

Synthèse bibliographique pour l'évaluation de la fiabilité des réseaux enterrés de gaz exposés au phénomène de mouvement de terrain dans la perspective d'un usage pour le transport d'hydrogène

Mariam JOUNDI¹, Rasool MEHDIZADEH¹, Olivier DECK¹

¹ Université de Lorraine, CNRS GeoRessources, Ecole des Mines de Nancy, Campus ARTEM, CS14234, 54042 Nancy Cedex, France ; mariam.joundi@univ-lorraine.fr

RESUME Cet article présente une synthèse bibliographique pour l'évaluation de la réponse des réseaux enterrés exposés aux mouvements de terrain, en mettant particulièrement l'accent sur l'approche fiabiliste. Tout d'abord, les différents types de mouvements de terrain qui affectent les conduites enterrées et qui sont abordés dans la littérature sont identifiés. Ensuite, les différentes approches pour évaluer la réponse des conduites aux mouvements de terrain sont exposées, en soulignant leurs avantages et limites, ainsi que leurs pertinences en contexte d'incertitude. Finalement, les approches probabilistes visant à évaluer la fiabilité des réseaux enterrés sont abordées, en détaillant les sources d'incertitudes prises en compte, les méthodes de propagation d'incertitudes utilisées, les fonctions de défaillance adoptées et les principaux types de sorties de ces travaux. En résumé, cette synthèse bibliographique permet de prendre connaissance des avancées déjà effectuées sur le sujet, tout en identifiant les lacunes à combler.

Mots-clefs Fiabilité, interaction sol-structure, conduites enterrées, incertitudes

I. CONTEXTE DE L'ÉTUDE

L'hydrogène (H₂) a été reconnu pour ses potentialités à devenir une des clés de base d'un système énergétique à faible empreinte carbone. Il a donc suscité un grand intérêt de la part des décideurs politiques et de l'industrie en tant qu'élément central de l'infrastructure future.

Dans sa course vers la neutralité climatique à l'horizon 2050, l'Union Européenne semble ainsi miser sur l'hydrogène vert, comme source d'énergie à fort potentiel. Il en résulte la nécessité de développer des solutions de transport sécurisé de l'hydrogène. Le gouvernement français semble prioriser la réutilisation des réseaux gaz pour le transport et le stockage d'H₂ (GRT gaz, 2019). Ceci engendre une évolution des caractéristiques mécaniques des réseaux, et en conséquence, augmente leur vulnérabilité vis-à-vis des sollicitations externes. Il a été démontré que l'acier de pipelines pouvait perdre jusqu'à 40% de sa ductilité après une exposition à 100 bars de H₂ (Boots *et al.* 2021). La problématique de la vulnérabilité des réseaux est encore renforcée par le changement climatique et l'évolution des activités humaines associées à la transition écologique.

Dans une démarche de gestion de risques, il est essentiel d'évaluer et de cartographier le niveau de risque de ces réseaux, afin de distinguer les tronçons ayant un niveau de risque acceptable de ceux nécessitant une réduction de leur vulnérabilité. Dans le cadre d'une thèse démarrée récemment (Octobre 2022), on s'intéresse à l'évaluation de la vulnérabilité des réseaux exposés à différentes

typologies de mouvements de terrains, en visant le développement de courbes de fragilité permettant d'évaluer les probabilités de défaillance des réseaux en fonction de leurs caractéristiques, des propriétés mécaniques du terrain environnant et de la nature des mouvements de terrain. Le but est d'aboutir à un modèle fiable permettant de mener des études de sensibilité et d'évaluer l'influence des incertitudes sur les résultats.

L'évaluation des conséquences des mouvements de terrains sur les réseaux enterrés nécessite la prise en compte des phénomènes d'interaction sol-structure (sol-conduite). Ces phénomènes ont été étudiés dans la littérature selon différentes approches (modélisations analytiques, numériques et physiques). Cette synthèse expose donc les différentes approches utilisées pour évaluer la réponse des réseaux aux différents types de mouvements de terrain qui peuvent affecter ces derniers (figure 1), en soulignant leurs avantages et limites, ainsi que leurs pertinences en contexte d'incertitude. Ensuite, les approches probabilistes visant à évaluer la fiabilité des réseaux sont abordées, en détaillant les sources d'incertitudes prises en compte, les méthodes de propagation d'incertitudes utilisées, les fonctions de défaillance adoptées et les principaux types de sorties.

