échantillon aléatoire de distribution de la durée de vie du tube. Ce procédé est commode pour l'évaluation des paramètres de distribution, mais il exige un nombre très grand de simulations pour l'évaluation de basses probabilités de rupture, qui est généralement le cas dans la conception. Afin de réduire le temps de calcul, des algorithmes itératifs [6] sont commodément appliqués pour traiter des fonctions d'état limite non- linéaires.

Pour le scénario de défaillance (2), l'indice de fiabilité β est évalué en résolvant le problème d'optimisation sous contrainte [6]. Pour obtenir la solution de ce problème, des algorithmes spécifiques de fiabilité ont été employés et combinés avec une procédure de recherche hiérarchique.

2.2.2 Incertitudes sur le tuyau

Les incertitudes du tube sont liées aux états de la géométrie, du chargement, de la fabrication et de service. Sur la base des données de la littérature [7], le tableau 1 indique les paramètres statistiques pour les variables aléatoires choisies dans le calcul de la contrainte circonférentielle (équation1). En raison du manque d'informations, la corrélation entre les variables est supposée négligeable.

Alors que les incertitudes liées au coefficient C_d sont plutôt grandes, les coefficients k_d et k_m ont des incertitudes modérées et doivent être choisis pour une situation donnée sur la base d'information imparfaite. Les paramètres géométriques tels que la largeur du fossé B , le rayon du tube r , et l'épaisseur de la paroi h contiennent des incertitudes dépendant des procédures de fabrication, d'exécution et du contrôle de qualité lors de la mise en place du tube. Les paramètres de la pression sont définis par les conditions de fonctionnement. Pour le tube considéré en HDPE avec le diamètre 200mm, la pression du gaz de 0,4MPa produit une contrainte circonférentielle $\sigma_p = 2,93\text{MPa}$, qui est beaucoup plus élevée que la contrainte due au chargement du sol $\sigma_s = 0,01\text{MPa}$ (pour information, la contrainte de flexion due au trafic est $\sigma_t = 0,06\text{MPa}$) ; c'est pourquoi les contraintes dues au sol et au trafic peuvent être négligées.

TAB.1- Variables aléatoires et paramètres correspondants.

Variable types	Symbole	Description	Valeur moyenne	Coefficient de variation
	R	Rayon interne du tube	100 mm ou 62,5 mm	0,02
	H	Epaisseur du tube	11,4 mm	0,05
	B	Largeur du fosse	440 mm	0,10
Coefficients	C _d	Coefficient de pression : sol	1,32	0,20
	k _d	Coefficient de déflexion	0,108	0,15
	k _m	Coefficient de débattement	0,235	0,15
	Γ	Densité du sol	1,89 · 10 ⁻⁵	0,10
Chargement	P	Pression interne	0,2 MPa à 0,5MPa	0,10
	T	Température de service	20°C	0,10

2.2.3 Incertitudes du modèle

Le modèle « Rate Process Method RPM » [8] est calibré pour donner le meilleur ajustement avec des données expérimentales. Il est ainsi nécessaire d'expliquer les incertitudes du modèle dans la prédiction de la durée de vie de la canalisation. Dans cette présente étude, deux paramètres incertains δ_1 et δ_2 sont introduits afin de refléter la dispersion observée pendant l'essai du tube.

$$\log_{10} t_f = \delta_1 \left(A + \frac{B}{T} \right) + \frac{\delta_2 C}{T} \log_{10} \sigma_c \quad (3)$$

Dans cette expression, on suppose que les paramètres δ_1 et δ_2 suivent une fonction de probabilité normalement distribuée avec une valeur moyenne égale à un et des coefficients de variation identifiés par les résultats d'essai. En utilisant la technique du Resampling, on a trouvé que les coefficients de variation de 0,004 et de 0,015 sont appropriés pour δ_1 et δ_2 , respectivement. Pour $T = 80^\circ\text{C}$, la figure 1 montre la dispersion des temps de rupture et quelques résultats d'essai.

$$\log_{10} t_f = A + B \log_{10} \sigma_c \quad (4)$$

Avec : $A = -16,241$; $B = 9342,2$ et $C = -1120,4$.

