

PhD offer in Geosciences at Université de Lorraine, Nancy, France

(description in English and French)

Title of the PhD thesis: *Reliability analysis of damage of buried pipelines exposed to ground settlement - the case of reuse of gas pipelines for hydrogen transport*

Context and motivations of the thesis

In its race towards climate neutrality by 2050, the European Union seems to be betting on green hydrogen as a high-potential energy source. Europe envisages to develop more than 11,000 km of pipelines transporting hydrogen in 2030 (European Hydrogen Backbone, 2020). The French government seems to prioritize the reuse of gas networks for the transport and storage of H₂ (GRTgaz, 2019). On the other hand, the substitution of gas by hydrogen leads to an evolution of the mechanical characteristics of steel pipelines, and consequently, increases their vulnerability vis-à-vis external stresses (loads, ground movements, natural hazards, etc.). It has been shown that pipeline steel could lose up to 40% of its ductility after exposure to 100 bar H₂ (Boots et al., 2021). Thus, the reuse of the existing gas networks for the hydrogen transport raises today a set of scientific and technical questions.

The problem of pipelines vulnerability is getting even more serious by both the climate change and the evolution of human activities associated with the ecological transition. Climate change is a source of increase in intensity and/or probability of occurrence of ground settlements associated with shrinkage and swelling of clay soils, excessive pumping of groundwater or the stability of natural or anthropogenic underground cavities. Human activities (e.g. tunneling) can also cause ground settlements (Wolsa et al., 2014; Mahmoudpour et al., 2016; Peduto et al., al., 2018; Franco et al., 2019). Thus, article R. 555-10-1 of the environment code (Légifrance, 2014) considers the crossing of ground settlement zones as one of the important issues which should be considered in risk analysis of buried pipelines.

The weakening of existing pipelines by hydrogen and the evolution of hazards that could impact these networks are a source of danger for the durability and safety of these infrastructures. Hydrogen leaks can lead to fires, explosions or the production of toxic gases by inducing reactions with nitrates and sulphates (ADEM, 2015). These environmental, financial and socio-economic consequences can be unacceptable at different spatial and temporal scales.

In a risk management approach, it is essential to assess and map the level of risk of these pipelines, in order to distinguish the sections with an acceptable level of risk from those requiring a reduction of their vulnerability. In this thesis, we will therefore be interested in evaluating the vulnerability of pipelines exposed to different types of ground settlement. The objective will be to develop fragility curves making it possible to evaluate the probabilities of pipelines failure bases on their mechanical and geometric characteristics, but also by considering the mechanical properties of the surrounding terrain (soil-structure interaction) and the nature of ground settlement.

Scientific works on this issue can be divided between researches dedicated to understanding and predicting ground movements (e.g. Shi et al. 2008, Guo et al. 2014) and researches dedicated to evaluating and predicting the associated consequences. (e.g. Song et al., 2012; Basmaji et al., 2017). In this thesis, we will be particularly interested in the latter.

The study of the consequences of movements on the structures requires considering the phenomena of soil-structure interaction. These phenomena have been studied using different approaches: numerical modeling (e.g. Pickhaver et al., 2010; Deck and Anirudh, 2010), analytical modeling (Giardina et al., 2018, Huang et al., 2019) and physical models (Giardina, G. et al., 2012; Serhal, et al., 2016). The analysis of the state-of-the-art shows that the vulnerability of infrastructures and buried pipelines has been studied less than that of buildings (e.g. Kunert et al., 2012; Luo et al., 2015, Ni and Mangalathuc, 2018). On the other hand, existing studies are faced with the difficulty of taking into account numerous

uncertainties related to models and measurements which nevertheless have major effects on the final results. This makes it difficult to apply existing results and methods to real situations. Thus, the consideration of uncertainties in the study of the vulnerability of buried pipelines affected by ground settlements will constitute one of the originalities and scientific contribution of the thesis.

Objectives of the thesis

The general objective of this thesis is to understand the interaction between buried pipelines (gas networks reused for the transport of hydrogen) and ground settlements, in order to improve risk prevention and reduce the associated consequences. More specifically, we are interested in the study of soil-structure interaction phenomena (ISS) which consider the rigidity of the ground and that of the structure (the pipeline) to better assess the movements transmitted to the pipelines and their consequences (malfunctions or damage). The idea is to end up with a simple but valid analytical model allowing to study many configurations, to carry out sensitivity studies and to evaluate the influence of uncertainties on the results. This analytical model will be validated on the basis of numerical and physical modeling.

