

Effets de la variabilité du sol et de la répartition du chargement sur les ouvertures de joints de conduites enterrées

G. Darwich¹, S.M. Elachachi¹, H. Yanez-Godoy¹

¹ Université de Bordeaux, I2M, UMR 5295, département GCE, France.

mail : ghina.darwich@u-bordeaux.fr

RÉSUMÉ. Dans le cas des conduites enterrées, le sol peut avoir une influence déterminante sur la répartition des efforts et des déplacements de la conduite et du sol environnant. On parle alors d'une interaction sol-conduite. D'autre part, si l'on considère les défaillances affectant les conduites et relevant de la flexion longitudinale, il apparaît que les joints jouent un rôle majeur. Un modèle simple qui décrit l'interaction sol-conduite et qui prend en compte la variabilité spatiale du sol a été développé. La conduite considérée est soumise aux effets du poids des terres et des charges en surface. Une analyse probabiliste permettant d'étudier l'influence de la variabilité spatiale des caractéristiques géo-mécaniques du sol sur les ouvertures de joints, pour différentes profondeurs d'enfouissement de la conduite, ainsi que pour différentes rigidités de joints, a été réalisée.

ABSTRACT. In the case of buried pipes, the soil can have a decisive influence on the distribution of forces and displacements of the pipe and the surrounding soil. This is called the soil-pipe interaction. On the other hand, if we consider the failures affecting the pipes and falling within the longitudinal bending, it appears that the joints play a major role. A simple model which describes the soil-pipe interaction and takes into account the spatial variability of the soil has been developed. The considered pipe is subjected to the effects of earth loads and surface loads. A probabilistic analysis enabling to study the influence of spatial variability of geo-mechanical characteristics of the soil on the joint openings, for different burial depths of the pipes, as well as for different joint stiffnesses, was carried out.

MOTS-CLÉS : conduite, joint, interaction sol-structure, variabilité spatiale, chargements extérieurs.

KEY WORDS : pipe, joint, soil-structure interaction, spatial variability, external loads.

1. Introduction

Des joints à faible performance mécanique peuvent provoquer une infiltration, une exfiltration et une érosion du sol entourant une conduite enterrée pouvant aboutir parfois à une défaillance globale de la conduite. Bien que les joints soient connus pour être les points les plus faibles et contrôlent, dans une certaine mesure, la durée de service d'une conduite, une revue de l'état de l'art montre que leur conception n'a retenu que très peu d'attention [BEC 14, BEC 15] et une propriété comme la rigidité flexionnelle du joint est inaccessible. D'autre part, l'hétérogénéité du sol affecte également la réponse structurale d'un ensemble de conduites, tant en termes de redistributions d'efforts qu'en termes de mouvement d'ouvrage. Cette hétérogénéité se traduit par une variabilité spatiale des propriétés du sol. Enfin, le chargement que subit une conduite enterrée est décomposable en deux parties : le poids des terres et les charges en surface. Leurs effets, souvent opposés, font apparaître une profondeur optimale d'enfouissement de la conduite. Nous nous intéressons dans cette communication à l'effet conjugué de la rigidité des joints (de flexibles aux rigides), de la variabilité du sol (au travers de champs aléatoires) et des chargements extérieurs (en surface et poids propre des terres) sur la réponse d'une conduite en termes d'ouvertures de joints.

2. Sur les modèles

2.1 Modèle d'ouvrage

La conduite est constituée d'un ensemble de tronçons. Chaque tronçon de longueur finie est décomposé en un nombre d'éléments poutres reliés entre eux par des nœuds. Pour les extrémités des tronçons, une paire de deux

nœuds indépendants est utilisé à l'interface entre les joints. Chaque élément de la conduite est soumis à un chargement uniformément réparti q et repose sur un sol modélisé, selon le modèle de Winkler, par une succession de ressorts indépendants de coefficient de réaction du sol k_s pour tenir compte de l'interaction sol-structure. Ce modèle est décrit par une loi uniaxiale de la forme $p(x) = k_s \cdot w(x)$ avec $p(x)$ la pression exercée à l'abscisse x , $w(x)$ le déplacement dans la direction transversale à l'abscisse x et k_s la raideur (module de réaction). Les comportements du tronçon de conduite et du sol sont considérés linéaires.

Dans notre cas d'étude, la conduite enterrée est constituée de 30 tronçons de 3 m de longueur chacun, et positionnée à différentes profondeurs. Le diamètre est de 1 m, l'épaisseur de 5 cm, et le module de Young de 25GPa.

