

Fiabilité des réseaux de gaz enterrés exposés aux affaissements de terrain : Elaboration d'un méta-modèle et analyse d'incertitudes

Mariam JOUNDI¹, Rasool MEHDIZADEH¹, Olivier DECK¹

¹GeoRessources Laboratory, CNRS, CREGU, Ecole des Mines de Nancy, Université de Lorraine, Nancy, France, mariam.joundi@univ-lorraine.fr

RESUME Face à l'urgence climatique, l'Union Européenne vise la neutralité carbone d'ici 2050, positionnant l'hydrogène vert comme un levier essentiel de cette transition énergétique. La reconversion des infrastructures gazières existantes pour le transport de l'hydrogène est une piste privilégiée, en accord avec les stratégies européenne et nationale (GRTgaz, 2019; European Hydrogen Backbone, 2020). Toutefois, cette transformation modifie les propriétés mécaniques des réseaux, les rendant plus sensibles aux sollicitations externes telles que les affaissements de terrain. Dans ce contexte, cette étude propose un méta-modèle fondé sur une modélisation numérique 3D afin d'évaluer la transmission des affaissements de terrains aux pipelines. Une analyse paramétrique numérique, reposant sur 700 simulations par éléments finis, explore diverses combinaisons de propriétés mécaniques du sol, de caractéristiques géométriques des canalisations et de profils de tassement. Les résultats sont synthétisés sous forme d'une courbe reliant la courbure relative à un coefficient de rigidité relative du système sol-pipeline. Ce modèle permettra ensuite d'intégrer la propagation des incertitudes et de développer des courbes de vulnérabilité en s'appuyant sur des simulations Monte Carlo, offrant ainsi une évaluation plus efficace de la fiabilité des réseaux enterrés face aux aléas.

Mots-clefs Fiabilité, Pipelines enterrés, Hydrogène, Modélisation numérique, Méta-modèle.

I. INTRODUCTION

La transition vers des sources d'énergie à faible empreinte carbone, telles que l'hydrogène vert, constitue un levier central des stratégies d'atténuation du changement climatique en Europe (GRTgaz, 2019; European Hydrogen Backbone, 2020). Toutefois, cette transition soulève des défis majeurs en matière de fiabilité des infrastructures existantes, notamment les réseaux de transport de gaz, qui nécessitent des adaptations ou des renforcements pour assurer l'acheminement de nouveaux types de carburants (Boots *et al.*, 2021). Parmi les contraintes identifiées, les affaissements de terrain représentent une menace significative, étant transmis, partiellement ou totalement, aux conduites de gaz et susceptibles d'entraîner des défaillances structurales critiques.

Dans ce cadre, cette étude développe un méta-modèle fondé sur une modélisation numérique tridimensionnelle afin d'évaluer l'impact des affaissements de terrain sur les réseaux de gaz enterrés. Le modèle développé permet d'évaluer la transmission des affaissements du sol aux conduites de gaz en fonction de la rigidité relative du système sol-structure. Cette approche se

distingue par son caractère tridimensionnel, offrant une vision plus détaillée par rapport aux méta-modèles existants, majoritairement basés sur des formulations analytiques ou des modèles numériques simplifiés (Joundi *et al.*, 2023).

Une analyse paramétrique numérique, intégrant 700 simulations par éléments finis, a été conduite pour explorer une large gamme de propriétés mécaniques du sol, de configurations géométriques du pipeline et de profils de tassement, permettant ainsi une compréhension approfondie des interactions sol-conduite. Ces résultats ont permis de construire une courbe caractéristique reliant la courbure relative des pipelines à un coefficient de rigidité relative du système sol-pipeline, établissant ainsi une base robuste pour des évaluations probabilistes ultérieures.

II. MODELE NUMERIQUE DE BASE

A. Objectif du modèle numérique

Le modèle numérique, établi sur PLAXIS, vise à représenter fidèlement les interactions sol-structure, en reproduisant les mouvements en champ libre et la transmission des déformations à la conduite. Il constitue la base du développement du méta-modèle. Contrairement aux approches 2D, qui simplifient le problème à une section longitudinale, la modélisation 3D permet une meilleure prise en compte de la géométrie et des interactions. Bien que plus rapides, les modèles 2D ne capturent pas avec précision les réponses structurales des pipelines, notamment l'ovalisation et le flambement, essentiels pour évaluer leur fiabilité. L'approche 3D adoptée intègre ces effets tridimensionnels critiques. Le modèle numérique est validé à partir d'essais physiques.