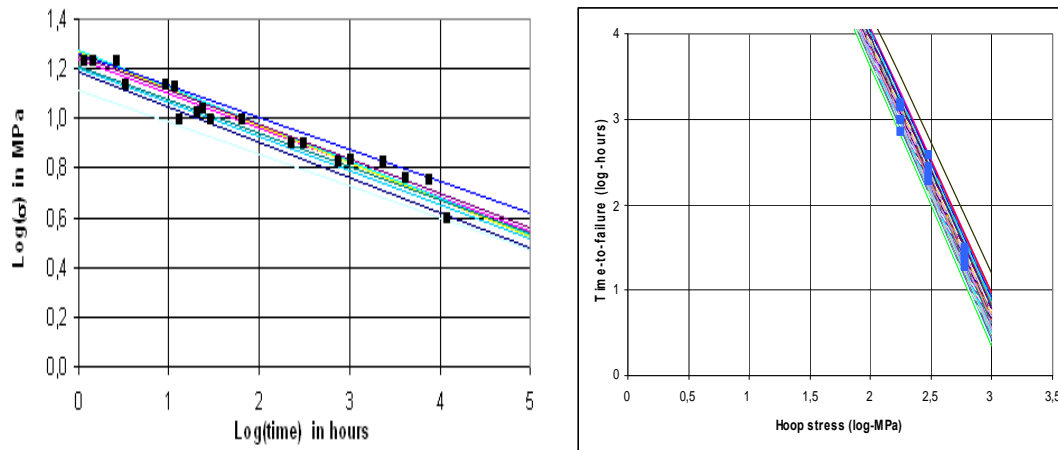


FIG .1-Temps de rupture en fonction de la contrainte circonférentielle.

3 Résultats et discussion

La sensibilité des paramètres du modèle RPM est analysée selon les données disponibles. L'évaluation de la fiabilité d'une canalisation est considérée pour une situation pratique de conception.

Le seuil admissible de sûreté dépend des conséquences de la défaillance. Pour les structures de génie civil, la valeur admissible de 10^{-4} semble être appropriée comme décrite par le Comité Mixte de la Sûreté des Structures (JCSS) [9].

3.1 Incertitudes du modèle RPM

Dans cette section, les incertitudes de la résistance du matériau sont introduites dans le modèle probabiliste. La dispersion de la durée de vie du tube avec RPM peut être définie par l'échantillonnage aléatoire des paramètres δ_1 et δ_2 (pour le moment, les autres variables sont gardées constantes). Les données expérimentales donnent un coefficient de variation égal à 0,004 pour δ_1 et à 0,015 pour δ_2 . Ces coefficients de variation sont dus à deux sources d'incertitudes : (1) le procédé expérimental et la taille du spécimen et (2) la dispersion intrinsèque du matériau. Pendant que la première partie peut être réduite par plus d'expériences et de meilleures procédures, la deuxième partie est liée aux propriétés et au processus de fabrication du matériau, et par conséquent ne peut pas être réduite. Pour vérifier l'effet des incertitudes du modèle, dix mille simulations de Monte Carlo ont été effectuées pour différents coefficients de variation et pressions du gaz, comme représenté sur la figure 2. On observe que la distribution des temps de rupture peut être correctement modélisée par des distributions log-normales. L'écart-type de la durée de vie est très grand, ceci est déjà confirmé par des essais et des modèles développés par le PPI (Plastic Pipe Institute) [10].