Ce travail servira de référence pour mettre en valeur l'originalité de la recherche envisagée dans la thèse déjà évoquée, en prenant en compte les lacunes actuelles de la littérature sur ce sujet.

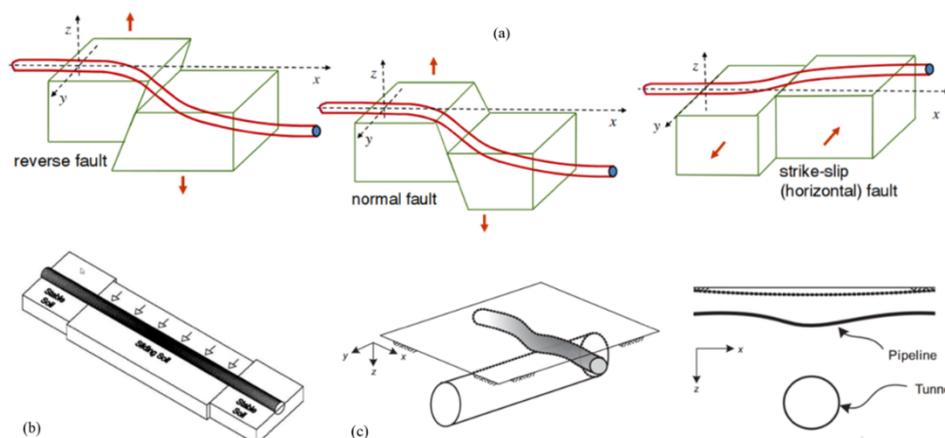


FIGURE 1. Représentation schématique de la configuration des conduites enterrées traversant : (a) Différents types de failles (Karamanos *et al.* 2014), (b) glissement de terrain (Casamichele *et al.* 2004) et (c) creusement d'un tunnel (Klar *et al.* 2005)

II. MOUVEMENTS DE TERRAIN AFFECTANT LES CONDUITES ENTERRÉES

Les mouvements de terrain représentent un risque majeur pour l'environnement bâti, avec des implications pour les infrastructures et la sécurité humaine. Ces mouvements peuvent être causés par des facteurs naturels tels que le mouvement des failles, la liquéfaction du sol, les glissements de terrain et le retrait-gonflement des sols argileux, ainsi que par des activités humaines telles que le creusement de tunnels, l'exploitation minière souterraine et le pompage excessif des eaux souterraines. Ces mouvements peuvent affecter les zones urbaines et non-urbaines.

Les sources de mouvements de terrain les plus étudiés dans la littérature adressant le comportement des réseaux enterrés sont : le mouvement des failles, les glissements de terrain et les affaissements liés aux creusements des tunnels, à l'exploitation minière et à la baisse de la nappe phréatique. De nombreuses études ont examiné le comportement et évalué la réponse des conduites

enterrées dans ces conditions. Ces derniers seront présentées et discutées plus profondément dans les sections suivantes. La figure 1 fournit une représentation schématique de la configuration des conduites enterrées traversant différents types de mouvements de terrain.

III. MODÉLISATION ANALYTIQUE

L'étude du comportement des conduites enterrées peut être réalisée à travers une modélisation analytique basée sur une approche théorique. Au cours des dernières années, la littérature sur la modélisation analytique des conduites enterrées exposées à des mouvements de terrain a connu une croissance significative. Ces approches traitent le système sol-conduite comme un modèle poutre-ressort. Le sol est modélisé par des éléments de rigidité de type Winkler (Hu *et al.* 2022 ; Xu *et al.* 2020) ou Pasternak (Yang et Li 2021) qui prend en compte la déformation de cisaillement dans le sol en considérant une interaction entre les ressorts. La conduite est modélisée par une poutre. Le tableau 1 présente quelques études développant une approche analytique, en fonction du type de mouvement de sol étudié et des grandeurs d'intérêt calculés.

