

Estimation de la durée de vie résiduelle des pipelines corrodés

El Hassene AIT MOKHTAR^{1,2}, Anis YETTOU², Celia AMARI²

¹ Unité de recherche LaMOS, Faculté de Technologie, Université de Bejaia, Algérie, elhassene.aitmokhtar@univ-bejaia.dz

² Département de Génie Electrique, Faculté de Technologie, Université de Bejaia, Algérie,

RESUME La durée de vie résiduelle pourrait être un indicateur important pour la planification de l'inspection et de la maintenance des structures se dégradant. Dans ce travail, nous proposons une approche pour l'estimation et l'actualisation de la durée de vie résiduelle d'une section de pipeline soumis à la dégradation par corrosion. Cette approche s'appuie sur un modèle prédictif modélisant la perte d'épaisseur par corrosion pour estimer la durée de fonctionnement avant la défaillance. Afin de prendre en considération les éventuelles évolutions des facteurs agissant sur le processus de dégradation (i.e. corrosion), l'approche proposée permet la mise à jour de la durée de vie résiduelle lorsque de nouvelles mesures de dégradation sont disponibles.

Mots-clefs durée de vie résiduelle, pipelines, corrosion, actualisation bayésienne, pronostic.

I. INTRODUCTION

La corrosion est la forme la plus courante de détérioration structurelle des pipelines. Cela est principalement dû à l'environnement agressif dans lequel ils sont enterrés. Afin de maîtriser cette dégradation et d'éviter les défaillances en fonctionnement, de nombreux travaux dédiés à la planification de la maintenance et des inspections des pipelines ont vu le jour ces dernières années (Ait Mokhtar et al., 2018, Iqbal et al., 2017). En effet, une planification optimale de la maintenance permet d'une part, une exploitation optimale du cycle de vie du système. D'autre part, une minimisation des défaillances en fonctionnement aux lourdes conséquences. Afin de remplir ses objectifs, la connaissance du temps prévu jusqu'à la prochaine défaillance, communément appelé durée de vie résiduelle (*Remaining Useful Life (RUL)*), peut-être d'une grande utilité (Hu, et al., 2022).

Dans ce travail nous proposons une approche pour l'estimation de la durée de vie résiduelle des pipelines corrodés en se basant sur les modèles prédictifs de perte d'épaisseur par corrosion. Etant donné que le phénomène de corrosion est affecté par l'environnement dans lequel la structure se trouve et que cet environnement est loin d'être stable, il est important d'adapter les plans d'inspection et de maintenance à ses évolutions. Dans cette optique, l'approche proposée permet également d'actualiser la RUL lors de l'obtention de nouvelles données d'inspection et ce après avoir actualisé le modèle prédictif de corrosion.

II. DUREE DE VIE RESIDUELLE

La durée de vie résiduelle d'un bien correspond au temps restant avant qu'il ne soit plus capable de remplir ses fonctions requises. L'estimation de la RUL se fait à partir d'un processus appelé "pronostic". Ce dernier est défini comme « *l'estimation de la durée de fonctionnement avant défaillance et du risque d'existence ou d'apparition ultérieure d'un ou de plusieurs modes de défaillance* » (ISO, 2004). Dans la littérature, trois approches principales peuvent être distinguées :

1. une approche basée sur des modèles physiques décrivant le processus de dégradation et son évolution dans le temps (e.g. fissuration, usure, corrosion, perte de performance, etc.). Dans ce cas, la connaissance du seuil à partir duquel la dégradation est considérée comme étant critique est essentielle pour la réussite de l'approche.
2. une approche basée sur les données (i.e. indicateurs de dégradation). Il s'agit ici de données de monitoring permettant de suivre l'évolution d'un ou plusieurs indicateurs de dégradation.
3. une approche basée sur l'expérience (i.e. fiabilité). Il s'agit ici d'une méthode purement statistique s'appuyant sur les données de retour d'expérience ou l'avis d'expert sur le système lui-même ou sur des systèmes similaires. Cette approche est généralement utilisée dans le cas où l'on ignore le comportement physique du processus de dégradation.

Dans ce travail, nous proposons une méthode combinant les deux premières approches. En effet, un modèle prédictif de perte de matière par corrosion est utilisé pour l'estimation de la durée de vie d'un pipeline. Ensuite, en se basant sur des données d'inspection relatives à la perte d'épaisseur, la durée de vie résiduelle est actualisée après l'actualisation des paramètres du modèle de corrosion.