2.2 Modèle de chargement

La conduite enterrée est soumise au poids des terres (équations 1 et 2), et aux charges en surface dont la diffusion est calculée selon l'équation 3. Les effets de ces deux chargements, et leur superposition (Equation 4), dépendent de la profondeur d'enfouissement. Dans cette étude, la plage de variation retenue pour la profondeur est comprise entre 0,5 m et 10 m.

$$W_d = C_d \gamma B_d^2 \quad [1]$$

$$\text{où :} \quad C_d = \frac{1}{2K\mu'} \left(1 - e^{-2K\mu' \left(\frac{H}{B_d}\right)}\right) \quad [2]$$

avec : W_d , poids des terres (par mètre linéaire de la conduite), γ poids volumique du remblai, B_d largeur de la tranchée, H profondeur de la conduite, K coefficient de Rankine et μ' coefficient de frottement.

Dans cette étude, $\gamma = 19 \text{ kN/m}^3$, $B_d = 2\text{m}$ et $K\mu' = 0,165$ (déterminé expérimentalement [MAR 30]).

$$P_{eq} = \frac{1}{D_e} \left[\int_{-D_e/2}^{D_e/2} \int_{-D_e/2}^{D_e/2} \sigma_{zz}(xy) dx dy \right] \quad \text{et} \quad \sigma_{zz} = \frac{nQz^n}{2\pi R^{n+2}} \quad [3]$$

avec : P_{eq} pression verticale équivalente sur une surface horizontale tangente à la clé de la conduite, de largeur égale au diamètre extérieur et de longueur égale à 1 m, D_e diamètre extérieur de la conduite, Q charge en surface ($Q = 1 \text{ MN}$ dans cette étude) et R distance du point d'application de la charge au point de calcul de la contrainte. Les valeurs de n sont de 3 et 4.

La pression linéaire totale sur la conduite P_{tot} est (équation 4) :

$$P_{tot} = W_d + P_{eq} \cdot D_e \quad [4]$$

La Figure 1 montre les effets des chargements appliqués à la conduite ainsi que leur superposition en fonction de la profondeur d'enfouissement. On observe une profondeur optimale de l'ordre de 3 m où le chargement appliqué est le plus faible.

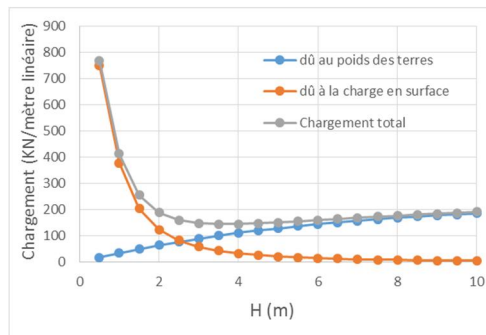


Figure 1. Valeurs des chargements appliqués à la conduite en fonction de la profondeur.

2.3 Modèle de variabilité du sol

Le modèle de sol est basé sur la théorie des champs aléatoires [Van 83]. La théorie (au second ordre) des champs aléatoires de la propriété du sol (module de réaction du sol k_s), requiert la définition de trois paramètres: la valeur moyenne, sa variance (ou le coefficient de variation), et sa longueur de corrélation l_c . La longueur de corrélation l_c est définie comme la distance entre deux points au-delà de laquelle les propriétés ne sont plus

corrélées. Cette propriété est prise en compte dans le modèle de calcul de la longueur de corrélation étudiées. Trois valeurs moyennes de k_s ont été retenues (5, 25 et 1000 MN/m³) correspondant à des sols de faible, moyenne et forte raideurs. Le coefficient de variation de k_s est pris égal à 0,2. Cinq valeurs du ratio λ ont été également retenues (1, 5, 10, 20 et 50), où λ représente le rapport entre la longueur de corrélation du sol et la longueur du tronçon.

3. Simulations de Monte Carlo

Les variables d'intérêt principales dans cette étude sont l'ouverture de joint maximale $\Delta\theta_{\max}$ sur toute la conduite et le moment de flexion M maximal. L'analyse probabiliste est effectuée par des simulations de Monte Carlo (1000 simulations pour chaque cas dans notre étude).

La Figure 2 montre l'influence de la longueur de corrélation du sol sur l'ouverture maximale des joints (moyenne) en fonction de la profondeur (Figure 2.a) ou du ratio λ (Figure 2.b). On observe que pour une même profondeur H , $\Delta\theta_{\max}$ est d'autant plus faible que la longueur de corrélation du sol est élevée. Une profondeur optimale est également observée quel que soit λ . Enfin, plus la raideur du sol k_s est grande, plus $\Delta\theta_{\max}$ est réduite.