TABLEAU 1. Catégorisation générale de quelques recherches abordant la modélisation analytique des conduites enterrées exposées à des mouvements de terrain

Type de mouvement	Grandeur d'intérêt calculée	Références
Mouvement de failles	Moment de flexion et la déformation en flexion de la conduite	Hu <i>et al.</i> 2022
	La déflexion et les déformations de la conduite	Sarvanis et karamanos 2017
	Les déformations axiales et en flexion dans la conduite	Karamitos <i>et al.</i> 2011
		Trifonov and cherniy 2010
	Moment de flexion de la conduite	Karamitos <i>et al.</i> 2007
Affaissement minier	Contrainte normale associée à la flexion dans la section de la conduite	Xu <i>et al.</i> 2020
Tassement et soulèvement de la surface du sol	Les forces et les déformations internes de la conduite	Kouretzis <i>et al.</i> 2015

La comparaison de ces études permet d'identifier les principales limites suivantes :

- Approches limitées à une modélisation plane, ne permettant pas de prendre en compte facilement l'effet de la 3^e dimension ;
- Incapacité à prédire les déformations locales (ovalisation par exemple) de la section transversale due à la nature unidimensionnelle de la modélisation ;
- Absence de prise en compte de l'impact du flambage local sur le comportement du système ;
- La pression interne, les effets thermiques, et les charges externes (surcharge du terrain par exemple) sont souvent négligées.

En conséquence, bien que les expressions analytiques de la réponse des pipelines soient pratiques pour une approche probabiliste nécessitant un grand nombre de calculs et la réalisation d'analyses de sensibilité, il convient de souligner que les hypothèses simplificatrices adoptées peuvent être inadaptées pour une utilisation opérationnelle et des scénarios pratiques.

IV. MODÉLISATION NUMÉRIQUE

Un nombre significatif d'études ont été menées en utilisant des modèles numériques à éléments finis, bien plus que pour les approches analytiques ou expérimentales. Les résultats de ces approches sont de plus en plus précis, grâce aux techniques d'analyse numérique actuellement disponibles, qui permettent de résoudre ce problème de manière rigoureuse tout en minimisant les approximations et les hypothèses simplificatrices nécessaires. Les modèles numériques peuvent être 3D en modélisant la conduite par des éléments de plaques et le sol par des éléments volumiques (Dey et Tesfamariam 2022, Demirci *et al.* 2021, Luo *et al.* 2015, Vazouras *et al.* 2015). Certains modèles 2D reproduisent une configuration similaire aux modèles analytiques avec une poutre pour la conduite et des ressorts pour modéliser le sol (Ni *et al.* 2018, Wang *et al.* 2011). Les modèles numériques permettent de dépasser les limites identifiées pour les modèles analytiques. Bien que la modélisation numérique puisse fournir des prédictions plus validées de la réponse de conduites enterrées (ex. validation par Demirci *et al.* 2021), elle est moins adaptée aux approches probabilistes qui nécessitent un grand nombre de calculs en raison du temps de calcul associé.

V. MODÉLISATION PHYSIQUE

Outre les méthodes analytiques et numériques mentionnées, de nombreuses recherches expérimentales ont été menées au cours des deux dernières décennies pour étudier les performances des conduites enterrées soumises à des mouvements de terrain. Ces travaux correspondent à des modèles réduits dont le facteur d'échelle n'est pas toujours explicitement renseigné. Le tableau 2 synthétise les travaux réalisés en fonction du type de mouvement étudié et du dispositif utilisé. Ce type d'approche vient plutôt valider les modèles numériques et/ou analytiques sans apporter vraiment d'intérêt direct pour les calculs probabilistes vu l'impossibilité de répéter une expérience physique un très grand nombre de fois.

