
Effets de la variation de la teneur en eau et de la variabilité spatiale du sol sur la réponse géo-mécanique d'une conduite enterrée

DARWICH Ghina¹, ELACHACHI Sidi Mohammed¹, YAÑEZ-GODOY Humberto¹, DENIS Alain¹, FELIERS Cedric², CHESNEAU Olivier³

¹ Université de Bordeaux, I2M, UMR CNRS 5295, Département Génie Civil et Environnemental, France

² Veolia Eau D'Ile de France, Paris

³ Syndicat des Eaux D'Ile de France, Paris

ghina.darwich@u-bordeaux.fr

RÉSUMÉ. Les fluctuations saisonnières de la température et de la pluviométrie modifient la teneur en eau et les caractéristiques géo-mécaniques du sol. Dans le cas des conduites enterrées, où l'interaction sol-structure joue un rôle déterminant dans la répartition des efforts et des déplacements de ces conduites, ces modifications ont pour conséquence l'apparition de tassements différentiels et l'apparition de dégradations et de dysfonctionnements. Dans cette communication, on s'intéresse à l'effet de la variation de la teneur en eau du sol sur la réponse des conduites enterrées, tenant compte de la variabilité spatiale du sol. A cette fin, une analyse probabiliste menée sur un modèle simple, qui décrit l'interaction sol-conduite et qui prend en compte la variabilité spatiale et les variations de la teneur en eau du sol, a été réalisée.

ABSTRACT. Seasonal fluctuations in temperature and rainfall affect the water content and the geo-mechanical characteristics of the soil. In the case of buried pipes, where the soil-structure interaction plays a significant role in the distribution of the forces and displacements of these pipes, these modifications result in the appearance of differential settlements and pipe damage. In this paper, we are interested in the effect of the variation of the soil water content on the response of buried pipes, taking into account the spatial variability of the soil. To this end, a probabilistic analysis, conducted on a simple model which describes the soil-pipe interaction and takes into account the spatial variability and the variations of the water content of the soil, has been carried out.

MOTS-CLÉS : conduite, interaction sol-structure, variabilité spatiale, teneur en eau, probabiliste.

KEY WORDS: pipe, soil-structure interaction, spatial variability, water content, probabilistic.

1. Introduction

La teneur en eau est un des facteurs qui affectent la rigidité du sol. Ainsi, les variations de la teneur en eau, suite aux fluctuations saisonnières de la pluviométrie, peuvent influencer la réponse des conduites enterrées. D'autre part, la variabilité spatiale des propriétés du sol affecte également la réponse structurale d'un ensemble de conduites, tant en termes de redistribution d'efforts qu'en termes de mouvement d'ouvrage. Nous nous intéressons donc dans cette étude à l'effet de la variation de la teneur en eau du sol sur la réponse d'une conduite enterrée, en tenant compte de la variabilité spatiale du sol. La conduite considérée consiste en une suite de tronçons liés par des joints, et est soumise aux effets du poids des terres et des charges en surface dues au trafic ou aux structures susjacentes.

2. Modèle

La conduite est constituée d'un ensemble de tronçons. Chaque tronçon de longueur finie est décomposé en un nombre d'éléments poutres de type P2 reliés entre eux par des nœuds. Pour les extrémités des tronçons, une paire de deux nœuds indépendants est utilisée pour représenter les joints avec une capacité de rotation additionnelle.

Chaque élément poutre est soumis à un chargement réparti q et repose sur un sol modélisé, selon le modèle simplifié de Winkler, par une succession d'éléments 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 $p(x) = k_s w(x)$ 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 (coefficient de réaction). Les comportements du tronçon de conduite et du sol sont considérés linéaires [DAR 17], [ELA 04], [ELA 12].

Dans notre cas d'étude, la conduite enterrée est constituée de 30 tronçons de 3 m de longueur chacun, et positionnée à 1 m de profondeur. Son diamètre est de 1 m, avec une épaisseur de 5 cm, et un module de Young de 25GPa représentatif d'une conduite rigide.