III. ESTIMATION DUREE DE VIE RESIDUELLE

A. Modèle de corrosion

Dans la littérature, plusieurs approches sont utilisées pour la modélisation de la perte de matière par corrosion, donnant naissance à plusieurs modèles. Dans ce travail, nous retenons le modèle proposé par Paik et al. (1998) qui est un modèle non linéaire permettant de représenter efficacement trois phases : (i) une première phase où la perte de matière est nulle sous l'effet de la couche protectrice anticorrosion, (ii) une deuxième phase où la perte de matière est croissante dans le temps et (iii) une troisième phase où la perte de matière se stabilise sous l'effet de la formation d'une couche de corrosion protégeant la structure de l'agressivité de l'environnement. Selon Paik et al. (1998), la perte d'épaisseur par corrosion en fonction du temps s'écrit :

$$d(t) = c_1 (t - T_0)^{c_2} \quad (1)$$

où $d(t)$ est la perte d'épaisseur par corrosion en fonction du temps, T_0 est la durée de vie de la couche protectrice anticorrosion, c_1 qui représente le taux de corrosion annuel est supposé suivre

la loi de Weibull à deux paramètres (i.e. le paramètre de forme β et le paramètre d'échelle η) et c_2 qui est un coefficient de corrosion compris entre 0 et 1.

B. Actualisation bayésienne du modèle de corrosion

Les coefficients c_1 et c_2 du modèle de corrosion sont généralement estimés à partir de connaissances a priori. Lors des inspections de nouvelles mesures de perte d'épaisseur sont collectées sur le système. Ces mesures peuvent être utilisées pour l'actualisation des coefficients de corrosion en utilisant l'approche bayésienne (Ait Mokhtar et al., 2016). L'algorithme utilisé permet de définir la distribution a posteriori des coefficients de corrosion à partir des coefficients initiaux et d'un échantillon d'observations représentant les pertes d'épaisseur $d^* \equiv \{d_1, d_2, \dots, d_m\}$ observées aux instants respectifs $t^* \equiv \{t_1, t_2, \dots, t_m\}$. Cet algorithme qui est proposé par Ait Mokhtar et al. (2016) est constitué des étapes suivantes :

- (1) Commencer avec les paramètres de corrosion initiaux $\theta^{(0)} \equiv \{c_1^{(0)}, c_2^{(0)}\}$
- (2) A l'itération n , générer un candidat $\theta^{(c)} \equiv \{c_1^{(c)}, c_2^{(c)}\}$ à partir d'une loi de proposition $q(\theta^{(c)} | \theta^{(n-1)})$, tel que :

$$c_1^{(c)} = \mathbf{N}(c_1^{(n-1)}, \sigma_{c_1}) \quad \text{et} \quad c_2^{(c)} = \mathbf{N}(c_2^{(n-1)}, \sigma_{c_2})$$

- (3) Calculer :
$$\rho(\theta^{(c)}, \theta^{(n-1)}) = \min \left(1, \frac{l(x|\theta^{(c)})\pi(\theta^{(c)})q(\theta^{(c)}|\theta^{(n-1)})}{l(x|\theta^{(n-1)})\pi(\theta^{(n-1)})q(\theta^{(n-1)}|\theta^{(c)})} \right)$$

avec :
$$l(x|\theta^{(c)}) = \prod_{i=1}^m \mathbf{N}_{PDF}(d^*(i), d_{ob}^{(c)}(i), \sigma_d)$$

$$d_{ob}^{(c)} = c_1^{(c)}(t^*(i) - T_0)^{c_2^{(c)}}$$

$$\pi(\theta^{(c)}) = \mathbf{W}_{PDF}(c_1^{(c)}, \beta, \eta) \mathbf{N}_{PDF}(c_2^{(c)}, c_2, \sigma_{c_2})$$

- (4) Générer une variable aléatoire U à partir de la loi uniforme dans $[0,1]$.
- (5) Prendre :
$$\begin{cases} \theta^{(n)} = \theta^{(c)} & \text{si } U \leq \rho(\theta^{(c)}, \theta^{(n-1)}) \\ \text{sinon } & \theta^{(n)} = \theta^{(n-1)} \end{cases}$$
- (6) Incrémenter n et revenir à l'étape (2)

où \mathbf{N}_{PDF} et \mathbf{W}_{PDF} sont respectivement les fonctions de densité de probabilité de la loi normale et de la loi de Weibull.