TABLEAU 2. Description générale de quelques recherches abordant la modélisation physique

Type de mouvement	Dispositif	Références
Mouvement de failles	Split-box	Demirci <i>et al.</i> 2021
		Vatani Oskouei <i>et al.</i> 2019
	Split-box avec table vibrante	Sim <i>et al.</i> 2012
Affaissement du sol	Sacs d'eau enterrés sous la conduite	Li <i>et al.</i> 2022
	Système de trappes contrôlées	Costa <i>et al.</i> 2021
	Dispositif à plaques mobiles	Zhou <i>et al.</i> 2019
Glissements de terrain	Centrifugeuse géotechnique	Zhang and Askarinejad 2019
		Oliveira <i>et al.</i> 2017
	Dispositif à câble de tirage	Almahakeri <i>et al.</i> 2014

VI. MÉTA-MODÈLES

Comme l'approche probabiliste implique un grand nombre d'évaluations des sorties de modèles, il peut être pratique d'utiliser des expressions établies permettant des calculs rapides des réponses des conduites (moment, courbure, etc.) lorsque ces derniers sont soumises à un mouvement de terrain. Ces expressions, également appelées méta-modèles, sont établis en extrapolant les sorties des modèles de base afin de pouvoir générer des sorties plus rapidement pour des valeurs des paramètres d'entrée quelconques. Le modèle de base peut être un modèle numérique, ou un modèle analytique dont la résolution et/ou l'établissement peuvent s'avérer coûteux en termes de temps. Par ailleurs, un métamodèle offre l'avantage de pouvoir être utilisé ultérieurement très simplement, sans nécessité d'avoir accès au modèle de base dont la diffusion peut être limitée.

Les méta-modèles développés dans la littérature sur l'évaluation de la réponse des conduites enterrés sont de type « surface de réponses » et reposent sur des méthodes de régression non linéaires selon une stratégie des moindres carrés afin d'ajuster des courbes aux sorties d'intérêts provenant du modèle de base. Le tableau 3 répertorie les approches de modélisation adoptée dans le modèle de base, le nombre d'appels N de ce dernier, ainsi que les modèles d'interactions sol-tube utilisés dans les modèles de base sur lesquels reposent les méta-modèles développés. Les méta-modèles présentés ont étudié la réponse normalisée d'une conduite en divisant la valeur d'intérêt (moment ou courbure) obtenue en tenant compte de l'interaction sol-structure, par la réponse de la même conduite subissant un déplacement équivalent à celui du sol (i.e. sans prise en compte de l'interaction sol-structure).

TABLEAU 3. Description des méta-modèles trouvés dans la littérature

Approche	Modèle ISS	N	Méta-modèle	Références
Analytique 1D	Poutre-ressort (Winkler)	10000	Moments de flexion maximaux normalisés de la conduite en fonction de la rigidité relative conduite-sol	Wols et van Thienen 2014
Analytique 1D	Poutre-ressort (Winkler)	2000	Moments de flexion maximaux normalisés de la conduite et rotation des joints en fonction de la rigidité relative conduite-sol	Wols et van Thienen 2015
Numérique EF 2D	Poutre-ressort (Winkler)	900	Rapport courbure maximale de la conduite/courbure maximale du sol en fonction de la rigidité relative conduite-sol	Wang <i>et al.</i> 2011
Numérique EF 3D	Plaque et sol continu	18	Déformation maximale de la conduite en fonction des caractéristiques géométriques, mécaniques et du déplacement	Shadab Far <i>et al.</i> 2019

Ces méta-modèles présentent des courbes ayant une allure similaire faisant intervenir un paramètre de rigidité relative entre la conduite et le sol (figure 2). En d'autres termes, si la rigidité relative entre la conduite et le sol est faible, cela signifie que la conduite est souple par rapport à un sol rigide. Dans ce cas, le déplacement du sol sera entièrement transmis à la conduite, ce qui se traduira par une réponse normalisée égale à 1 ; ce qui est équivalent à considérer que les phénomènes d'interaction sol-structure n'ont pas d'influence significative. En revanche, pour des valeurs élevées de rigidité relative, on sera dans le cas d'une conduite rigide dans un sol meuble, ce qui rend difficile

la transmission des déplacements du sol à la conduite, se traduisant par une réponse normalisée presque nulle. Dans le méta-modèle développé par Wols et van Thienen 2014, une relation entre le paramètre de rigidité R_3 et le moment de flexion maximal normalisé est ajustée par l'expression empirique suivante: $M_{norm} = \frac{1+a_1R_3^{b_1}}{1+a_2R_3^{b_2}}$ (1) ; où a_1 , a_2 , b_1 et b_2 sont des paramètres d'ajustement.