La conduite enterrée est soumise au poids des terres, et aux charges en surface. La variabilité du sol est modélisée par 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 dépend des caractéristiques (module, teneur en eau...) et de la direction étudiées.

3. Relation entre la teneur en eau et la rigidité du sol

Il n'existe pas dans la littérature, à la connaissance des auteurs, de relation explicite reliant directement la rigidité du sol (propriété mécanique), et par conséquent le coefficient de réaction k_s , à la teneur en eau w (propriété physique). En prenant compte de l'observation suivante, qu'une diminution de la teneur en eau du sol entraîne la consolidation de ce dernier, le rendant plus rigide [MEL 10], on suppose par conséquent que la fonction reliant k_s à w est décroissante et peut s'écrire sous la forme suivante [1] :

$$k_s = a (w - w_0)^b + k_{s0} \quad [1]$$

où w est la teneur en eau volumique du sol, w_0 et k_{s0} sont respectivement la teneur en eau volumique la plus faible du sol considéré et le coefficient de réaction correspondant (en MN/m³) ; a et b sont deux paramètres à identifier.

Trois cas ont été envisagés : le premier suppose une décroissance non linéaire forte pour les faibles teneurs en eau puis faible par la suite, le deuxième suppose une relation linéaire, et le dernier considère une décroissance non linéaire faible pour les faibles teneurs en eau et conséquente pour les fortes teneurs en eau.

Des mesures de la teneur en eau volumique ont été réalisées [FER 14] sur une période allant de Juin 2008 à Janvier 2015 (Figure 1-a) et sur une profondeur allant jusqu'à 3m (Figure 1-b). Ces mesures montrent que la teneur en eau volumique mesurée sur le site considéré varie entre 20% et 40% tout au long de l'année ; Ainsi, on peut considérer que w_0 est égale à 20%. k_{s0} est pris égal à 90 MN/m³, correspondant à "l'état" le plus rigide du sol. La valeur la moins élevée de la rigidité du sol (coefficient de réaction) est prise égale à 30 MN/m³, à laquelle correspond une teneur en eau volumique de 40%. Des valeurs des paramètres a et b sont proposées pour représenter chacun des trois cas envisagés (Tableau 1 et Figure 2).

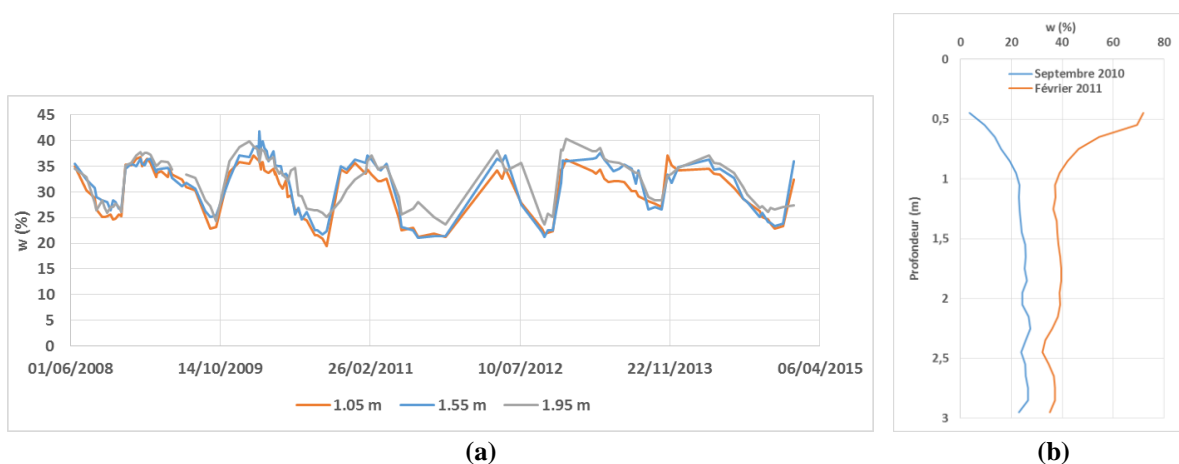


Figure 1. Variation de la teneur en eau volumique en fonction du temps (a) et de la profondeur (b).