First part (analytical and numerical): we will aim to produce a pseudo-analytical model with the advantage of having reduced computing times while being representative of the phenomena, able to consider the three-dimensional nature of the problem. The model will be pseudo-analytical in the sense that its formalism will be analytical based on simplified equations representing the behavior of the terrain (Winkler model and similar) and of the pipeline (Euler-Bernoulli model), but the resolution will require the implementation of numerical algorithms (finite differences). In this 2D analytical model, the structure (the tube) will be modeled by Euler-Bernoulli or Timoshenko beams (taking into account the deformations associated with the shear force). The ground will be represented by models of increasing complexity (Winkler, Pasternak, Hetenyi integrating or not the ground limit of elasticity). In a second step, more complex models will be used to take into account the plasticity of the soil.

The development of this model will also be reinforced by 2D and 3D numerical modeling in order to take into account the three-dimensional nature of the problem. Numerical modeling can be carried out with Plaxis 2D and 3D software.

Second part (analytical): once the analytical model has been developed, the aim will be to assess the sources of uncertainty (sensitivity analyzes by Sobol, McKey, etc.) and to assess their effects. Particular attention will be paid to the uncertainties associated with the shape and amplitude of ground movements and the mechanical properties of the pipelines and the terrain.

The project will then focus on considering uncertainties in order to develop a reliability approach aimed at evaluating the probability of failure of pipelines according to the context in which they are located. We will also integrate the uncertainty on the evolution of the mechanical behavior of the steel pipelines due to the interaction with hydrogen. We will rely on Monte-Carlo Simulations (MCS) and optimization methods such as accelerated sampling by Latin Hypercube (LHS) or the development of metamodels by the limit state functions. The calculations will be carried out on MATHEMATICA and the results will be valued by means of the development of fragility curves which constitute operational approaches to assess damage in a context of uncertainty (Serhal et al., 2016).

Third part (experimental): we will aim to carry out about ten physical experiments using DIMITRI experimental device of GeoRessources research laboratory. These experiments should make it possible to test some representative configurations of real situations and validate the numerical and analytical models.

Sujet de la thèse : *Analyse fiabiliste des dommages aux réseaux enterrés de gaz exposés au phénomène de mouvement de terrain - le cas de changement d'usage des pipelines pour le transport d'hydrogène*

Contexte et motivations de la thèse

Dans sa course vers la neutralité climatique à l'horizon 2050, l'Union Européenne semble miser sur l'hydrogène vert, comme source d'énergie à fort potentiel. Aujourd'hui, l'hydrogène est en général produit près de son lieu d'utilisation, mais cet état de fait devrait évoluer dans les prochaines années avec l'augmentation de la consommation et des volumes produits. Il en résulte la nécessité de développer des solutions de transport sécurisé de l'hydrogène. Ainsi, l'Europe envisage plus de 11000 km de pipelines transportant de l'hydrogène en 2030 (European Hydrogen Backbone, 2020). Le gouvernement français semble prioriser la réutilisation des réseaux gaz pour le transport et le stockage d'H₂ (GRTgaz, 2019). En revanche, la substitution de gaz par l'hydrogène engendre une évolution des caractéristiques mécaniques des réseaux, et en conséquence, augmente leur vulnérabilité vis-à-vis des sollicitations externes (chargements, mouvements de terrain associés à des travaux ou des aléas naturels, etc.). 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). Le changement d'usage des réseaux gaz existants pour le transport d'hydrogène soulève donc aujourd'hui un ensemble de questions de nature scientifique et technique.

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. Le changement climatique est source d'une augmentation de l'intensité ou de la probabilité d'occurrence de mouvements de terrains associés au retrait gonflement des sols argileux, au pompage excessif des eaux souterraines ou à la stabilité de cavités souterraines naturelles ou anthropiques. Les activités humaines (ex. creusement de tunnel) peuvent également être à l'origine de mouvements de terrains liés au développement des infrastructures souterraines dans une logique de densification urbaine (Wolsa *et al.*, 2014 ; Mahmoudpour *et al.*, 2016 ; Peduto *et al.*, 2018 ; Franco *et al.*, 2019). Ainsi, l'article R. 555-10-1 du code de l'environnement (Légifrance, 2014) considère la traversée de zones de mouvements de terrain comme un des sujets importants à traiter dans l'étude de danger des réseaux enterrés.