B. Configuration et géométrie du modèle

Le modèle numérique intègre deux couches de sol avec des propriétés distinctes: une couche supérieure élasto-plastique de type Mohr-Coulomb pour simuler les comportements du sol, et une couche inférieure parfaitement élastique pour stabiliser le modèle et réduire les points de plasticité lors de la création de l'affaissement. La conduite est modélisée avec des éléments coques et est enterrée à une profondeur H sous la surface du sol (Figure 1). Les dimensions du domaine ont été optimisées afin de minimiser les effets de bord et garantir une bonne représentativité des interactions sol-structure. Le coût numérique des simulations 3D est significatif, mais reste maîtrisé : une simulation dure en moyenne 90 minutes, offrant un compromis acceptable entre précision et temps de calcul.

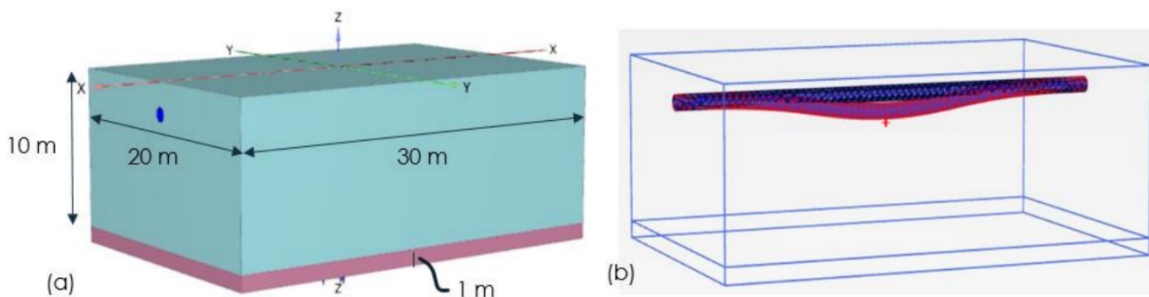


FIGURE 1. (a) Schéma de la géométrie du modèle numérique tridimensionnel ; (b) Configuration initiale et déformée de la conduite soumise à un affaissement.

C. Création de l'affaissement

L'étude de la transmission des affaissements commence par la simulation de ces derniers. Les affaissements dus au creusement de tunnels, aux effondrements miniers, ou aux variations de la nappe phréatique, sont généralement représentés par une courbe gaussienne. Le profil de l'affaissement est caractérisé par l'affaissement maximal $S_{0,max}$ et la longueur de transition i_0 , qui délimite la distance entre le point d'affaissement maximal et le point d'inflexion (Figure 2).

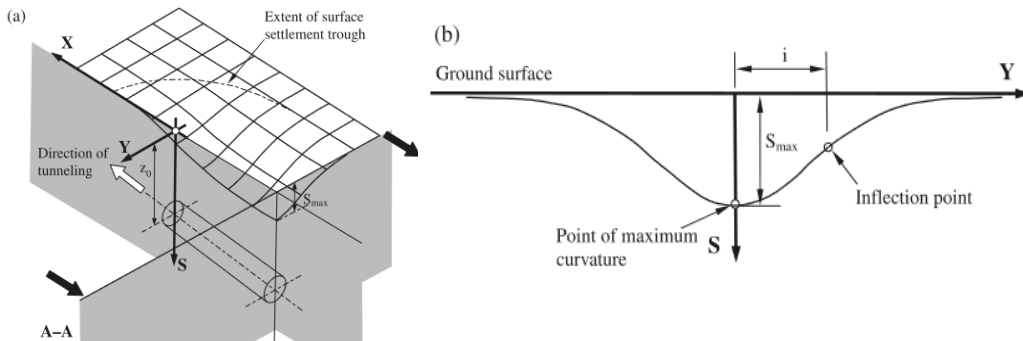


FIGURE 2. Affaissement du sol induit par le creusement d'un tunnel : (a) vue tridimensionnelle ; (b) section transversale A-A (modifiée d'après Attewell et al. 1986)

III. DEVELOPPEMENT DU META-MODELE

A. Plan d'expérience numérique

Le développement du méta-modèle repose sur un plan d'expérience numérique intégrant environ 700 combinaisons pour analyser l'influence des propriétés mécaniques du sol, des caractéristiques géométriques des pipelines et des profils d'affaissement sur la transmission des mouvements.