La Figure 3 montre l'influence de la raideur du sol sur $\Delta\theta_{\max}$ et M_{\max} pour une rigidité du joint importante. Plus le sol est raide, plus aussi sur $\Delta\theta_{\max}$ que M_{\max} sont réduits.

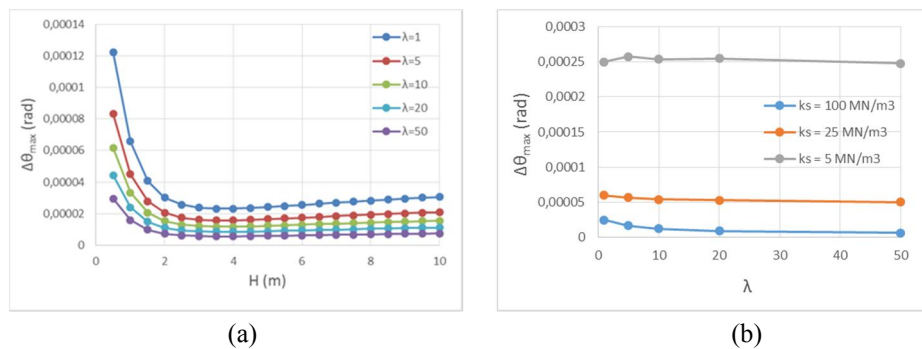


Figure 2. Influence de la longueur de corrélation du sol sur l'ouverture maximale du joint : pour différentes profondeurs d'enfouissement (a) et différents coefficients de réaction du sol (b).

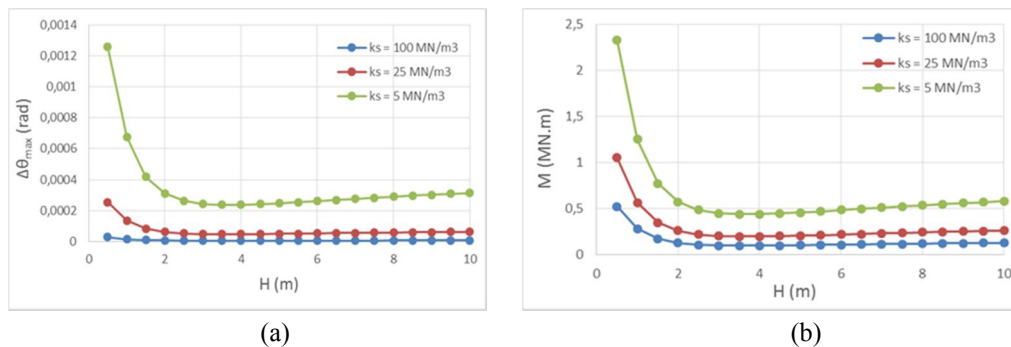


Figure 3. Influence du coefficient de réaction du sol sur : l'ouverture maximale (a) et le moment maximal (b).

La Figure 4 montre les fonctions de répartition de l'ouverture maximale des joints et du moment de flexion maximal dans le cas où la profondeur de la conduite enterrée est égale à 5 m. On remarque que les valeurs des ouvertures maximales sont d'autant plus dispersées que la longueur de corrélation du sol est faible, tandis que la variation de la longueur de corrélation du sol a peu d'influence sur la dispersion des moments maximaux.

La figure 5 restitue l'effet de la rigidité des joints sur $\Delta\theta_{\max}$ pour des profondeurs ou des longueurs de corrélation différentes, r_j représentant le ratio entre la rigidité du joint et la rigidité flexionnelle de la conduite. En fonction du joint, une profondeur optimale différente de la conduite est constatée. De même, une plus grande longueur de corrélation a un effet bénéfique (réduction) sur l'ouverture de joint.