C. Estimation de la durée de vie résiduelle

L'estimation de la durée de vie résiduelle d'un pipeline corrodé se fait selon les étapes suivantes :

- (1) générer n couple de coefficients de corrosion $\{c_1, c_2\}$ à partir de la loi normale ;
- (2) pour chaque couple de coefficients, générer une trajectoire de perte d'épaisseur par corrosion à partir de l'éq. (1) ;
- (3) pour chaque trajectoire, déterminer l'instant de franchissement du seuil de défaillance D ;

La durée de vie résiduelle se calcule à partir des instants de franchissement du seuil de défaillance.

IV. APPLICATION

L'approche proposée dans ce travail est appliquée sur une section de pipeline souterrain utilisé dans le transport des hydrocarbures. Dans cette application les hypothèses suivantes sont considérées :

- La conditions géotechniques sont supposées identiques le long de la section du pipeline
- La section du pipeline est soumise à une corrosion généralisée
- La section du pipeline est d'une épaisseur initiale de 10 mm

Les paramètres du modèle de corrosion sont résumés dans le tableau 1.

TABLEAU 1. Paramètres du modèle de corrosion (Ait Mokhtar et al.,2016)

Paramètre	c_1			c_2		T_0
	β	η	μ_{c_1}	μ_{c_2}	σ_{c_1}	
Valeur	1.588	0.0926	0.083	0.829	0.083	4

A. Estimation de la durée de vie résiduelle

A partir des paramètres du tableau 1, 1000 trajectoires de perte d'épaisseur sont générées. Pour un seuil de défaillance correspondant à 80% de l'épaisseur initiale du pipeline, nous avons estimé la durée de vie résiduelle du pipeline. Les résultats obtenus sont portés sur la figure 1.

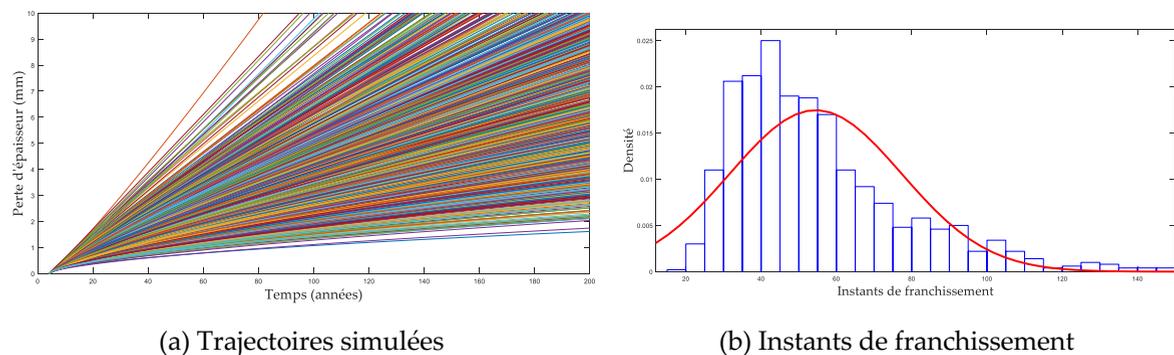


FIGURE 1. Estimation de la durée de vie résiduelle d'un pipeline

Les résultats obtenus indiquent que l'âge moyen du système est de 54.5 ans avec un coefficient de variation de 22.8 ans.