La fragilisation par l'hydrogène des réseaux existants et l'évolution des aléas pouvant impacter ces réseaux sont source de danger pour la pérennité et la sécurité de ces infrastructures. Les fuites d'hydrogène (de débit important ou diffuses dans l'environnement) peuvent conduire à des incendies, explosions ou la production des gaz toxiques en induisant des réactions avec les nitrates et sulfates (ADEM, 2015). Ces conséquences environnementales, financières et socio-économiques peuvent avoir un caractère inacceptable à différentes échelles spatiales et temporelles.

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 (par l'application de revêtements barrières, renforcement mécanique, etc.) ou de l'aléa (traitement des terrains environnants le réseau par exemple).

Dans le présent projet on s'intéressera donc 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 (mécaniques et géométriques), des propriétés mécaniques du terrain environnant (interaction sol-structure) et de la nature des mouvements de terrain.

Les études scientifiques sur cette problématique peuvent se diviser entre les recherches dédiées à la compréhension et la prévision des mouvements (ex. Shi *et al.* 2008, Guo *et al.* 2014) et les recherches dédiées à l'évaluation et la prévision des conséquences associées (ex. Song *et al.*, 2012 ; Basmaji *et al.*, 2017). Dans cette thèse, on s'intéressera plus particulièrement à ce dernier.

L'étude des conséquences des mouvements sur les ouvrages nécessite de prendre en compte les phénomènes d'interaction sol-structure. Ces phénomènes ont été étudiés selon différentes approches : modélisation numériques (ex. Pickhaver *et al.*, 2010 ; Deck et Anirudh, 2010), modélisations analytiques (Giardina *et al.*, 2018, Huang *et al.*, 2019) et modèles physiques (Giardina, G. *et al.*, 2012 ; Serhal, *et al.*, 2016). L'analyse de l'état de l'art montre que la vulnérabilité des infrastructures et les réseaux enterrés a

été moins étudiée que celle du bâti (ex. Kunert *et al.*, 2012 ; Luo *et al.*, 2015, Ni et Mangalathuc, 2018), ce qui constitue un point innovant de la thèse.

D'autre part, les études existantes sont confrontées à la difficulté de tenir compte d'incertitudes nombreuses liées aux modèles et aux mesures qui ont pourtant des effets majeurs sur les résultats finaux. Ceci rend difficile l'application des résultats et des méthodes existantes à des situations réelles. Ainsi, la prise en compte des incertitudes dans l'étude de la vulnérabilité des réseaux enterrés subis par des mouvements de terrain constituera une des originalités et contribution scientifique de la thèse.

Objectifs de la thèse

Cette thèse a pour objectif général de comprendre l'interaction entre les réseaux enterrés (réseaux gaz réutilisés pour le transport d'hydrogène) et les mouvements de terrains, afin d'améliorer la prévention des risques et de réduire les conséquences associées. Plus précisément, on s'intéresse à l'étude des phénomènes d'interaction sol-structure (ISS) qui tiennent compte de la rigidité des terrains et de celle de la structure (le réseau) pour évaluer au mieux les mouvements transmis aux réseaux et leurs conséquences (dysfonctionnements ou endommagements). L'idée est d'aboutir à un modèle analytique simple mais valide permettant d'étudier de nombreuses configurations, de mener des études de sensibilité et d'évaluer l'influence des incertitudes sur les résultats. Ce modèle analytique sera validé sur la base de modélisations numériques et physiques.

Première partie (analytique et numérique) : on visera la réalisation d'un modèle pseudo-analytique présentant l'intérêt d'avoir des temps de calculs réduits tout en étant représentatif des phénomènes, y compris la prise en compte du caractère tridimensionnel du problème. Le modèle sera pseudo-analytique au sens où son formalisme sera analytique en s'appuyant sur des équations simplifiées du comportement du terrain (modèle de Winkler et assimilés) et du réseau (modèle d'Euler-Bernoulli), mais la résolution requerra la mise en œuvre d'algorithmes numériques (différences finies). Dans ce modèle analytique 2D, la structure (le tube) sera modélisée par des poutres d'Euler-Bernoulli ou Timoshenko (prise en compte des déformations associées à l'effort tranchant) connectées par des éléments de raideur représentatifs des jonctions entre éléments du réseau. Le sol sera modélisé par des modèles de complexité croissante (modèles de Winkler, Pasternak, Hetenyi intégrant ou non une limite d'élasticité des terrains). Dans un deuxième temps, des modèles plus complexes seront utilisés pour la prise en compte de la plasticité du sol.