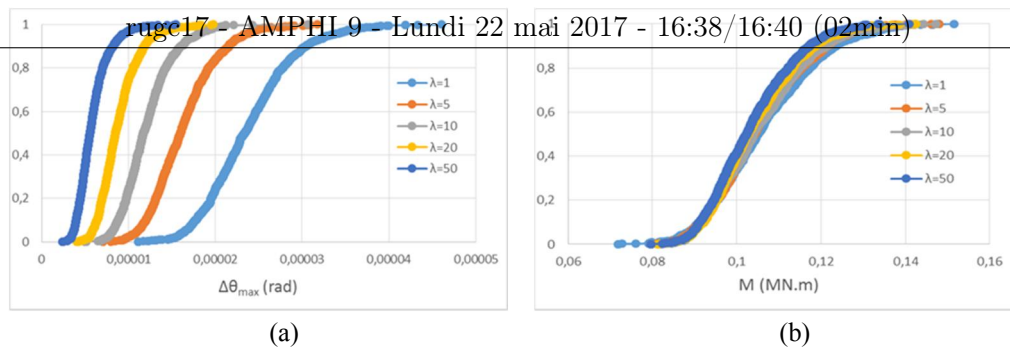


Figure 4. Influence de la longueur de corrélation du sol sur la fonction de répartition de : l'ouverture maximale (a) et le moment maximal (b), pour une profondeur de 5m.

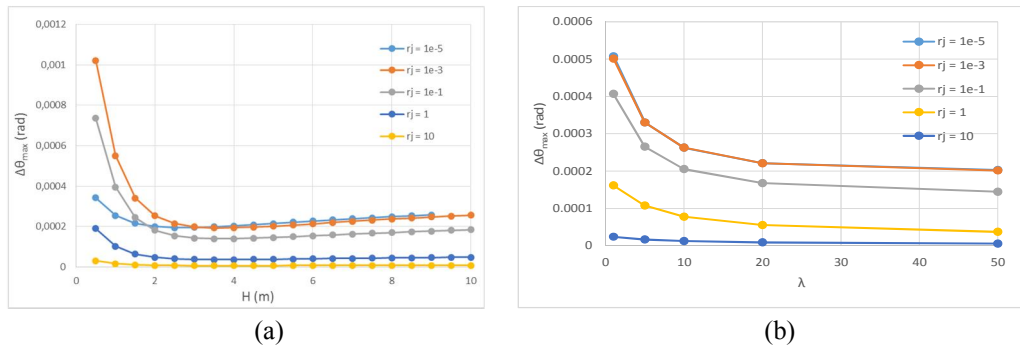


Figure 5. Influence sur l'ouverture maximale du joint de la profondeur (a) et de la longueur de corrélation du sol (b) pour plusieurs rigidités de joints.

4. Conclusions

La superposition des effets dus aux poids des terres et aux charges en surface subis par une conduite enterrée, fait apparaître une profondeur optimale d'enfouissement de la conduite. Une profondeur optimale d'enfouissement du même ordre a été obtenue en analysant l'ouverture maximale des joints et en considérant différentes longueurs de corrélation du sol, ou différents coefficients de réaction du sol et une rigidité du joint importante. Cependant, en faisant varier la rigidité du joint, la profondeur optimale d'enfouissement semble différente selon le cas, rendant ardue la définition d'une profondeur de la conduite a priori. D'autre part, en considérant la variabilité spatiale du sol, on constate qu'une conduite reposant sur un sol très raide ayant une longueur de corrélation élevée possède les ouvertures maximales de joints et les moments de flexion maximaux les plus réduits. Des analyses complémentaires semblent pertinentes pour tirer des observations plus générales en faisant appel à des variables de préférence adimensionnelles.

5. Bibliographie

- [BEC 14] BECERRIL GARCÍA D., and MOORE I. D. (2014). Behavior of bell and spigot joints in buried reinforced concrete pipelines. *Can. Geotech. J.*, 52(5), 609–625.
- [BEC 15] BECERRIL GARCÍA D., and MOORE I. D. (2015). Evaluation and application of the flexural rigidity of a reinforced concrete pipe. *J. Pipeline Syst. Eng.Pract.*, 7(1).
- [ELA 12] ELACHACHI S.M., BREYSSE D., DENIS A. (2012). The effects of soil spatial variability on the reliability of rigid buried pipes. *Computers and Geotechnics*, 43:61–71.
- [ELA 04] ELACHACHI S.M., BREYSSE D., HOUY L. (2004). Longitudinal variability of soils and structural response of sewer networks. *Computers and Geotechnics*, 31:625–641.
- [MAR 30] MARSTON A. (1930). The Theory of External Loads on Closed Conduits in the Light of the Latest Experiments. Bulletin 96, Iowa Eng. Experiment Station, Ames, Iowa, Etats-Unis.
- [MOS 01] MOSER A. P., FOLKMAN S. L. (2001). *Buried pipe design* (p. 57). New York: McGraw-Hill.
- [VAN 83] VANMARCKE E.H., (1983). *Random Fields: Analysis & Synthesis*, MIT Press, Cambridge, 383p