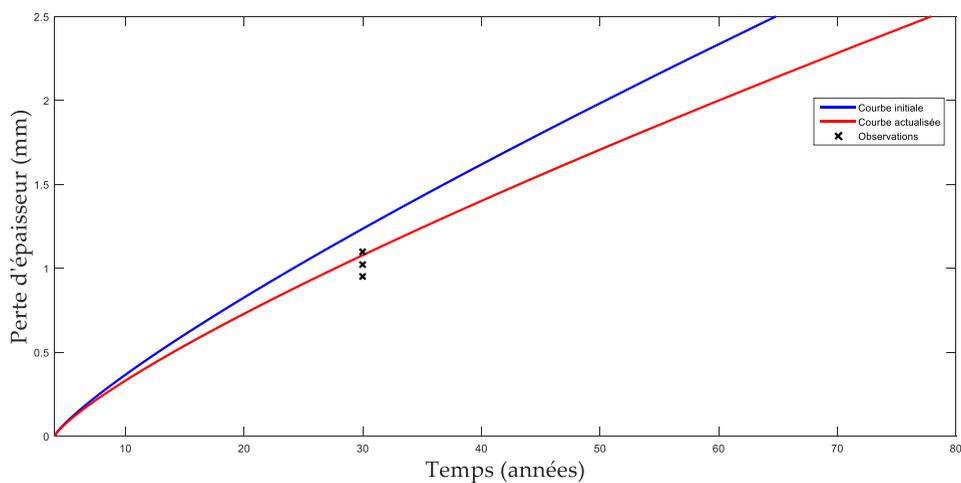
B. Actualisation du modèle de corrosion

Dans cette partie nous supposons qu'à l'instant $t = 30$ ans, une inspection est effectuée. Lors de cette inspection, trois mesures de perte d'épaisseur par corrosion sont obtenues dans trois endroits différents du pipeline tel que : $d^* = \{0.95, 1.10, 1.02\}$ (mm). L'algorithme d'actualisation a

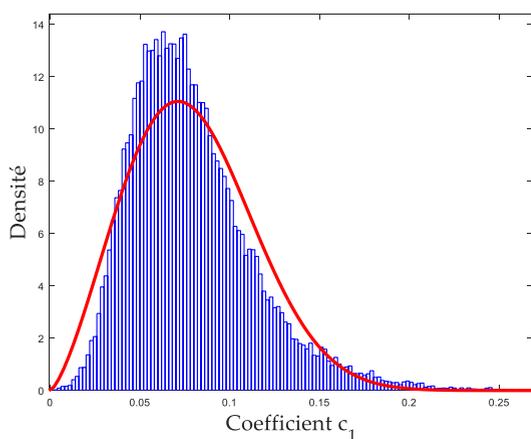
permis d'actualiser les coefficients du modèle de corrosion. Les résultats d'actualisation sont portés sur la figure 2 et le tableau 2. Ces résultats sont obtenus pour 10^5 simulations tout en ignorant 10% des premières simulations pour diminuer l'influence des paramètres de départ.

TABLEAU 2. Paramètres Actualisés du modèle de corrosion

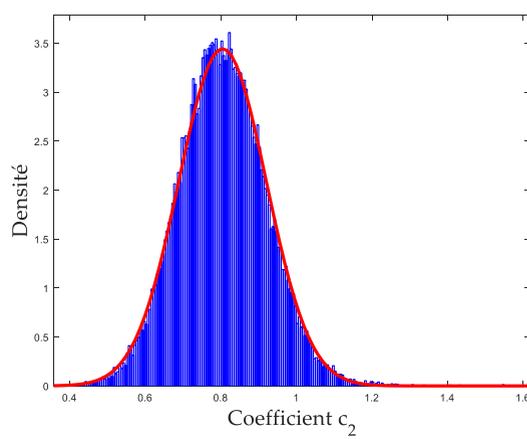
Paramètre	c_1			c_2	
	β	η	μ_{c_1}	μ_{c_2}	σ_{c_1}
Valeur	2.414	0.089	0.0787	0.804	0.116



(a) Evolution de la perte d'épaisseur après actualisation



(b) Coefficient actualisé c_1



(c) Coefficient actualisé c_2

FIGURE 2. Résultats de l'actualisation du modèle de corrosion

La figure 2 montre l'efficacité de la procédure d'actualisation des coefficients de corrosion. En effet, comme on peut le constater, la courbe de perte d'épaisseur actualisée tend à mieux représenter les observations tout en respectant l'allure du modèle initial.