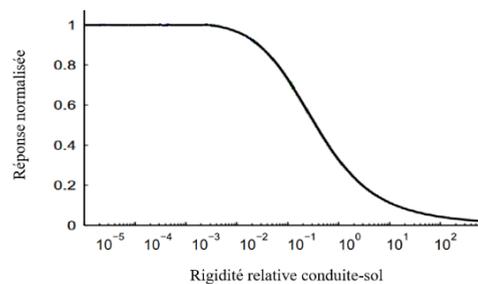


FIGURE 2. Représentation de l'allure des méta-modèles établis dans la littérature

La validité du méta-modèle est évidemment dépendante de la validité du modèle de base utilisé, du nombre d'appels N de ce dernier, et de la formulation mathématique du méta-modèle lui-même. Le seul méta-modèle reposant sur des modèles numériques tridimensionnels ne s'appuie que sur 18 simulations (Shadab Far *et al.* 2019) ; tandis que les autres ont pris en compte un nombre relativement élevé d'appels pour couvrir une large gamme de configurations de la zone d'étude.

Étant données les limites importantes de la modélisation analytique liées aux hypothèses simplificatrices utilisées, la conversion des modèles numériques en équations algébriques facilitera la réalisation de calculs probabilistes basés sur des hypothèses moins simplificatrices.

VII. ANALYSE FIABILISTE DES CONDUITES ENTERRÉES

Il y a relativement peu d'études disponibles dans la littérature portant sur l'évaluation de la fiabilité des réseaux enterrés exposés aux mouvements de terrain. Bien que certaines études probabilistes utilisant des courbes de fragilité puissent être trouvées dans la littérature, celles-ci se concentrent plutôt sur les réponses sismiques des conduites enterrées (Jahangiri et Shakib 2020, Lee *et al.* 2016), et non pas sur les mouvements de terrain que nous cherchons à explorer. Cette section expose donc les différentes études trouvées qui mettent en œuvre une approche fiabiliste en décrivant les sources d'incertitude prises en compte, les fonctions de défaillance adoptées, les méthodes de propagation d'incertitudes utilisées, ainsi que la forme des résultats.

A. Incertitudes prises en compte

Les principales sources d'incertitudes prises en compte sont les caractéristiques géométriques et mécaniques de la conduite, les caractéristiques mécaniques du sol et les paramètres de mouvement du sol (forme, intensité, etc.). Dans certaines études comme celle de Wols et van Thienen 2014, les paramètres d'ajustement définissant le méta-modèle (équation (1)) ont également été considérés comme des variables incertaines. Afin de prendre en compte l'incertitude associée à ces paramètres, les distributions statistiques utilisées sont généralement des lois normales ou log-normales. Les variables incertaines définissant le sol ont souvent été associées à une variance plus élevée, en raison de la difficulté à évaluer ces paramètres (Wols et van Thienen en 2014 et 2015). Il convient de

souligner que la variabilité spatiale du sol est une source d'incertitude qui semble être rarement abordée dans la littérature traitant de ce sujet.

B. Propagation des incertitudes

La plupart des études se sont appuyées sur la méthode Monte Carlo conventionnelle, qui est assez coûteuse en termes de ressources informatiques. Certaines études ont optimisé leur calcul par la procédure d'Hypercube Latin, ce qui réduit considérablement les coûts de calcul par rapport à la simulation de Monte Carlo. Le tableau 4 expose différentes méthodes de propagation d'incertitudes utilisées dans les recherches trouvées en spécifiant le nombre de paramètres incertains pris en compte dénoté n et le nombre de simulations effectuées dénoté i .

TABLEAU 4. Description des études de fiabilité des réseaux

Propagation des incertitudes	n	i	Références
Monte Carlo	11	10^8	Wols et van Thienen 2014
Monte Carlo	12	10^8	Wols et van Thienen 2015
Hypercube Latin	6	200	Ni et Mangalathu 2018
Hypercube Latin	7	200	Ni <i>et al.</i> 2018

Un point à considérer dans une analyse probabiliste est le nombre de simulation i . En particulier i augmente rapidement pour des faibles probabilités de défaillance P_f . La règle utilisée par Wols et van Thienen 2014 est : $i > 400 (1/P_f - 1)$ afin qu'une marge d'erreur $\pm P_f/10$ corresponde à un intervalle de confiance à 95% de P_f .