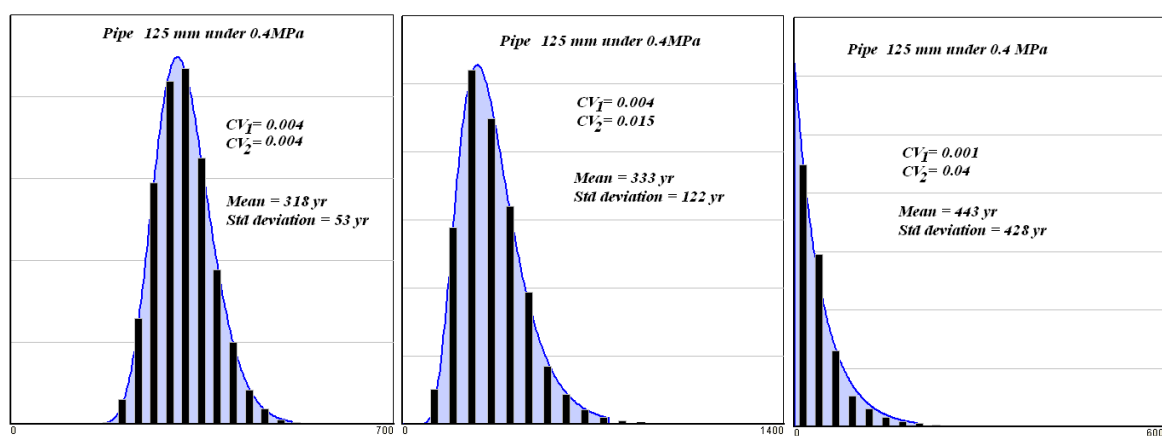


FIG.2- Simulations de Monte Carlo avec divers modèles d'incertitudes.

Ces résultats montrent que le coefficient de variation de la durée de vie est plus sensible à la dispersion du paramètre δ_2 qu'à celui de δ_1 . En comparant les deux configurations, on peut constater que le coefficient de variation est pratiquement indépendant de la configuration du tube (i.e. diamètre et pression), dans la plage de service considérée. Par ailleurs, la figure 2 montre que la distribution de durée de vie est normale pour une petite dispersion des paramètres, log-normale pour une dispersion modérée (ce qui correspond à la pratique), et tend à converger vers la distribution exponentielle quand la dispersion du paramètre δ_2 augmente au-dessus de 0,03. Plus généralement, la tendance est de diminuer la queue gauche de la distribution de durée de vie quand la dispersion de δ_2 augmente.

TAB.2- Paramètres de durée de vie sous divers coefficients de variation du paramètre du modèle.

Cas	Diamètre = 125mm Pression du Gaz = 0,4 MPa					Diamètre = 200mm Pression du Gaz = 0,3 MPa				
	CV de δ_1	0,001	0,001	0,004	0,004	0,004	0,001	0,001	0,004	0,004
CV de δ_2	0,004	0,015	0,004	0,010	0,015	0,004	0,015	0,004	0,010	0,015
Moyenne de durée de vie (an)	314	329	318	323	333	109	115	111	113	117
Ecart-type De durée de vie (an)	29	109	53	86	122	11	40	19	30	44
CV de durée de vie	0,092	0,331	0,170	0,266	0,366	0,101	0,348	0,171	0,265	0,376

3.2 Analyse de la fiabilité des tubes en HDPE

L'analyse de la fiabilité est effectuée pour un tube en considérant toutes les incertitudes : chargement et géométrie (tableau 1) aussi bien que les incertitudes sur les paramètres de RPM. Pour le tube de diamètre 125mm à 20°C soumis à une pression de gaz de 0,4MPa, la probabilité de défaillance est $P_f = 10^{-3}$. Si le coefficient de variation du paramètre δ_2 est pris comme 0,004, au lieu de 0,015, la probabilité de défaillance passe à $1,3 \times 10^{-4}$. L'importance de la variable sur la sûreté du tube est illustrée dans la figure 3, où la température est la variable la plus importante, suivie du paramètre du modèle δ_2 et de l'épaisseur du tube ; les autres paramètres dans le tableau 2 n'ont aucun effet significatif sur la sûreté du tube. La réduction de la dispersion δ_2 mène à l'augmentation significative de l'importance de la température (de 33% à 48%) et de l'épaisseur (de 17% à 22,4%), aussi bien que la pression de gaz (de 11% à 15%). On observe la même tendance pour les tubes de diamètre 200mm.