Les simulations sont basées sur trois paramètres mécaniques du sol (module d'élasticité E_s , angle de frottement interne ϕ , et poids volumique γ), définissant 18 configurations distinctes de sol sableux, tous considérés avec une cohésion nulle (Tableau 1). Celles-ci sont combinées à six configurations de pipeline, représentatives des dimensions standards des réseaux de transport de gaz en Europe (Tableau 2), avec un diamètre D et une épaisseur correspondante t . Tous les pipelines sont placés à une profondeur fixe de $H = 1.5$ m et modélisés en acier avec un module de Young de 210 GPa, conformément aux normes industrielles.

L'affaissement du sol est décrit par une distribution gaussienne caractérisée par une amplitude maximale $S_{0,max}$ variant de 5 à 60 cm et une longueur de transition i_0 comprise entre 1 et 3 m. Contrairement aux approches antérieures (Wang et al., 2011 ; Wols & van Thienen, 2014, 2015), qui considéraient uniquement trois classes de sols prédéfinies, cette méthodologie introduit une variabilité plus représentative des conditions réelles.

TABLEAU 1. Propriétés mécaniques des sols considérés dans l'analyse paramétrique.

E_s (MPa)	30	60	90
ϕ (°)	25	30	35
γ (kN/m ³)	17	21	

TABLEAU 2. Caractéristiques géométriques de conduites considérées dans l'analyse

D (cm)	20	30	40	50	60	90
t (mm)	7	8	9	10	11	14

B. Paramètres clés du méta-modèle

Le méta-modèle développé repose sur deux paramètres fondamentaux permettant de quantifier la transmission des déformations du sol aux pipelines.

- **Coefficient de rigidité relative R^***

Le coefficient de rigidité relative R^* est le paramètre central du méta-modèle. Il constitue une base essentielle pour l'analyse de la transmission des mouvements du sol vers la conduite, un enjeu central dans les problématiques d'interaction sol-structure. R^* est défini par l'équation (1):

$$R^* = \left(\frac{E_p I_p}{[E_s + \gamma H (1 + \tan \phi)^2] \cdot i_0^4} \right) \cdot \left(\frac{S_{0,max}}{i_0} \right)^{0.8} \quad (1)$$

Où E_p et I_p sont respectivement le module d'élasticité et le moment d'inertie du pipeline. Les autres termes correspondent aux paramètres du sol et de l'affaissement, déjà définis précédemment.

Une faible valeur de R^* (pipeline relativement souple dans un sol rigide) favorise la transmission des déformations du sol à la conduite, tandis qu'une valeur élevée (pipeline rigide dans un sol meuble) limite cette transmission. Ainsi, ce paramètre permet d'anticiper le comportement des conduites enterrées exposées aux affaissements du sol.

L'expression de R^* a été optimisée à partir des formulations existantes (Wang *et al.*, 2011 ; Wols & van Thienen, 2014, 2015) en intégrant des paramètres supplémentaires liés aux caractéristiques géotechniques et en ajustant les exposants afin de réduire la dispersion des résultats et améliorer la corrélation entre eux. Cette optimisation a été réalisée manuellement en modifiant les exposants et en introduisant les effets de ϕ et γ , dans le but d'augmenter le coefficient de détermination R^2 de la relation entre la courbure relative et R^* , établie à partir d'un ensemble de 700 résultats numériques obtenus sous PLAXIS.

- **Courbure relative $K_{p,max}/K_{g,max}$**

Le rapport $K_{p,max}/K_{g,max}$ caractérise la courbure relative des conduites par rapport à celle du sol en champ libre. $K_{p,max}$ correspond à la courbure maximale observée dans le pipeline, tandis que $K_{g,max}$ représente la courbure du sol en l'absence de conduite. Ces valeurs sont obtenues à partir du calcul des dérivées secondes des profils d'affaissement issus des simulations numériques sous PLAXIS.

Ce paramètre constitue une sortie clé du méta-modèle, permettant d'évaluer la réponse du pipeline (courbure) de manière normalisée par rapport à celle du sol. Une fois établi, ce méta-modèle offre une méthode analytique permettant d'obtenir directement la courbure du pipeline sans nécessiter de simulations numériques, qui sont coûteuses en temps de calcul.