C. Fonction de fiabilité

La fonction de fiabilité, désignée par les notations Z ou G , est définie en se fondant sur des critères de défaillance spécifiques. Elle permet d'évaluer la probabilité de défaillance du réseau dans des conditions données, en calculant la probabilité $P(Z < 0)$. Ainsi, pour l'étude menée par Wols et van Thienen en 2014, la fonction de fiabilité adoptée est : $Z = \sigma_f - \sigma_{p,max}$, où σ_f représente la contrainte admissible du matériau de la conduite et $\sigma_{p,max}$ la contrainte maximale dans la conduite. Si $Z < 0$, une défaillance se produit. D'autres études ont également adopté différentes fonctions en se basant sur des critères de défaillance autres que la contrainte maximale, tels que la déformation par flexion maximale (Wang *et al.* 2011) ou la rotation maximale des joints (Wols et van Thienen en 2015) si ceux-ci existent. Il est à noter qu'à ce jour, la littérature ne présente pas de démarche fiabiliste complète couvrant l'ensemble des modes de défaillance à la fois et permettant d'assurer la fiabilité de la conduite face à toute éventualité.

D. Types de sorties

Les études ayant recours à une méthode probabiliste pour évaluer la fiabilité des réseaux ont présenté leurs résultats sous différentes formes. Certains chercheurs ont présenté les résultats par la densité de probabilité de la réponse de la fonction de fiabilité, comme illustré dans la figure 3a de l'étude de Wols et van Thienen en 2014, tandis que d'autres ont choisi de représenter les résultats sous forme de courbes de fragilité comme Ni et Mangalathu 2018 et Ni *et al.* 2018 (figure 3b).

Un autre type de sorties pour l'évaluation de la fiabilité des structures qui peut s'avérer très utile dans notre étude sont les courbes de fragilité par niveau d'endommagement. Cette méthode n'a pas été abordée dans la littérature sur l'évaluation de la vulnérabilité des conduites enterrées exposées à des mouvements de terrain permanents, mais a été utilisée avec succès pour l'évaluation de la vulnérabilité sismique des bâtiments (par exemple, Hemsas et Elachachi 2009) en calculant la répartition des probabilités d'endommagement pour différents niveaux de dommages possibles, en fonction du déplacement spectral maximum S_d (figure 3c). Dans notre étude, établir des courbes similaires permettrait d'évaluer le degré d'endommagement spécifique aux conduites enterrées en fonction des sollicitations étudiées, telles que le déplacement permanent maximal S_{max} . Cette approche serait utile pour cartographier le niveau de risque des réseaux de gaz enterrés en fonction du contexte dans lequel elles se trouvent, afin de distinguer les tronçons à risque acceptable de ceux nécessitant une réduction de leur vulnérabilité avant leur utilisation pour le transport d'hydrogène.

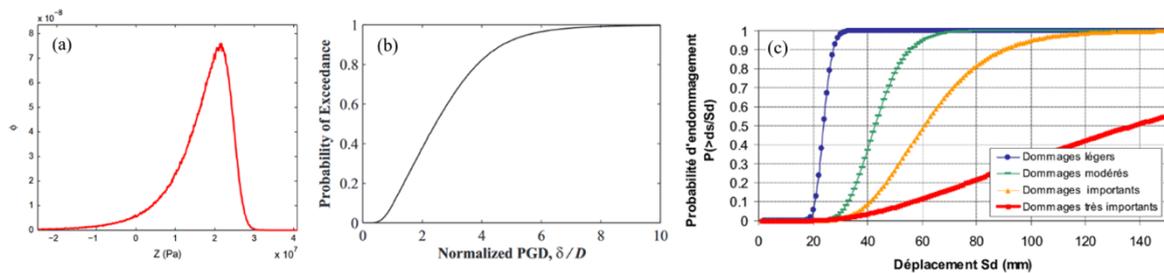


FIGURE 3. Présentation des résultats de certaines études par : (a) densité de probabilité (Wols et van Thienen en 2014) ; (b) courbes de fragilité (Ni *et al.* 2018) ; et (c) courbes de fragilité par niveau d'endommagement (Hemsas et Elachachi 2009)