Tableau 1. Les coefficients a et b obtenus pour les trois cas considérés.

	Cas 1	Cas 2	Cas 3
a	-13,416	-3	-0,0075
b	0,5	1	3

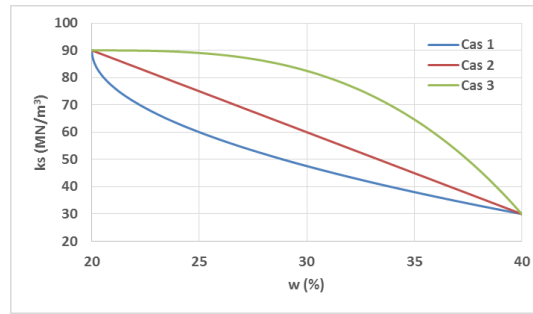


Figure 2. Les différents cas considérés pour la relation entre k_s et w .

D'autre part, un traitement des mesures de la teneur en eau volumique réalisées à une profondeur de 1m a permis de déterminer leur distribution sur les mois de l'année. Cette distribution (Figure 3) permet de retenir, sur l'année, deux périodes significativement différentes: une période A allant de Mai à Octobre, et une période B allant de Novembre jusqu'à Avril. L'analyse statistique des w mesurées a permis d'obtenir une moyenne et un coefficient de variation de w respectivement de 27% et 0,15 pour la période A, et de 34% et 0,1 pour la période B.

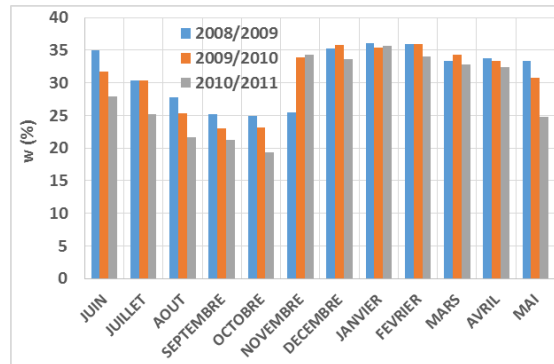


Figure 3. Distribution des teneurs en eau volumiques mesurées sur les mois de l'année.

Après avoir vérifié que ces mesures pouvaient être décrites par une distribution lognormale, des simulations Monte Carlo ont été réalisées pour évaluer k_s selon l'équation [1] pour les trois cas et les deux périodes considérées. Le Tableau 2 montre les moyennes et les coefficients de variation de k_s obtenus. Le cas 4 correspond à la situation où il n'existe aucun lien entre w et k_s . C'est le cas retenu pour le dimensionnement de conduites généralement.

Tableau 2. Moyennes (en MN/m^3) et coefficients de variation obtenus pour k_s selon le cas considéré.

	Cas 1	Cas 2	Cas 3	Cas 4
Période A	moy(k_s) = 55,4 CV(k_s) = 0,185	moy(k_s) = 68,3 CV(k_s) = 0,171	moy(k_s) = 84,4 CV(k_s) = 0,107	moy(k_s) = 60,4 CV(k_s) = 0,184
Période B	moy(k_s) = 40,2 CV(k_s) = 0,154	moy(k_s) = 48,1 CV(k_s) = 0,213	moy(k_s) = 65,7 CV(k_s) = 0,272	

La réponse de la conduite en termes d'ouverture maximale de joint, de moment maximal et de déplacement maximal est alors évaluée par des simulations Monte Carlo pour les sept cas.

Les Figures 4 et 5 illustrent les résultats obtenus. Ces figures montrent qu'en comparaison avec le cas 4 qui ne tient pas compte de l'effet des fluctuations saisonnières sur la rigidité du sol, il existe des cas non conservatifs où les réponses obtenues dépassent celles du cas 4. La figure 6 montre la fonction de répartition de $\Delta\theta_{max}$ pour les cas étudiés.