Le développement de ce modèle s'appuiera sur des modélisations numériques 2D et 3D afin de tenir compte au mieux du caractère tridimensionnel du problème. Les modélisations numériques pourront être réalisées avec les logiciels Plaxis 2D et 3D.

Deuxième partie (analytique) : une fois le modèle analytique développé, on visera à évaluer les sources d'incertitudes (analyses de sensibilité de Sobol, McKey, etc.) et à en évaluer les effets. On s'intéressera en particulier aux incertitudes associées à la forme et l'amplitude des mouvements de terrain et les propriétés mécaniques du réseau et du terrain. La prise en compte de corrélations spatiales sera envisagée selon l'avancement du travail.

Le travail portera alors sur la prise en compte des incertitudes afin de développer une approche fiabiliste visant à évaluer la probabilité de défaillance des réseaux en fonction du contexte dans lequel ils se trouvent. On intégrera également l'incertitude sur l'évolution du comportement mécanique des réseaux en lien avec le transport d'hydrogène. On s'appuiera sur des Simulation de Monte-Carlo (SMC) et des méthodes d'optimisation telles que l'échantillonnage accéléré par Hypercube Latin (LHS) ou le développement de métamodèles par la fonction d'état limite. Les calculs seront réalisés sur MATHEMATICA et les résultats seront valorisés au moyen du développement de courbes de fragilité qui constituent des approches opérationnelles pour évaluer des dommages dans un contexte d'incertitude (Serhal *et al.*, 2016).

Troisième partie (expérimentale) : on visera la réalisation d'une dizaine d'expérimentations physiques au moyen du dispositif expérimental DIMITRI de l'équipe GOR. Ces expérimentations devront permettre de tester quelques configurations représentatives de situations réelles et valider les modèles numériques et analytiques. Le modèle sera constitué de deux mètres cubes de géomatériaux (sable) et un tube plastique fin (1.5m de longueur) qui représentera le réseau. Le choix du modèle (matériaux, dimensions) sera effectué en tenant compte des lois de similitude et de telle façon que l'effet des bords de la machine soit négligeable. Les affaissements seront générés par le dégonflement d'un coussin enterré et des acquisitions seront réalisées par mesures directes et photogrammétrie.

Supervisors: Prof. Olivier DECK (olivier.deck@univ-lorraine.fr) and Assoc. prof. Rasool Mehdizadeh (rasool.mehdizadeh@univ-lorraine.fr)

Researcher profile: First stage researcher (R1)

Research field: Geosciences, Geotechnics, civil engineering

Type of contract: Temporary, full time

Deadline for submitting your online application: May 15 2022

Start date of the project: October/November 2022

Duration: 3 years

How to apply: <https://forms.gle/8SXmJwRzgw9fzuV89>

Hiring organisation : Université de Lorraine – GeoRessources lab, campus Artem, Nancy, France (<http://georessources.univ-lorraine.fr/fr>)

Sources of funding: “Contrat Doctoral” by Université de Lorraine

Required education level: Master degree or equivalent, in civil and geotechnical Engineering.

Required languages: French (excellent), English (Excellent)

Eligibility criteria: as our laboratory is classified as a “sensitive laboratory with reinforced protection”, the final recruitment of the selected candidate will be subject to the acceptance of his/her administrative file by the Security and Defense Project Manager.

Selection process: Application pack is: a resume + 1 or 2 letters of recommendation + abstract of your MSc thesis. An interview of selected candidates will be organized in May/June 2022.