VIII. CONCLUSION

Les conclusions les plus significatives de cette synthèse bibliographique sont les suivantes :

- La majorité des études fiabilistes pour l'étude de l'interaction sol-tube enterré s'appuie sur des modèles analytiques simples. Aucun méta-modèle s'appuyant sur un nombre significatif de calculs n'a été développé à partir de modèle numérique 3D comme modèle de base.
- L'influence de la variabilité spatiale du sol sur la réponse des conduites enterrées exposées aux mouvements de terrain semble être rarement traitée dans la littérature, alors qu'elle peut affecter les résultats.
- La littérature ne présente pas de démarche fiabiliste complète couvrant l'ensemble des modes de défaillance en même temps.

RÉFÉRENCES

Almahakeri, M., Fam, A., Moore, I.D., 2014. Experimental Investigation of Longitudinal Bending of Buried Steel Pipes Pulled through Dense Sand. *J. Pipeline Syst. Eng. Pract.* 5, 04013014. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)PS.1949-1204.0000141](https://doi.org/10.1061/(ASCE)PS.1949-1204.0000141)

Boot, T., Riemslag, T., Reinton, E., Liu, P., Walters, C.L., Popovich, V., 2021. Assessing the Susceptibility of Existing Pipelines to Hydrogen Embrittlement, in: *The Minerals, Metals & Materials Society (Ed.), TMS 2021 150th Annual Meeting & Exhibition Supplemental Proceedings*,

The Minerals, Metals & Materials Series. Springer International Publishing, Cham, pp. 722–729. https://doi.org/10.1007/978-3-030-65261-6_65

Casamichele, P., Maugeri, M., Motta, E., 2004. Numerical analysis of buried pipes subjected to lateral soil movements. *Risk Analysis* IV

Costa, Y.D.J., Zornberg, J.G., Costa, C.M.L., 2021. Physical modeling of buried PVC pipes overlying localized ground subsidence. *Acta Geotech.* 16, 807–825. <https://doi.org/10.1007/s11440-020-01058-9>

Demirci, H.E., Karaman, M., Bhattacharya, S., 2021. Behaviour of buried continuous pipelines crossing strike-slip faults: Experimental and numerical study. *Journal of Natural Gas Science and Engineering* 92, 103980. <https://doi.org/10.1016/j.jngse.2021.103980>

Dey, S., Tesfamariam, S., 2022. Probabilistic Seismic Risk Analysis of Buried Pipelines Due to Permanent Ground Deformation for Victoria, BC. *Geotechnics* 2, 731–753. <https://doi.org/10.3390/geotechnics2030035>

Hemsas, M., Elachachi, S.M., 2009. Vulnérabilité sismique des structures quasi-symétriques à murs porteurs en b.a et méthodes de capacité spectrale.

Hu, Z., Ren, X., Wang, Q., Wang, R., Pan, R., 2022. Analytical method for the mechanical response of buried pipeline under the action of strike-slip faulting. *Underground Space* 7, 268–277. <https://doi.org/10.1016/j.undsp.2021.08.003>

Karamanos, S.A., Keil, B., Card, R.J., 2014. Seismic Design of Buried Steel Water Pipelines, in: *Pipelines 2014*. Presented at the Pipelines 2014, American Society of Civil Engineers, Portland, Oregon, pp. 1005–1019. <https://doi.org/10.1061/9780784413692.091>

Karamitros, D.K., Bouckovalas, G.D., Kouretzis, G.P., 2007. Stress analysis of buried steel pipelines at strike-slip fault crossings. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 27, 200–211. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2006.08.001>

Karamitros, D.K., Bouckovalas, G.D., Kouretzis, G.P., Gkesouli, V., 2011. An analytical method for strength verification of buried steel pipelines at normal fault crossings. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 31, 1452–1464. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2011.05.012>

Klar, A., Vorster, T.E.B., Soga, K., Mair, R.J., 2005. Soil–pipe interaction due to tunnelling: comparison between Winkler and elastic continuum solutions. *Géotechnique* 55, 461–466. <https://doi.org/10.1680/geot.2005.55.6.461>