C. Présentation et interprétation du méta-modèle

Le méta-modèle développé établit une relation empirique entre la courbure relative du pipeline et le coefficient de rigidité relative. L'ajustement des résultats issus des simulations par éléments finis a permis de définir une équation de régression non linéaire entre ces deux grandeurs (Figure 3). Cette équation présente un coefficient de détermination satisfaisant (0.8356), témoignant d'une

bonne corrélation entre les résultats numériques et le modèle ajusté. Toutefois, des incertitudes persistent, notamment sur les coefficients de régression, et seront prises en compte dans l'analyse probabiliste de la section suivante. L'équation du méta-modèle est exprimée par l'équation (2) :

$$\frac{K_{p,max}}{K_{g,max}} = \frac{1}{1+a R_*^b}; \text{ avec } a = 277.217 \text{ et } b = 0.67662 \quad (2)$$

L'analyse physique de cette relation met en évidence le rôle déterminant de la rigidité relative dans la transmission des mouvements du sol aux pipelines. Lorsque le pipeline présente une rigidité bien inférieure à celle du sol, il suit étroitement les déformations imposées par l'affaissement, se déformant dans des proportions similaires à celles du sol environnant (courbure relative = 1). À l'opposé, si la rigidité du pipeline est largement supérieure à celle du sol, les effets de l'affaissement sont fortement atténués (courbure relative presque nulle). La dispersion des résultats numériques met en évidence la complexité des interactions sol-structure, qui ne sont pas uniquement régies par la rigidité relative du pipeline et du sol, mais également par de la configuration géométrique et des caractéristiques de l'affaissement. Les intervalles de confiance à 90 % ont également été calculés et sont représentés dans le graphique. Toutefois, des calculs numériques complémentaires sont en cours afin d'enrichir la base de données existante et de compléter la courbe ajustée.

Ce méta-modèle offre ainsi une alternative analytique aux simulations numériques coûteuses, en permettant une estimation rapide de la réponse des pipelines face à un affaissement. Il constitue une base essentielle pour les analyses de fiabilité qui seront développées dans la section suivante.

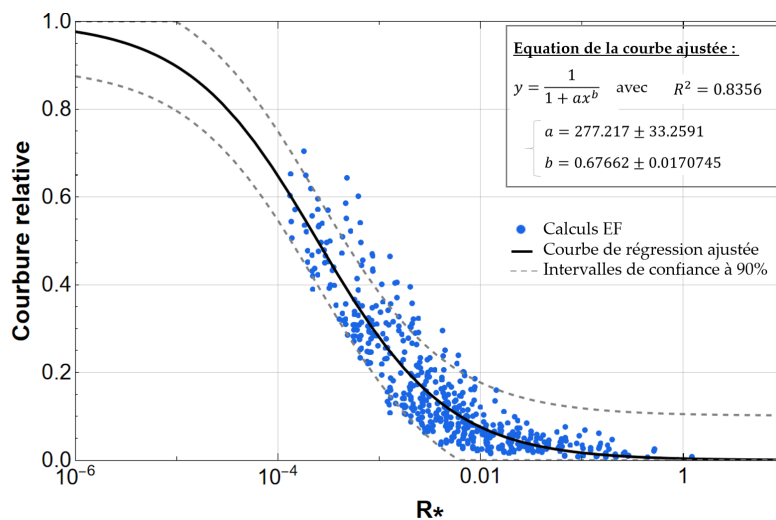


FIGURE 3. Courbe caractéristique de la courbure relative en fonction du coefficient de rigidité relative

IV. ANALYSE PROBABILISTE

A. Propagation des incertitudes

L'analyse probabiliste menée dans cette étude vise à quantifier l'impact des incertitudes liées aux propriétés du pipeline, du sol et des affaissements sur la transmission des déformations. La variabilité des paramètres d'entrée est prise en compte à travers l'attribution de distributions statistiques adaptées à la nature physique de chaque paramètre (Tableau 3), permettant ainsi une représentation réaliste des incertitudes associées. Les paramètres du pipeline suivent une

distribution normale, traduisant des fluctuations symétriques autour des valeurs moyennes observées dans la littérature et les normes de conception. En revanche, pour les propriétés du sol et de l'affaissement, une distribution log-normale est adoptée, avec des valeurs de c_v plus importantes que celles du pipeline, traduisant une plus grande incertitude dans leur estimation. Enfin, les incertitudes sur les coefficients a et b du méta-modèle, résultant de l'ajustement statistique des données numériques, sont propagées dans l'analyse afin de prendre en compte leur influence sur la variabilité des prédictions. Le tableau 3 détaille les distributions attribuées à chaque paramètre, les coefficients de variance C_v ainsi que les valeurs moyennes utilisées dans l'analyse.

