

Gestion de l'intégrité des pipelines enterrés basée sur la fiabilité sous l'effet combiné de l'encrassement et les pertes de métal

Yacine Sahraoui¹, Mourad Nahal¹, Alaa Chateaneuf²

¹Laboratoire Électromécanique et Sûreté de Fonctionnement, Université Mohamed-Chérif Messaadia Souk Ahras, BP 1553, Souk Ahras, 41000, Algérie, yacinemaint@yahoo.fr

²Université Clermont Auvergne, CNRS, SIGMA Clermont, Institut Pascal, F-63000, Clermont-Ferrand, France, alaa.chateaneuf@cideco.tech

RESUME La gestion de l'intégrité des pipelines souffre souvent de plusieurs formes de dégradation qui varient dans le temps et dans l'espace, principalement l'encrassement (dépôts et tartre) et les pertes de métal (corrosion). Dans ce cadre, le présent travail a pour objet de développer une méthode probabiliste pour évaluer la fiabilité du système de canalisation en fonction du temps, en tenant compte de l'intersection des deux modes de défaillance courants : le colmatage et les fuites des tubes dues à l'encrassement et à la corrosion localisée respectivement. La décomposition de Karhunen-Loève a été utilisée pour modéliser la variabilité spatiale de la corrosion, des contraintes résiduelles et de l'encrassement dans les différentes zones irrégulières (Segments, coudes de tuyau avec brides et joints soudés). Dans ce travail, le pipeline est modélisé par un système en série et les probabilités de défaillance du système sont calculées par la méthode de Monte-Carlo. La démarche méthodologique proposée est appliquée à un pipeline enterré, afin de montrer les effets des principaux paramètres du système.

Mots-clefs Encrassement et corrosion des pipelines, Fiabilité du système, zone irrégulière, Variabilité spatiale.

I. INTRODUCTION

Les pipelines sont idéalement conçus pour le transport de produits pétroliers et gaziers, où leur gestion est une fonction vitale du gouvernement. Après des années d'exploitation, la canalisation vieillissante subit différents types d'altération tels que l'encrassement (dépôts et tartre) et les pertes de métal (A.O. Akinsanya et al., 2021). L'encrassement dans les pipelines est causé par les dépôts et tartre qui peuvent se tasser dans la conduite. Ces dépôts réduisent la section utile de passage, augmentent la rugosité interne et provoquent une augmentation des pertes de charges. Les dommages causés par la corrosion sont l'une des causes les plus fréquentes qui affectent la fiabilité et l'intégrité à long terme des ouvrages métalliques enterrés, à l'exception de certains secteurs où les dommages causés par des tiers sont la cause la plus citée (Lam, C. et Zhou, W., 2016). Par conséquent, le développement de modèles de dégradation prédictifs précis est nécessaire pour l'évaluation des risques des pipelines. Ensuite, les modèles prédictifs peuvent être utilisés pour optimiser l'inspection et la planification de la maintenance des réseaux de

canalisations face à un commerce ininterrompu et à une économie qui fonctionne. Les coudes de tuyau avec brides et joints soudés (M. Nahal et al., 2019) sont utilisés dans divers systèmes de canalisations pour assembler des tuyaux et modifier le sens d'écoulement du gaz ou du liquide (Fig. 1).

En conséquence, l'évaluation de la fiabilité des pipelines doit prendre en compte la variabilité spatiale de la corrosion, des contraintes résiduelles et de l'encrassement (dépôts et tartre) dans les zones irrégulières sur toute la longueur de la conduite, afin de former un système de tuyauterie étanche et d'assurer une connexion fiable avec une longue durée de vie.

Dans ce contexte, l'originalité du présent travail réside principalement dans le développement d'une méthodologie probabiliste pour la gestion de l'intégrité des pipelines enterrés avec prise en compte de l'intersection des deux modes de défaillance courants : le colmatage et les fuites des tubes dues à l'encrassement (dépôts et tartre) et à la corrosion localisée respectivement. La décomposition de Karhunen-Loève a été utilisée pour modéliser la variabilité spatiale de la corrosion, des contraintes résiduelles et de l'encrassement dans les zones irrégulières, en tenant compte de l'autocorrélation (Y. Sahraoui et al., 2016). Dans ce travail, le pipeline est modélisé par un système en série. Les probabilités de défaillance du système sont calculées par la méthode de Monte-Carlo.

