



Journal of Materials and Engineering Structures

Research Paper

Contribution à la modélisation probabiliste des propriétés géo-mécaniques des sols pour l'analyse de la fiabilité structurelle des fondations et conduites enterrées

Contribution to probabilistic modeling of soil geo-mechanical properties for structural reliability analysis of buried pipes and foundations

Nabil Kazi Tani^{a,*}, *Djamel Nedjar*^b, *Tawfik Tamine*^c, *Mabrouk Hamane*^b

^a *École Supérieure en Sciences Appliquées de Tlemcen / Lab. RISAM, Université Abou Bekr Belkaid, Tlemcen, Algérie.*

^b *Laboratoire LM2SC, Faculté d'Architecture et de Génie Civil, Université U.S.T.O - Mohamed Boudiaf, Oran, Algérie.*

^c *Laboratoire LCGE, Faculté de Génie Mécanique, Université U.S.T.O - Mohamed Boudiaf, Oran, Algérie.*

ARTICLE INFO

Historique de l'article :

Recu : 31 mai 2018

Révisé : 14 janvier 2019

Accépté : 20 janvier 2019

Mots clés:

Interaction sol-structure

Fiabilité structurelle

Comportement élasto-plastique

Modélisation stochastique

Keywords :

Sol-structure interaction

Structural Reliability

Elasto-Plastic behavior

Stochastic modeling

RESUME

Cette présente étude synthétise une approche numérique permettant d'optimiser la conception des systèmes de fondation et des conduites souterraines sur la base de la combinaison entre le comportement élastoplastique du sol et la modélisation probabiliste de ses caractéristiques géo-mécaniques. Ce travail permet aussi de quantifier l'influence de la variabilité spatiale de ces propriétés géo-mécaniques sur la fiabilité mécanique et structurelle des infrastructures ancrées à faible profondeur dans le sol. Les simulations présentées sont basées sur la prise en compte simultanée de l'aspect élastoplastique du sol et la variabilité spatiale de ses propriétés géo-mécaniques. Les résultats montrent que l'analyse probabiliste de variabilité spatiale des propriétés du sol dans la modélisation numérique, présente une influence considérable sur les réponses des infrastructures d'autant plus, si l'ouvrage en question possède une longueur relativement importante.

ABSTRACT

This present study synthesizes a numerical approach to optimize foundation systems design and underground pipes based on the combination of elastoplastic soil behavior and probabilistic modeling of its geo-mechanical characteristics. Also, this work allows quantifying the effects of soil spatial variability on the mechanical and structural reliability of civil engineering infrastructures anchored at shallow depths in the ground. The illustrated simulations are based on simultaneous combination of the elastoplastic soil behavior and its spatial variability. The obtained results show that the probabilistic analysis of the spatial variability of soil properties into structure numerical modeling has a significant effect on the structural responses of civil engineering infrastructures, mainly if the structure length is relatively significant.

* *Corresponding author. Tel.: +213 550718784.*

E-mail address: kazitani_nabil@yahoo.fr

1 Introduction

La conception structurelle des infrastructures d'ouvrages de génie civil dépend de certains facteurs liés principalement à la distribution des rigidités aux interfaces entre le sol et les fondations. Ces interfaces séparent deux milieux, possédant des propriétés mécaniques très différentes et complexes, ce qui mène à développer des axes de recherches permettant une caractérisation plus spécifique des champs de contraintes et de déformations tenant compte de l'interaction sol-structure. L'approche adoptée dans la majorité des cas est basée sur la vérification des critères de résistance et de stabilité des fondations et ce, face aux différents types de surcharges d'une part et d'autre part, des propriétés géotechniques des sols.

Ces approches sont basées sur l'hypothèse d'un sol élastique linéaire. Les paramètres liés à son comportement élastoplastique sont compensés par des coefficients de sécurité qui mènent dans la majorité des cas à des surdimensionnements excessifs au détriment de l'aspect économique de l'ouvrage. En outre, l'aspect hétérogène du sol n'est pas pris en compte. Les propriétés géo-mécaniques sont prises constantes sur l'interface entre les fondations et le sol d'assise d'où, la variabilité spatiale des caractéristiques mécaniques du sol est négligée dans les modèles numériques des systèmes sol-structure.