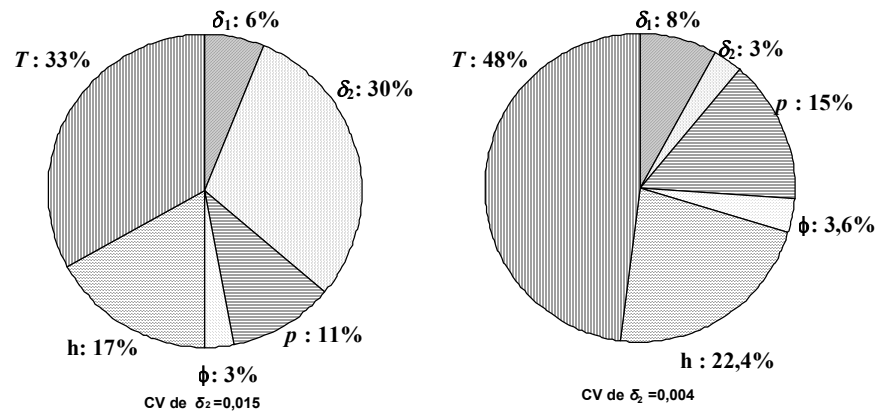


FIG.3- Importance des variables sur la sécurité du tube en terme de CV de δ_2 .

Le tableau 3 indique les probabilités de rupture à 50 ans pour différentes considérations d'incertitudes, avec les données de probabilité pour la géométrie et le chargement (sol, pression du gaz et température) tirées du tableau 1. Quand le modèle et la température sont déterministes, les niveaux de probabilité sont plutôt bas. Cependant, quand les incertitudes du modèle sont considérées, particulièrement avec un coefficient de variation $c_{\delta_2} = 0,015$, la probabilité de défaillance est respectivement multipliée par 10000 et par 10 pour les deux diamètres du pipe (125mm et 200mm). L'introduction des fluctuations de la température multiplie une fois de plus ces probabilités par un facteur d'environ 10. Tandis que pour le diamètre 125mm sous une pression de 0,4MPa, la probabilité de défaillance est encore basse, le diamètre 200mm sous 0,3MPa indique une probabilité de défaillance à 50 ans d'environ 10%, ce qui est extrêmement élevé. Naturellement, ces résultats doivent être considérés avec une attention particulière comme ils dépendent fortement des modèles probabilistes adoptés. L'acquisition des incertitudes sur le modèle à long terme nous permet d'améliorer une telle évaluation, mais le manque d'informations pratiques sur le comportement in-situ à long terme demeure toujours la difficulté principale.

Table 3. Probabilités de défaillance à 50 ans pour différentes considérations d'incertitude.

Cas	Géométrie (Tableau 1)	Chargement (Tableau 1)	Modèle		Température	Ø125mm (0,4MPa)	Ø 200mm (0,3MPa)
1	Aléatoire	Aléatoire	Déterministe		Déterministe	$4,2 \times 10^{-9}$	$4,9 \times 10^{-3}$
2	Aléatoire	Aléatoire	$c_{\delta_1}=0,004$	$c_{\delta_2}=0,004$	Déterministe	$2,1 \times 10^{-7}$	$1,2 \times 10^{-2}$
3	Aléatoire	Aléatoire	$c_{\delta_1}=0,004$	$c_{\delta_2}=0,015$	Déterministe	$7,7 \times 10^{-5}$	$5,1 \times 10^{-2}$
4	Aléatoire	Aléatoire	$c_{\delta_1}=0,004$	$c_{\delta_2}=0,004$	$c_T=0,1$	$1,3 \times 10^{-4}$	$5,5 \times 10^{-2}$
5	Aléatoire	Aléatoire	$c_{\delta_1}=0,004$	$c_{\delta_2}=0,015$	$c_T=0,1$	$9,9 \times 10^{-4}$	$9,2 \times 10^{-2}$

La figure 4 montre l'évolution de l'indice de fiabilité en fonction de la pression à différentes températures. Il est clair que pour une température permanente au-dessus de 30°C, la durée de vie de service à 50 ans ne peut pas être assurée avec sûreté. Pour le niveau de sûreté de 3,8 (i.e. une probabilité de défaillance égale à 10^{-4}), la pression du gaz permise dans des tubes de diamètre 125mm est donnée par 3 bars à 25°C, 3,6 bars à 20°C et 5 bars à 15°C. Ces courbes confirment la grande influence de la température ambiante sur la fiabilité du tube.