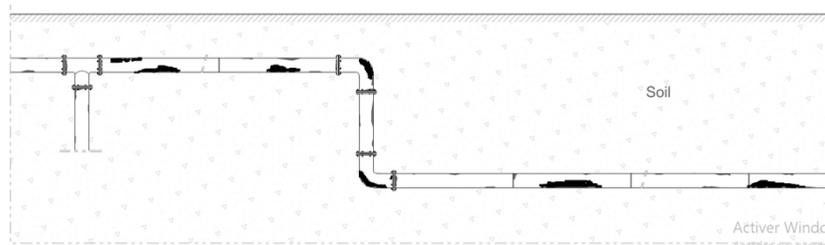


FIGURE 1. Encrassement dans les pipelines avec différentes zones irrégulières corrodées

II. INTEGRITÉ DES PIPELINES

A. Corrosion

Plusieurs études significatives des travaux expérimentaux et numériques ont été réalisées récemment, mais la plupart des chercheurs n'ont pas étudié les zones singulières dans les pipelines. Dans la pratique, les chercheurs utilisent dans la plupart des cas la corrosion localisée, où elle suit généralement un modèle de puissance afin d'exprimer la perte en épaisseur, et qui a pour formule (Y. Sahraoui et al., 2016) :

$$d(T) = k(\vec{x}, \theta) T^n \quad (1)$$

$$L(T) = \gamma k(\vec{x}, \theta) T^n \quad (2)$$

Où k et n sont des paramètres incertains de la corrosion, qui peuvent être dérivés à partir des propriétés du sol, \vec{x} et θ sont respectivement les variables spatiales et stochastiques, et γ est le rapport entre la longueur et la profondeur de la corrosion localisée.

B. Contrainte résiduelle

L'effet des processus de fabrication des pipelines génère inévitablement des contraintes résiduelles. Ces contraintes peuvent également être générées par l'impact d'autres phénomènes tels que le soudage lors de l'opération d'assemblage. R. Gou et Al., (R. Gou et Al., 2011) caractérisent les contraintes résiduelles sur les zones irrégulières du pipeline (coude, bride et soudure bout à bout) où leurs modèles sont présentés dans le tableau 1.

TABLEAU 1. Modèles de contraintes résiduelles

Zones	Contraintes résiduelles
Métal de base	$\sigma_{RS1} = 0.21 \sigma_y$
Soudure bout à bout	$\sigma_{RS2} = 0.26 \sigma_y$
Brides	$\sigma_{RS3} = 0.32 \sigma_y$
Coudes de tuyau	$\sigma_{RS4} = 0.29 \sigma_y$

Où σ_y c'est est la limite élastique du matériau.

La figure ci-dessous représente la géométrie descriptive des zones singulières avec présence du phénomène de corrosion qui a été modélisé en éléments finis pour voir son impact sur le comportement de notre structure.