Kouretzis, G.P., Karamitros, D.K., Sloan, S.W., 2015. Analysis of buried pipelines subjected to ground surface settlement and heave. *Can. Geotech. J.* 52, 1058–1071. <https://doi.org/10.1139/cgj-2014-0332>

Li, H.-J., Zhu, H.-H., Wu, H.-Y., Zhu, B., Shi, B., 2022. Experimental investigation on pipe-soil interaction due to ground subsidence via high-resolution fiber optic sensing. *Tunnelling and Underground Space Technology* 127, 104586. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2022.104586>

Luo, X., Lu, S., Shi, J., Li, X., Zheng, J., 2015. Numerical simulation of strength failure of buried polyethylene pipe under foundation settlement. *Engineering Failure Analysis* 48, 144–152. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2014.11.014>

Ni, P., Mangalathu, S., Yi, Y., 2018. Fragility analysis of continuous pipelines subjected to transverse permanent ground deformation. *Soils and Foundations* 58, 1400–1413. <https://doi.org/10.1016/j.sandf.2018.08.002>

Ni, P., Mangalathu, S., 2018. Fragility analysis of gray iron pipelines subjected to tunneling induced ground settlement. *Tunnelling and Underground Space Technology* 76, 133–144. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2018.03.014>

Oliveira, J.R.M.S., Rammah, K.I., Trejo, P.C., Almeida, M.S.S., Almeida, M.C.F., 2017. Modelling of a pipeline subjected to soil mass movements. *International Journal of Physical Modelling in Geotechnics* 17, 246–256. <https://doi.org/10.1680/jphmg.15.00059>

Sarvanis, G.C., Karamanos, S.A., 2017. Analytical model for the strain analysis of continuous buried pipelines in geohazard areas. *Engineering Structures* 152, 57–69. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2017.08.060>

Shadab Far, M., Hassani, N., Muho, E.V., 2019. Empirical expressions for the maximum induced strain on buried steel pipelines crossing strike-slip faults. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 116, 490–494. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2018.10.037>

Sim, W.W., Towhata, I., Yamada, S., 2012. One-g shaking-table experiments on buried pipelines crossing a strike-slip fault. *Géotechnique* 62, 1067–1079. <https://doi.org/10.1680/geot.10.P.142>

Trifonov, O.V., Cherniy, V.P., 2010. A semi-analytical approach to a nonlinear stress–strain analysis of buried steel pipelines crossing active faults. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 30, 1298–1308. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2010.06.002>

Vatani Oskouei, A., Tamjidi, A., Pourshabani, P., 2019. Effects of burial depth in the behavior of buried steel pipelines subjected to strike-slip fault. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 123, 252–264. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2019.04.031>

Vazouras, P., Dakoulas, P., Karamanos, S.A., 2015. Pipe–soil interaction and pipeline performance under strike–slip fault movements. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 72, 48–65. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2015.01.014>

Wang, Y., Shi, J., Ng, C.W.W., 2011. Numerical modeling of tunneling effect on buried pipelines. *Can. Geotech. J.* 48, 1125–1137. <https://doi.org/10.1139/t11-024>

Wols, B.A., van Thienen, P., 2015. Modelling the effect of climate change induced soil settling on jointed drinking water distribution pipes. *Computers and Geotechnics* 70, 106–115. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2015.07.007>

Wols, B.A., van Thienen, P., 2014. Modelling the effect of climate change induced soil settling on drinking water distribution pipes. *Computers and Geotechnics* 55, 240–247. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2013.09.003>

Xu, X., He, K., Su, Y., 2020. Safety Analysis of Pipe–Soil Coordination Deformation Affected by Mining Subsidence. *Geotech Geol Eng* 38, 2187–2198. <https://doi.org/10.1007/s10706-019-01156-w>

Zhang, W., Askarinejad, A., 2019. Behaviour of buried pipes in unstable sandy slopes. *Landslides* 16, 283–293. <https://doi.org/10.1007/s10346-018-1066-1>

Zhou, M., Wang, F., Du, Y.-J., Liu, M.D., 2019. Laboratory evaluation of buried high-density polyethylene pipes subjected to localized ground subsidence. *Acta Geotech.* 14, 1081–1099. <https://doi.org/10.1007/s11440-018-0698-6>