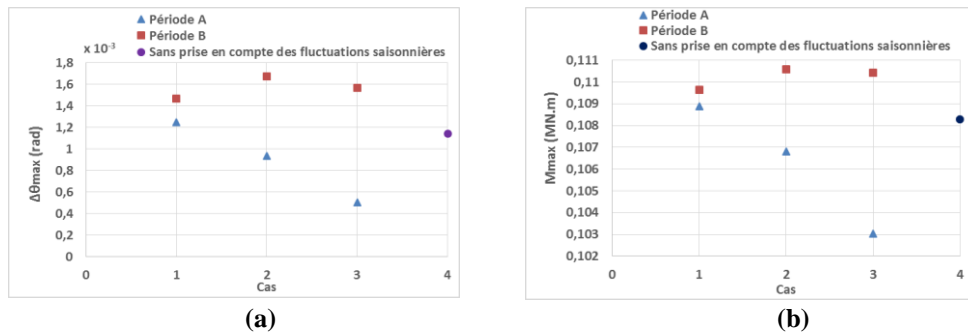


Figure 4. Ouverture de joint maximal (a) et Moment maximal (b) obtenus pour les différents cas.

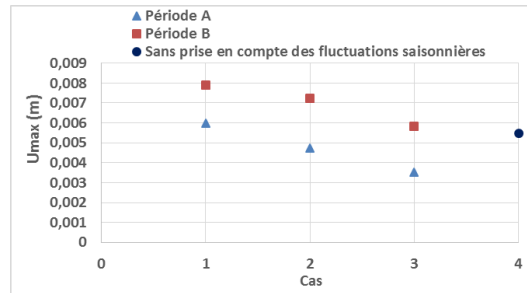


Figure 5. Déplacement vertical maximal (en valeur absolue) obtenu pour les différents cas.

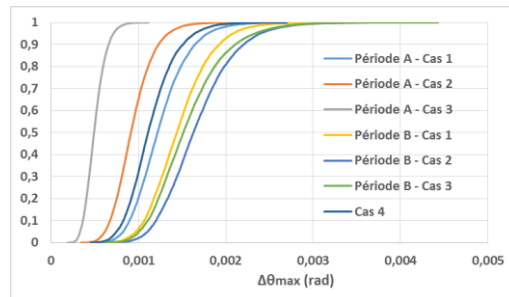


Figure 6. Fonction de répartition de l'ouverture maximale de joint pour les différents cas considérés.

4. Conclusion

L'étude présentée dans cette communication a mis en évidence la nécessité de prendre en compte l'effet des fluctuations saisonnières sur la rigidité du sol dans l'évaluation de la réponse géo-mcanique des conduites enterrées. Des études supplémentaires sont en cours afin d'évaluer la fiabilité des conduites vis-à-vis des états limites (ELU et ELS).

5. Bibliographie

- [DAR 17] DARWICH G., ELACHACHI S. M., YÁÑEZ-GODOY H. (2017). Assessment of Rigid Pipe-Joint Reliability and Effects of Soil Variability and Load Distribution on Joint Openings, 12th International Conference on Structural Safety & Reliability, ICOSSAR, 6-10 August, Vienna
- [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.
- [FER 14] FERNANDES M., FABRE R., DENIS A., MATTON D., LATASTE J.F. (2014). Prévention des risques naturels liés au retrait-gonflement des argiles en gironde: étude de facteurs d'aggravation, JNGG2014, Beauvais, 8-10 Juillet 2014.
- [MEL 10] MELLIZO SUAREZ C. A., Estimation du module réversible des matériaux granulaires de chaussées, Mémoire, Université Laval, 2010.
- [VAN 83] VANMARCKE E.H., (1983). *Random Fields: Analysis & Synthesis*, MIT Press, Cambridge, 383p.