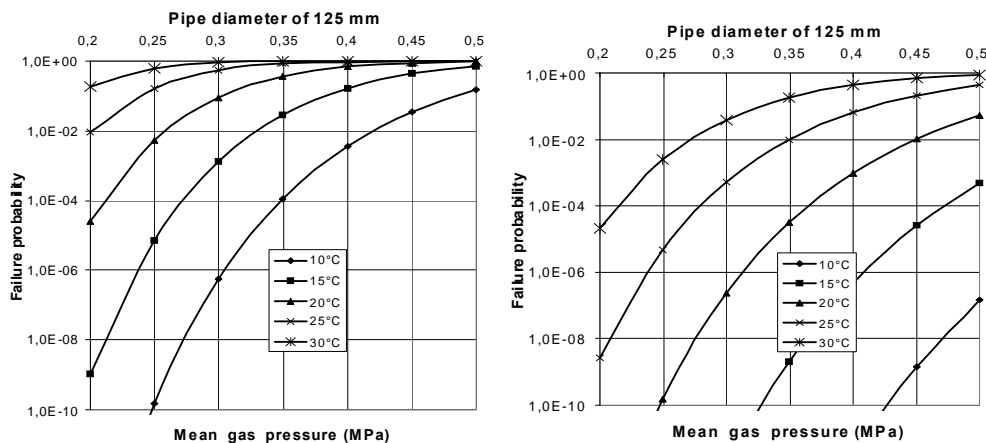


FIG.4- Evolution de l'indice de fiabilité en fonction de la pression renforcée à différentes températures.

4 Conclusion

Un des principaux résultats de cette étude réside dans l'utilisation des outils probabilistes pour la qualification des modèles de durée de vie et pour l'évaluation de la sûreté du tube. Selon les données disponibles, les incertitudes des paramètres du modèle devraient être considérées dans l'évaluation de la sûreté du tube. L'analyse complète montre que l'influence de la température et des paramètres du modèle sur la sûreté du tube est beaucoup plus grande que les fluctuations de la pression du gaz et la précision de la géométrie. Une conclusion pratique peut être formulée en orientant l'équilibre du coût/sûreté sur les conditions de service et d'installation, plutôt que sur les contrôles excessifs de l'épaisseur du tube.

Références

- [1]. M. Farshad, Two new criteria for the service life prediction of plastics pipes, Polymer Testing, Volume 23, Issue 8, December 2004, Pages 967-972.
- [2]. J. Lai et A. Bakker, Analysis of the non-linear creep of high-density polyethylene, Polymer, 1995, Vol. 36, No. 1, pp. 93-99.
- [3]. M. S. Song, G. X. Hu et L. J. Hu, Prediction of long-term mechanical behaviour and lifetime of polymeric materials, Polymer Testing, Volume 17, Issue 5, August 1998, pages 311-332.
- [4]. M.G. Spangler et R.L. Handy, Soil engineering, 4th edition, Harper and Row, New York, 1982.
- [5]. M. Ahammad et R.E.Melchers, Reliability of underground pipelines subject to corrosion, J.Transport Engng, 1994.
- [6]. O. Ditlevsen et H.O. Madsen, Structural reliability methods, John Wiley & Sons, 1996.
- [7]. J. Zhou, Reliability assessment method for pressure piping containing circumferential defects based on fuzzy probability, International Journal of Pressure Vessels and Piping 2005; Volume 82, Issue 9, pages 669-678.
- [8]. The plastic Pipe Institute Inc., Rate Process Method for Projecting Performance of Polyethylene Piping Components, 1999, Technical Note TN-16/99.
- [9]. Madsen H.O., Krenk S., Lind N.C., Methods of Structural Safety, Dover Publications 2006.
- [11]. The Plastic Pipe Institute, Nature of Hydrostatic Stress Rupture Curves, Technical Note TN-7/2000, p. 11.