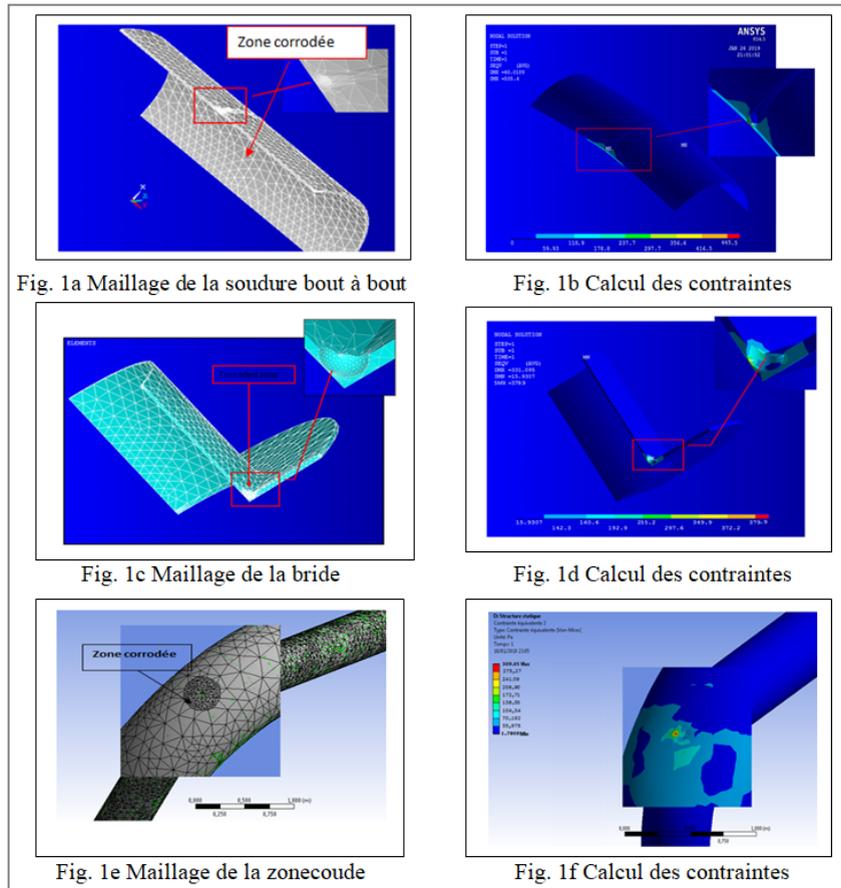


FIGURE 2. Modèles éléments fini

C. Encrassement dans les pipelines

L'encrassement dans les oléoducs est causé par le dépôt de cristaux de paraffine qui se caractérisent par une très grande dureté et de particules solides (poussières et grains de sables) qui se collent sur la paroi interne de la conduite. Dans le cas des Gazoduc, le condensât s'accumule et atteignant un certain volume au niveau des points bas du tuyau. Alors, l'encrassement dans les pipelines qui est causé par les dépôts et tartre, peut se tasser dans le tube et provoque une diminution de la section utile se traduisant par :

- Une réduction de la capacité de transport de la ligne, i.e. le débit passant au-dessous de la valeur nominale (demandée).
- Une augmentation du coût de transport.

Nous n'aborderons pas ici la problématique des pertes de charge d'une installation, où le débit d'un liquide ou d'un gaz est uniquement proportionnel à la vitesse d'écoulement et à la section de passage de la canalisation :

$$Q_{Obs} = \frac{\pi \cdot (D_{int} - D_{Enc})^2}{4} \cdot V \quad (3)$$

Avec Q_{Obs} est le débit observé à l'instant T, V est la vitesse d'écoulement du liquide ou du gaz, D_{int} est le diamètre interne du tuyau et D_{Enc} est le diamètre occupé par les dépôts et tartre à l'instant T.

Sous l'hypothèse que l'évolution temporelle du diamètre occupé par les dépôts et tartre suit un modèle de puissance, D_{Enc} peut être calculé par la formule suivante :

$$D_{Enc}(T) = A_{Enc}(\vec{x}, \theta) T^{B_{Enc}}$$

Où A_{Enc} et B_{Enc} sont des paramètres incertains de l'évolution du diamètre occupé par l'encrassement, qui peuvent être dérivés à partir de plusieurs facteurs (propriétés du produit transporté, conditions de température,....etc.), \vec{x} et θ sont respectivement les variables spatiales et stochastiques.

Notons qu'il existe très peu d'études dans la littérature scientifique sur l'évolution temporelle de l'encrassement dans les pipelines (R.A. Dawe et Y. Zhang, 1997).