TABLEAU 3. Paramètres d'entrée de l'analyse probabiliste : distributions statistiques, coefficients de variance et valeurs moyennes associées.

	Paramètre	Distribution	C_v	Moyenne(s) μ
Pipeline	D	Normale	0.004	{0.2 ; 0.3 ; 0.8} m
	t		0.04	{0.007; 0.012} m
	H		0.1	1.5 m
	E_p		0.04	2.1×10^{11} Pa
Sol	E_s	Log-normale	0.3	{ 3×10^7 ; 6×10^7 ; 9×10^7 } Pa
	ϕ		0.2	30°
	γ		0.2	21 kN/m ³
Affaissement	$S_{0, \max}$	Log-normale	0.1	Variables
	i_0		0.1	Variables
Contrainte admissible	σ_f	Normale	0.08	2.4×10^8 Pa
Méta-modèle	a	Normale	0.12	277.217
	b		0.025	0.67662

B. Fonction de fiabilité

La fonction de fiabilité Z permet d'évaluer la probabilité de défaillance du pipeline en comparant la contrainte maximale subie par la conduite à sa contrainte admissible. Une défaillance se produit lorsque la contrainte maximale dépasse la résistance du matériau, soit lorsque Z devient négative. La formulation adoptée dans cette étude est identique à celle proposée par Wols et van Thienen (2014) et s'écrit sous la forme de l'équation (3) :

$$Z = \sigma_f - \sigma_{p, \max} \quad (3)$$

Où σ_f représente la contrainte admissible du matériau, ici assimilée à sa limite d'élasticité, et $\sigma_{p, \max}$ la contrainte maximale subie par la conduite. Afin d'établir un lien direct entre cette fonction de fiabilité et le méta-modèle développé, la contrainte maximale est exprimée, selon la relation mécanique classique dérivée de la théorie des poutres soumises à la flexion, en fonction de la courbure maximale $K_{p, \max}$ par l'équation (4):

$$\sigma_{p, \max} = E_p K_{p, \max} \frac{D}{2} \quad (4)$$

En utilisant la relation entre la courbure du pipeline et celle du sol, et en intégrant l'équation du méta-modèle obtenue par ajustement statistique, la contrainte maximale devient :

$$\sigma_{p,max} = E_p \left(\frac{1}{1+a R^{*b}} K_{g,max} \right) \frac{D}{2} \quad (5)$$

Finalement, la fonction de fiabilité peut être représentée par l'équation (6):

$$Z = \sigma_f - E_p \frac{1}{1+a R^{*b}} \frac{S_{0,max}}{i_0^2} \frac{D}{2} \quad (6)$$

Cette formulation permet d'évaluer directement la fiabilité structurelle du pipeline en fonction des paramètres du système, sans recours systématique au modèle numérique.

C. Courbes de vulnérabilité

L'évaluation probabiliste de la défaillance repose sur l'estimation de la probabilité que la fonction de fiabilité (équation (6)) soit négative, indiquant une rupture du pipeline. La probabilité de défaillance est estimée par simulations Monte Carlo, avec 10^6 itérations pour chaque scénario défini par un ensemble de valeurs moyennes des paramètres. À chaque itération, les paramètres sont échantillonnés selon leur distribution statistique autour de leur moyenne, intégrant ainsi leur variabilité. La fonction de fiabilité est ensuite évaluée et la probabilité de défaillance est déterminée comme le rapport du nombre d'occurrences où $Z < 0$ sur le total des simulations. Cette démarche est répétée pour diverses configurations de pipeline et de sol, ainsi que sous différentes sollicitations, afin d'établir des courbes de vulnérabilité. Celles-ci permettent de quantifier l'évolution de la probabilité de défaillance en fonction des paramètres influents et d'identifier les seuils critiques à partir desquels le risque devient significatif.