C. Actualisation de la durée de vie résiduelle

Pour l'actualisation de la durée de vie résiduelle, 1000 trajectoires de perte d'épaisseur par corrosion sont simulées à partir de l'instant de l'inspection en utilisant les valeurs des paramètres du tableau 2. Les résultats obtenus sont portés sur la figure 3. Les résultats obtenus indiquent que l'âge moyen du système après actualisation est d'environ 68 ans avec un écart type d'environ 14 ans. Sachant que l'inspection est effectuée à 30 ans, la durée de vie résiduelle du système est donc de 38 ans. Par comparaison avec les résultats initiaux, on peut constater l'apport de l'actualisation qui a permis, dans un premier temps d'actualiser le modèle de dégradation en fonction des mesures collectées lors de l'inspection et dans un deuxième temps, d'actualiser la durée de vie résiduelle du système. En outre, on peut également constater une diminution considérable de l'écart type de la durée de vie résiduelle après actualisation. Cela peut permettre une meilleure gestion du plan de maintenance du système ainsi qu'une exploitation optimale de ce dernier tout en évitant les défaillances en fonctionnement.

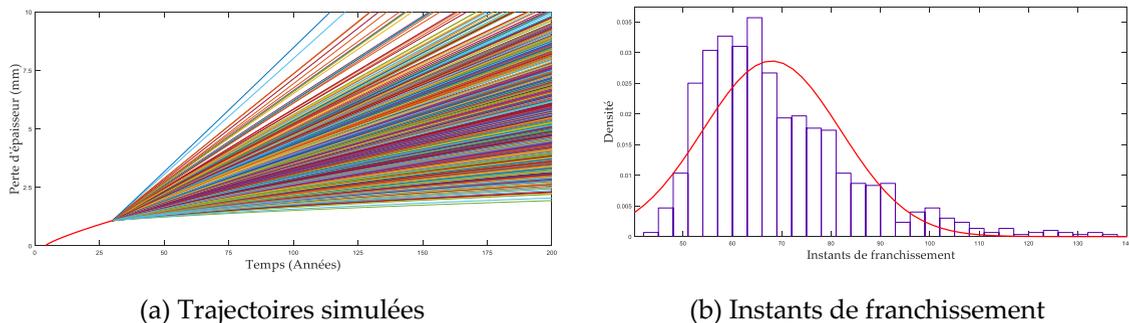


FIGURE 3. Actualisation de la durée de vie résiduelle d'un pipeline

V. CONCLUSION

L'approche proposée dans ce travail a permis une estimation de la RUL d'une section de pipeline soumis à la dégradation par corrosion en se basant sur un modèle prédictif de perte d'épaisseur par corrosion ainsi que les données d'inspection. L'apport principal de l'approche réside dans la possibilité d'actualiser la RUL lorsque des données de dégradation sont collectées sur le système. L'actualisation bayésienne a conduit à une modélisation réaliste de la dégradation (en fonction des données d'inspection) et une estimation efficace de la RUL. Cela va permettre une meilleure planification des inspections et de la maintenance de ce genre de système ainsi qu'une exploitation optimale de ce dernier. En perspective, nous travaillons sur : (i) l'influence du nombre d'observations sur le processus d'actualisation et (ii) la proposition d'une politique d'inspection et de maintenance basée sur la RUL pour les structures se dégradant par corrosion.

REFERENCES

E. Ait Mokhtar, A. Chateauneuf, & R. Laggoune, (2018). Condition based opportunistic preventive maintenance policy for utility systems with both economic and structural dependencies– application to a gas supply network. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 165, 214-223. <https://doi.org/10.1016/j.ijpvp.2018.07.001>

E. Ait Mokhtar, A. Chateauneuf, & R. Laggoune, (2016). Bayesian approach for the reliability assessment of corroded interdependent pipe networks. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 148, 46-58. <https://doi.org/10.1016/j.ijpvp.2016.11.002>

C. Byington, M. Roemer, & T. Galie, (2002). Prognostic enhancements to diagnostic systems for improved condition-based maintenance [military aircraft]. In *aerospace conference proceedings, ieee aerospace conference*, 6, 2815-2824. <https://doi:10.1109/AERO.2002.1036120>

Y. Hu, X. Miao, Y. Si, E. Pan, & E. Zio, (2022). Prognostics and health management: A review from the perspectives of design, development and decision. *Reliability Engineering & System Safety*, 217, 108063. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2021.108063>

ISO 13381-1. (2004) Condition monitoring and diagnostics of machines – pronostics – part1: General guidelines.

H. Iqbal, S. Tesfamariam, H. Haider, & R. Sadiq, (2017). Inspection and maintenance of oil & gas pipelines: a review of policies. *Structure and Infrastructure Engineering*, 13(6), 794-815.