D. Analyse de fiabilité

- Champs stochastique

Parmi les outils performants de génération de réalisations de champs corrélés, la décomposition de Karhunen-Loève permet d'approximer les champs aléatoires $k(\vec{x}, \theta)$, $\sigma_{RS_i}(\vec{x}, \theta)$ et $A_{Enc}(\vec{x}, \theta)$ par une série finie de variables aléatoires indépendantes normalisées ξ_j :

$$k(\vec{x}, \theta) = \bar{k}(\vec{x}) + \sum_{i=1}^M \sqrt{\lambda_i} \varphi_i(\vec{x}) \xi_i(\theta) \quad (4)$$

$$\sigma_{RS_i}(\vec{x}, \theta) = \overline{\sigma_{RS_i}}(\vec{x}) + \sum_{i=1}^M \sqrt{\lambda'_i} \varphi'_i(\vec{x}) \xi_i(\theta) \quad (5)$$

$$A_{Enc}(\vec{x}, \theta) = \overline{A_{Enc}}(\vec{x}) + \sum_{i=1}^M \sqrt{\lambda''_i} \varphi''_i(\vec{x}) \xi_i(\theta) \quad (6)$$

Un des principaux atouts de cette méthode est qu'elle permet le découplage des variables spatiales x et stochastiques θ . Les premiers termes de la décomposition sont les espérances spatiales des champs aléatoires $\bar{k}(\vec{x})$, $\overline{\sigma_{RS_i}}(\vec{x})$, $\overline{A_{Enc}}(\vec{x})$. La dépendance spatiale apparaît dans les modes propres (λ_i, φ_i) , (λ'_i, φ'_i) , $(\lambda''_i, \varphi''_i)$ du noyau de covariance, où λ , λ' , λ'' sont les valeurs propres et φ_i , φ'_i , φ''_i sont les vecteurs propres correspondants.

- Fonctions d'état limite

Dans l'analyse de fiabilité, il est nécessaire de définir une fonction d'état limite (également appelée fonction de performance) qui exprime la marge de sureté du système. Dans le cas de double effet des deux phénomènes: corrosion & contraintes résiduelles, la fonction d'état limite est définie comme suit :

$$G_{Zi}(x_i, t) = \sigma_y(x_i) - \sigma_{VZi}(x_i, t) \quad (7)$$

Avec $\sigma_{VZi}(x_i, t)$ la contrainte de Von Mises individuelle dans chaque zone, où on peut remplacer le modèle de chaque zone singulière dans sa fonction d'état limite (M. Nahal et al. 2019).

La fonction d'état limite individuelle dans chaque zone singulière en présence des dépôts et tartre, est déterminé comme suit:

$$G_{Enc_Zi}(x_i, t) = Q_{Obs}(x_i, t) - Q_{demandé}(x_i) \quad (8)$$

- Probabilités de défaillance

En raison de la complexité du système spatio-temporel dans notre étude, la méthode de Monte-Carlo (MC) est utilisée pour le calcul des probabilités de défaillance, où les outils de traitement d'incertitude utilisés avec la précision obtenue sont bien détaillés dans le travail précédent (Sahraoui et al., 2016). La probabilité de défaillance d'un seul segment ou zone i présentant un nombre m_i de défauts de corrosion et contraintes résiduelles ou en présence d'encrassement est donnée par :

$$P_{F_{individuelle}} = P\left(\bigcup_{j=1}^{m_i} [G_{ij} \leq 0]\right) \quad (9)$$

Dans ce cas-là, la probabilité de défaillance d'un système composé de n zones peut s'écrire sous la forme :

$$P_{F_{Système}} = P\left[\bigcup_i^n \left(\bigcup_{j=1}^{m_i} [G_{ij} \leq 0]\right)\right] \quad (10)$$

La probabilité de défaillance de l'intersection des deux modes de défaillance courants : le colmatage et les fuites des tubes dues à l'encrassement (dépôts et tartre) et à la corrosion localisée respectivement, est définie comme suit :

$$P_{F_{intersection}} = P(G_{Zi}(x_i, t) \leq 0 \cap G_{Enc_Zi}(x_i, t) \leq 0) \quad (11)$$