L'approche adoptée dans ce papier est basée sur le couplage entre les techniques numériques de calcul de structures avec la modélisation stochastique des caractéristiques géo-mécaniques des sols. Ce présent modèle permet d'acquérir une vision plus fiable du comportement mécanique des infrastructures de génie civil tenons compte, de l'interaction avec les sols d'assises, le comportement élastoplastique ainsi que la variabilité des caractéristiques géo-mécanique tout le long de l'interface sol-structure.

2 État de l'art

Parmi les travaux de recherches qui ont initié la modélisation des problèmes d'interactions sol-structures, le modèle de Winkler [1] qui a permis aux chercheurs de développer d'autres approches plus réalistes basées sur la notion du coefficient de réaction de sol. Parmi ces auteurs, l'on peut citer Filonenko-Borodich [2], Pasternak [3], Hetenyi [4], Kerr [5-6] et Hovarth [7]. Plus récemment, S. M. Elachachi et al. [8] ont proposé un modèle tenant compte de la variabilité spatiale de propriétés géo-mécaniques du sol le long des canalisations enterrées par le biais d'approches probabilistes. L'influence de l'aspect dynamique par chargement sismique a fait l'objet des travaux de D. Nedjar et al [9] pour le cas des conduites enterrées. Dans ce même contexte, Mekki et al. [10] ont montré comment la nature et la variabilité spatiale des sols influent sur les réponses dynamiques des structures de génie civil avec prise en compte de l'interaction sol-structures (SSI).

N. Kazi Tani et al. [11] ont proposé des solutions plus réalistes et ce, par l'incorporation du comportement non linéaire du sol combiné à sa variabilité spatiale pour le cas de la modélisation numérique des pipelines. Durant ces dernières années, plusieurs tentatives tenant compte de la présence des défauts structuraux [12], la non linéarité géométrique [13], et d'autres aspects plus complexes [14-17] ont été effectuées dans le but de mettre à la disposition des concepteurs des outils plus performants permettant d'améliorer la fiabilité structurelle et d'optimiser les sections des éléments des infrastructures en interaction avec les milieux complexes.

La démarche proposée dans ce papier illustre quelques résultats permettant l'amélioration de la fiabilité structurelle des systèmes des fondations superficielles avec la prise en compte simultanée du comportement élastoplastique du sol et de sa variabilité spatiale. Dans le modèle numérique proposé, nous avons supposé que le comportement de l'ouvrage enterré est élastique-linéaire quoique la loi constitutive du sol est considéré élastoplastique. La résolution du problème de la flexion est effectuée conformément aux hypothèses du modèle de Winkler [1] où la déformation de cisaillement est négligée par la supposition que la réaction du sol peut être modélisée par un seul coefficient k_s , indépendant de la charge appliquée. La mise en œuvre de ce modèle permet de refléter d'une manière plus réaliste le comportement mécanique des infrastructures de génie civil et conduisant vers une conception meilleure dotée d'une rentabilité économique optimale.

3 Discrétisation et formulation du modèle numérique

L'élément illustré en Figure 1, représente le modèle discret du système sol-fondation de longueur L où, k_i est le coefficient de réaction du sol déterminé à partir des essais géotechnique, $q(x)$ représente le chargement statique appliqué sur la fondation et EI , sa rigidité à la flexion. Les grandeurs suscitées ainsi que les conditions aux limites représentent les paramètres d'entrée du modèle, ses paramètres de sortie concernent, les réponses structurelles du système sol-fondation et principalement le champ de déplacements, gouverné par les équations ci-dessous:

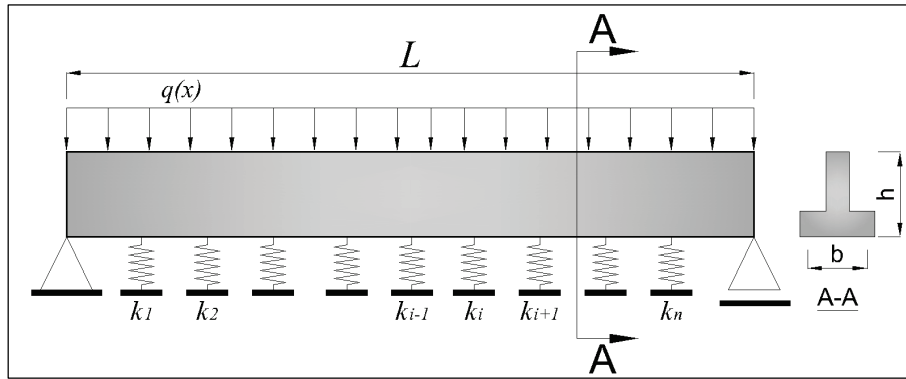


Fig. 1 – Discrétisation d'un tronçon de fondation sur appuis élastiques

$$q(x) - ky = -\frac{dV(x)}{dx} \tag{1}$$

$$V(x) = -\frac{dM(x)}{dx} \tag{2}$$

$$M(x) = EI \frac{d^2 y(x)}{dx^2} \tag{3}$$

$$\frac{d^2}{dx^2} \left(EI \frac{d^2 y}{dx^2} \right) = q(x) - ky \tag{4}$$

$V(x)$ représente l'effort tranchant interne, $M(x)$ est le moment fléchissant et EI , la rigidité à la flexion de la fondation. Le tronçon de la fondation est discrétisé en éléments de longueur dx , les différents ordres du modèle discret de l'équation (4) peuvent être développés comme suit :

$$\frac{dy}{dx} = \frac{y_{i+1} - y_{i-1}}{2(dx)} = \frac{y_i - y_{i-1}}{dx} \tag{5}$$

$$\frac{d^2 y}{dx^2} = \frac{y_{i+1} - 2y_i + y_{i-1}}{dx^2} \tag{6}$$

$$\frac{d^3 y}{dx^3} = \frac{y_{i+2} - 3y_{i+1} + 3y_i - y_{i-1}}{dx^3} \tag{7}$$

$$\frac{d^4 y}{dx^4} = \frac{y_{i+2} - 4y_{i+1} + 6y_i - 4y_{i-1} + y_{i-2}}{dx^4} \tag{8}$$

Finalement, le modèle aux différences finies du système sol-fondation se présente sous la forme :

$$EI \left(\frac{y_{i-2} - 4y_{i-1} + 6y_i - 4y_{i+1} + y_{i+2}}{dx^4} \right) = -ky_i + q(x) \tag{9}$$

4 Modèle élasto-plastique du sol et de sa variabilité spatiale

L'aspect élastoplastique du sol concerne la loi de comportement gouvernée par le modèle élastique parfaitement plastique (EPP) de Mohr-coulomb, Figure 2, où les paramètres q_{max} , y_e sont obtenus par le biais des relations (10-11) en fonction des contraintes principales σ_1 et σ_3 .

$$q_{max} = 2c \cdot \cos\varphi - (\sigma_1 + \sigma_3) \sin\varphi \tag{10}$$

$$y_e = \frac{q_{max}}{k_{sol}} \tag{11}$$

c et φ représentent respectivement, la cohésion et l’angle de frottement du sol.

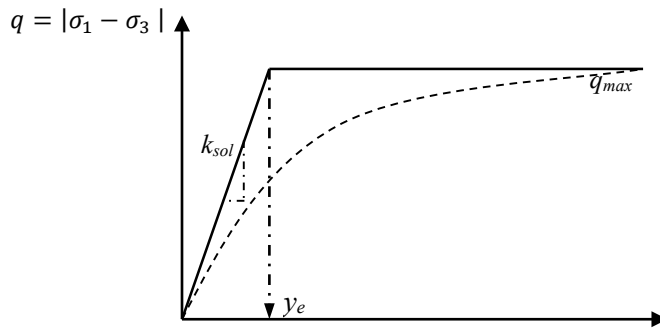


Fig. 2 – Loi de comportement constitutive du sol de type, élastoplastique

Le coefficient de réaction du sol k_{sol} est calculé à partir de la loi de Vesic [18-19] en fonction des modules de Young du sol et la fondation E_s, E_c , de l’inertie I_c de la semelle et de sa largeur D_{ext} . μ représente le coefficient de poisson du sol.