Les courbes de vulnérabilité présentées en figure 4(a) montrent l'évolution de la probabilité de défaillance en fonction de l'affaissement maximal $S_{0,max}$ pour différentes valeurs du module de Young du sol et du diamètre du pipeline. Les résultats indiquent que la résistance du pipeline est fortement influencée par ces paramètres. De plus, un sol plus rigide entraîne une augmentation de la probabilité de défaillance. Cela s'explique par le fait qu'un sol plus rigide transmet davantage les déformations au pipeline, imposant des sollicitations mécaniques plus importantes. En revanche, les conduites de plus grand diamètre présentent une vulnérabilité moindre, leur rigidité accrue réduisant la transmission des affaissements.

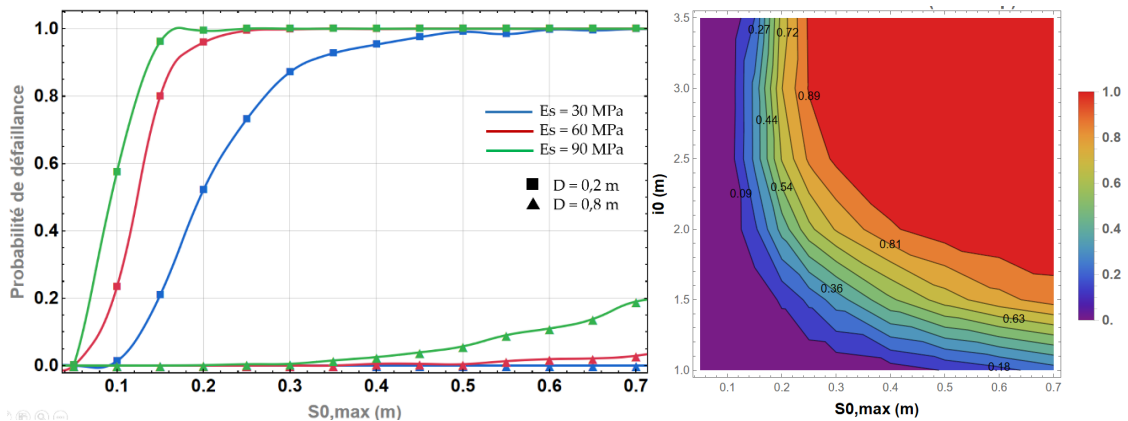


FIGURE 4. (a) Courbes de vulnérabilité des pipelines en fonction de l'affaissement maximal $S_{0,max}$ pour différents diamètres et types de sol ; (b) Carte de vulnérabilité d'un pipeline de 30 cm de diamètre dans un sol de module de Young $E_s = 50$ MPa en fonction des paramètres d'affaissement $S_{0,max}$ et i_0

La figure 4(b) illustre la probabilité de défaillance sous forme d'une carte de vulnérabilité en fonction de $S_{0,max}$ et i_0 . Cette représentation met en évidence l'influence conjointe de ces paramètres : un affaissement plus diffus, caractérisé par une valeur élevée d' i_0 , tend à réduire la probabilité de rupture, tandis qu'un affaissement plus localisé amplifie significativement le risque de défaillance.

V. CONCLUSION

Cette étude propose un méta-modèle suivi par une approche probabiliste pour évaluer la fiabilité des pipelines enterrés soumis à des affaissements de sol. Le méta-modèle développé permet d'estimer les réponses du pipeline sans recours systématique aux simulations numériques. L'analyse probabiliste, intégrant les incertitudes des paramètres du système, a montré que la rigidité relative entre le pipeline et le sol influence fortement la probabilité de défaillance, avec un risque accru pour les sols rigides et les conduites de plus faible diamètre.

Des simulations numériques supplémentaires sont en cours afin d'enrichir la base de données et d'affiner les prédictions du méta-modèle, en améliorant sa précision et en élargissant son domaine de validité aux configurations non encore couvertes. Parallèlement, une approche probabiliste intégrant les autres critères de rupture spécifiés par l'Eurocode est en cours de développement. Cette démarche vise à obtenir une évaluation plus complète de la fiabilité des pipelines, en prenant en compte plusieurs modes de défaillance et en assurant une meilleure conformité aux normes de conception en vigueur.

REFERENCES

- Boot T., et al., 2021. TMS 2021 150th Annual Meeting & Exhibition Supplemental Proceedings. 722-729
- European Hydrogen Backbone, 2020. How a dedicated hydrogen infrastructure can be created. Guidehouse, Netherlands.
- GRTgaz, 2019. Conditions techniques et économiques d'injection d'hydrogène dans les réseaux de gaz naturel.
- Joundi, M., Mehdizadeh, R., Deck, O., 2023. 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 41.
- 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>