III. APPLICATION

Le but de cette application numérique est de montrer l'impact de corrosion et des contraintes résiduelles ainsi que l'encrassement sur la fiabilité de la structure. Le pipeline étudié, a un diamètre extérieur D et d'épaisseur de paroi nominale t , est soumise à une pression interne P . l'acier du pipeline est de qualité X70 avec une limite d'élasticité nominale σ_y , les données d'entrée sont fournies dans le Tab. 2, où les variables aléatoires sont considérées comme **distribuées** normalement. Le fait que très peu de travaux dans la littérature considèrent les zones singulières afin d'analyser la fiabilité des pipelines, nous a motivé à mener cette application numérique.

TABLEAU 2. Données statistiques des variables incertaines

Variable	Symbole	Valeur moyenne	Coef. de variation
Diamètre	D (mm)	508	0.03
Epaisseur	t (mm)	9.5	0.05

Limite élastique	σ_y (Mpa)	485	0.07
Pression de service	P (Mpa)	4	0.25
Taux de corrosion	k	0,144	0.56
Param. de corrosion	n	0,734	-
Débit demandé	$Q_{demandé}$ (mm/s)	$2.7 \cdot 10^5$	0.1
vitesse d'écoulement	V	1.38	0.02
Taux d'encrassement	A_{Enc}	25	0.56
Param. d'encrassement	B_{Enc}	0.5	-

A. Résultats et discussion

Avant d'analyser l'ensemble de la probabilité de défaillance du système, il a été décidé de viser l'effet de variabilité spatiale de la corrosion et des contraintes résiduelles à travers la dépendance stochastique sur chaque zone irrégulière séparément. Pour ce faire, quatre (4) zones irrégulières corrodées ont été considérées : métal de base, coudes de tuyau avec brides et joints soudés, de plus, un seul type de sol caractérisé par des facteurs k et n est considéré : limon argilo-sableux (faible). L'effet couplé du taux de corrosion variant dans l'espace et de la contrainte résiduelle est maintenant considéré dans la fiabilité des zones irrégulières du système de tuyauterie, en adoptant des champs stochastiques avec des longueurs de corrélation de 50 m et 1 m, correspondant respectivement à la longueur de corrélation spatiale de l'agressivité du sol et de la contrainte résiduelle.

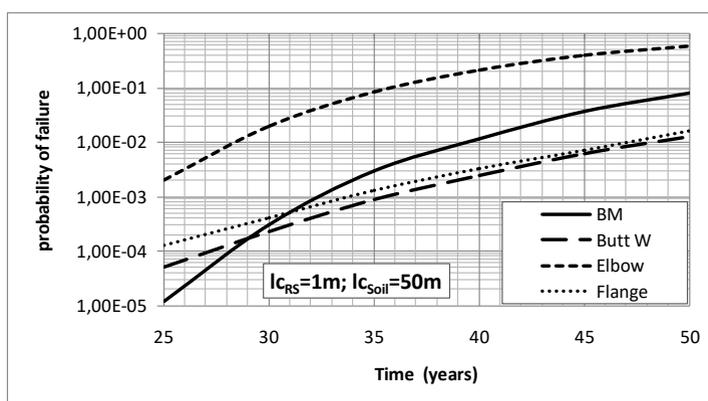


FIGURE 3. Probabilités de défaillance pour différentes zones irrégulières.

A partir des courbes représentées sur la figure.3, on peut voir que la probabilité de défaillance augmente dans le temps quelle que soit la zone irrégulière. De plus, à l'âge précoce de la structure (c'est-à-dire avant 29 ans dans cet exemple), le métal de base a la probabilité de défaillance la plus faible suivi de la zone soudée bout à bout tandis que la zone du coude présente