References

- ADEM, 2015. Guide d'information sur les risques et les mesures de sécurité liés à la production décentralisée d'hydrogène.
- Attewell, P.B., Yeates, J., Selby, A.R., 1986. Soil Movements Induced by Tunnelling and Their Effects on Pipelines and structures. Methuen Inc, New York.
- Basmaji, B., 2016. Développement d'un modèle analytique d'interaction sol- structure pour l'étude du comportement mécanique des structures soumises à un mouvement de terrain – influence des déformations de cisaillement et de la plasticité, thèse de doctorat.
- Basmaji, B., Deck, O., Alheib, M., 2017. Analytical model to predict building deflections induced by ground movements. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*. 10, 1-23.
- Boot T., *et al.*, 2021. TMS 2021 150th Annual Meeting & Exhibition Supplemental Proceedings pp 722-729.
- Deck, D., Anirudh, H., 2010. Numerical study of the soil–structure interaction within mining subsidence areas, *Computers and Geotechnics*. 37, 802–816.
- El Kahi, E., en cours, Comportement des ouvrages soumis à des tassements différentiels – Prise en compte des incertitudes, thèse de doctorat.
- European Hydrogen Backbone, 2020. How a dedicated hydrogen infrastructure can be created. Guidehouse, Netherlands.
- Francoa, V. H. *et al.*, 2019. Probabilistic assessment of tunneling-induced building damage. *Computers and Geotechnics*, 113.
- Giardina, G. *et al.*, 2012. Experimental analysis of a masonry façade subject to tunnelling-induced settlement. *Engineering Structures*, 45. 421–434.
- Giardina, G. *et al.*, 2018. A comparison of current analytical methods for predicting soil-structure interaction due to tunneling. *Tunnelling and Underground Space Technology*. 79, 319-335.
- GRTgaz, 2019. Conditions techniques et économiques d'injection d'hydrogène dans les réseaux de gaz naturel, rapport final, juin 2019.
- Guo, G. *et al.*, 2014. Subsidence prediction method based on equivalent mining height theory for solid backfilling mining. *Trans. Nonferrous Met. Soc. China*. 24, 3302-3308.
- Huang, M. *et al.*, 2019. Estimating the effects of tunnelling on existing jointed pipelines based on Winkler model. *Tunnelling and Underground Space Technology*. 86, 89–99.
- INERIS, 2019. Enjeux de sécurité liés à l'injection d'hydrogène dans les réseaux de transport et distribution de gaz naturel : état des lieux et perspectives.
- Jahanghir, E., 2011 - Phénomènes d'interaction sol-structure vis-à-vis de l'aléa retrait- gonflement pour l'évaluation de la vulnérabilité des ouvrages, thèse de doctorat.
- Kunert, H.G., Otegui, J.L., Marquez, A., 2012. Nonlinear FEM strategies for modeling pipe–soil interaction. *Engineering Failure Analysis*. 24, 46-56.
- Légifrance, 2014. Arrêté du 5 mars 2014 portant règlement de la sécurité des canalisations de transport de gaz naturel ou assimilé, d'hydrocarbures et de produits chimiques.
- Luo, X. *et al.*, 2015. Numerical simulation of strength failure of buried polyethylene pipe under foundation settlement. *Engineering Failure Analysis*. 48, 2015, 144–152.
- Mahmoudpour, M. *et al.*, 2016. Numerical simulation and prediction of regional land subsidence caused by groundwater exploitation in the southwest plain of Tehran, Iran. *Engineering Geology*, 201, 6-28.
- Ni, P., Mangalathuc, S., 2018. Fragility analysis of gray iron pipelines subjected to tunneling induced ground settlement. *Tunnelling and Underground Space Technology*. 76, 133-144.
- Peduto, D., Elia, F., Montuori, R., 2018. Probabilistic analysis of settlement-induced damage to bridges in the city of Amsterdam (The Netherlands). *Transportation Geotechnics*, 14, 169–182.
- Pickhaver, J.A., Burd, H.J., Houlshby, G.T., 2010. An equivalent beam method to model masonry buildings in 3D finite element analysis. *Computers and Structures* 88, 1049–1063.
- Saeidi, A., 2010. La vulnérabilité des ouvrages soumis aux aléas mouvements de terrains ; développement d'un simulateur de dommages, thèse de doctorat.
- Serhal, J. *et al.*, 2016. Damage of masonry structures relative to their properties: Development of ground movement fragility curves. *Engineering Structures*. 113, 206–219.
- Serhal, J., 2016. Etude de la vulnérabilité des bâtiments en maçonnerie soumis à des mouvements de terrains et élaboration de critères d'évolution de leur rigidité, thèse de doctorat.
- Shi, X.Q. *et al.*, 2008. Regional land subsidence simulation in Su-Xi-Chang area and Shanghai City, China. *Engineering Geology*, 100, 27–42.
- Song, J. *et al.*, 2012. Quantitative prediction of mining subsidence and its impact on the environment. *International Journal of Mining Science and Technology*. 22, 69–73.
- Wolsa, B.A., Daala, K., Thienena, P., 2014. Effects of climate change on drinking water distribution network integrity: predicting pipe failure resulting from differential soil settlement. *Procedia Engineering*. 70, 1726-1734.