la probabilité de défaillance la plus élevée suivie de la zone de la bride. Néanmoins, en seconde partie de vie (c'est-à-dire lorsque la durée d'exploitation de l'ouvrage est supérieure à 31 ans), la zone du coude reste toujours la zone la plus vulnérable à la corrosion, du fait essentiellement de l'impact des contraintes résiduelles qui sont plus élevées dans le coude que dans les 'autres zones, suivies de la zone du métal de base. On peut également noter que les zones soudées bout à bout et la bride présentent plus de résistance aux phénomènes de corrosion pour une durée de service au-delà de 31 ans de la structure étudiée, principalement en raison du matériau de construction utilisé. En pratique, on peut dire que lorsque la structure (canalisation) est en service pendant une période inférieure à 29 ans, les probabilités de défaillance des zones irrégulières sont de plus en plus influencées par les contraintes résiduelles, ce qui explique la plus faible probabilité de défaillance de la zone de métal de base par rapport aux autres zones. Cependant, lorsque l'âge de la structure est supérieur à 29 ans, on peut clairement discerner que l'impact de la corrosion l'emporte sur l'effet de contrainte résiduelle, ce qui explique le changement observé dans l'ordre des probabilités de défaillance des zones où la probabilité de défaillance du métal de base est devenue plus importante que celles de la bride et des zones soudées bout à bout.

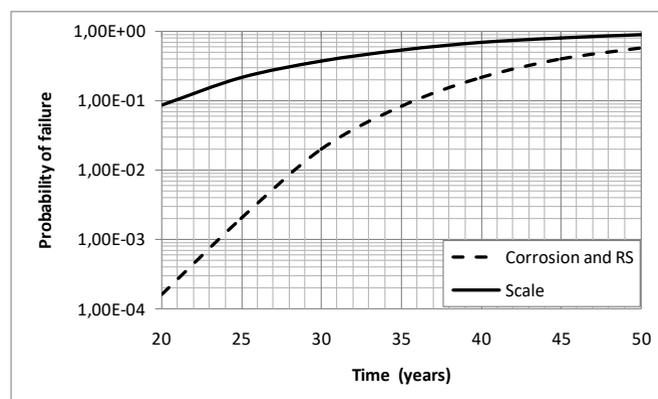


FIGURE 4. Probabilités de défaillance des coudes de tuyau pour deux cas

La figure. 4, trace les probabilités de défaillance des coudes de tuyau calculées par les modèles présentés dans la section précédente en tenant compte l'encrassement (dépôts et tartre) et le double effet des deux phénomènes: corrosion & contraintes résiduelles. En présence de l'encrassement, la probabilité de défaillance augmente fortement pour atteindre presque 1.00 après 20 ans de service. Le double effet des deux phénomènes: corrosion & contraintes résiduelles, mène à une probabilité de défaillance de 10^{-4} après 20 ans de service du tuyau. Ces courbes fournissent une image claire du niveau du risque nominal de défaillance du tube pour différents modes de défaillance.

La figure. 5, compare l'évolution temporelle des probabilités de défaillance du système global, pour les trois cas : Double effet des deux phénomènes: corrosion & contraintes résiduelle, présence de l'encrassement et l'intersection des deux modes de défaillance précédents. L'impact de cette hypothèse sur les résultats est naturellement à explorer dans les études futures. Il convient de noter que le système global est composé de 25 segments linéaires, 05 coudes de tuyau avec 10 brides et 25 joints soudés, accompagné de 10 défauts de corrosion localisée à chaque composant.

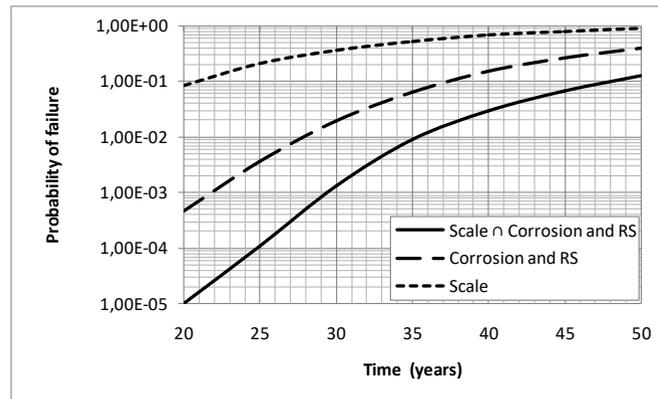


FIGURE 5. Probabilités de défaillance du système pour plusieurs cas.

Afin de définir les scénarios développés avec le temps et analyser les conséquences des défaillances d'un pipeline dues à l'encrassement et à la corrosion, on a utilisé la méthode de l'arbre d'événements, comme le montre la figure. 6, où le nettoyage et l'inspection des pipelines ont une contribution significative dans l'intégrité des pipelines et les coûts de la gestion.

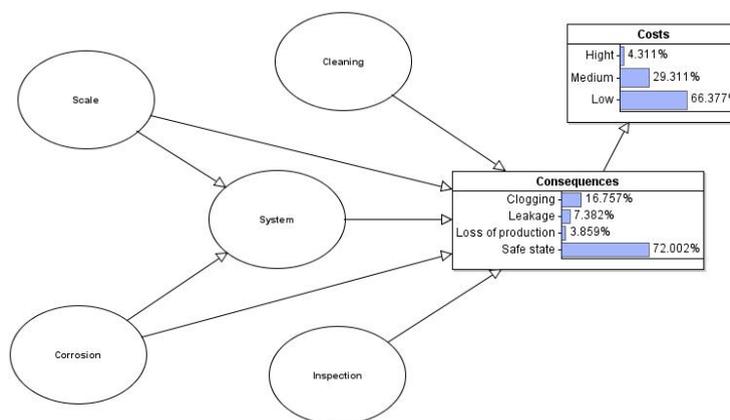


FIGURE 6. Arbre des conséquences

IV. CONCLUSION

Une méthodologie probabiliste a été développée pour la gestion de l'intégrité des pipelines enterrés avec prise en compte de l'intersection des deux modes de défaillance courants : le colmatage et les fuites des tubes dues à l'encrassement (dépôts et tartre) et à la corrosion localisée respectivement. Les simulations de Monte Carlo ont permis de calculer les probabilités de défaillance du système. Le modèle proposé peut apporter de précieuses informations destinées aux décideurs pour améliorer les performances de fiabilité du système. En perspectives de ce travail, les formulations présentées ici peuvent être utilisées dans l'élaboration d'une stratégie optimale de nettoyages des pipelines (par le renvoi des sphères et racleurs) et d'inspection des zones irrégulières grâce à l'outil intelligent (CND).

REFERENCES

Akinsanya, AO., Qin, J., Guan, Y., Sørensen, JD., Faber, MH. (2021). Risk informed integrity management of sub-surface well production tubings subject to combined scale and corrosion degradations. *Int. J. Press. Vessels Pip.*, 192, 104424. <https://doi.org/10.1016/j.ijpvp.2021.104424>

Dawe, R.A., Zhang, Y. (1997). Kinetics of calcium carbonate scaling using observations from glass micromodels. *J. Petrol. Sci. Eng.*, 18 (3–4), 179–187. [https://doi.org/10.1016/S0920-4105\(97\)00017-X](https://doi.org/10.1016/S0920-4105(97)00017-X)

Gou R, Zhang Y, Xu X, Sun L, Yang Y. (2011). Residual stress measurement of new and in-service X70 pipelines by X-ray diffraction method. *NDT&E International* 44, 387–393. <https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2011.03.003>.

Lam, C., Zhou, W. (2016). Statistical analyses of incidents on onshore gas transmission pipelines based on PHMSA database. *Int. J. Press. Vessels Pip.* 145, 29–40. <https://doi.org/10.1016/j.ijpvp.2016.06.003>.

Nahal M., Chateauneuf A., Sahraoui Y, (2019). Reliability analysis of irregular zones in pipelines under both effects of corrosion and residual stress. *Engineering Failure Analysis.*, 98, 177–188. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2019.01.081>.

Sahraoui Y., Chateauneuf A. (2016). The effects of spatial variability of the aggressiveness of soil on system reliability of corroding underground pipelines. *Int. J. Press. Vess. Pip.*, 146, 188–197. <https://doi.org/10.1016/j.ijpvp.2016.09.004>.