$$k_{sol} = \frac{0,65}{D_{ext}} \cdot \sqrt[1,2]{\frac{E_s D_{ext}^4}{E_c I_c}} \cdot \frac{E_s}{1 - \mu^2} \tag{12}$$

L’hétérogénéité du sol le long de la fondation est modélisée par le biais des méthodes probabilistes basées sur l’approche de Monte-Carlo et permettant de quantifier l’influence de la variabilité spatiale de la raideur du sol par une étude paramétrique non exhaustive. L’approche adoptée consiste à combiner le modèle aux différences finies avec les possibilités de la modélisation stochastique. La méthode de Monte-Carlo se présente en trois étapes à savoir, la discrétisation du champ aléatoire, le calcul déterministe par la M.D.F et l’analyse statistique des réponses de la structure après avoir effectué un nombre conséquent de simulations pour chaque réalisation, ce dernier est fonction de la complexité et l’importance de la structure analysée. À titre indicatif, les simulations présentées dans la dernière partie de cet article, sont effectuées par le biais d’un code de calcul développé sous MATLAB pour 500 réalisations, Figure 4.

Le champ aléatoire des coefficients de réaction du sol $k_{sol}(x)$ est décrit par la moyenne, la variance ou les moments statistiques d’ordre 1 et 2 et l’échelle de fluctuation L_c qui représente la distance au-delà de laquelle la corrélation spatiale entre les propriétés est perdue. Dans une zone (i) de longueur D_i , les écarts de k_{sol} sont exprimés respectivement par :

$$\text{Var}[k_{sol}(D_i)] = \sigma_k^2 \gamma(D_i) \tag{13}$$

Et leurs moyennes locales sont respectivement :

$$E_S[k_{sol}(D_i)] = m_k \tag{14}$$

La moyenne m_k est considérée constante pour le champ entier. La fonction de variance γ de l’ensemble du champ de $k_{sol}(x)$ est exprimée comme suit :

$$\gamma(D_i) = \frac{2}{D_i} \int_0^{D_i} \left(1 - \frac{x}{D_i}\right) \psi(x) dx \tag{15}$$

$\gamma(D_i)$ quantifie la réduction de la variance due à la moyenne du processus aléatoire et est liée à la fonction de corrélation $\psi(\tau)$ avec :

$$\psi(\tau) = 1 - \frac{|\tau|}{L_c} \quad \tau \text{ varie entre } 0 \text{ et } L_c \tag{16}$$

A partir des équations (15) et (16), on obtient la fonction de variance

$$\gamma(D_i) = \begin{cases} 1 - \frac{D_i}{3L_c} & , \text{ pour } D_i \leq L_c \\ \frac{L_c}{D_i} \left(1 - \frac{L_c}{3D_i}\right) & , \text{ pour } D_i \geq L_c \end{cases} \tag{17}$$

Donc, il est plus facile de construire le champ aléatoire pour l'ensemble du système par la matrice de covariance C_{ij} des coefficients de réaction du sol correspondant à la corrélation entre deux zones de longueur D_i et D_j . L'algorithme proposé par Fenton et VanMarcke [23] permet de générer des variables aléatoires avec une distribution normale standardisée des coefficients de réaction du sol.

$$C_{ij} = \frac{\sigma_k^2}{2} [(t-1)^2 \gamma[(t-1)D] - 2t^2 \gamma(tD) + (t+1)^2 \gamma[(t+1)D]] \tag{18}$$

Avec $t=|i-j|$, correspond à la valeur absolue de la différence entre les numéros de zones i et j . Les valeurs aléatoires du coefficient de réaction du sol dont la moyenne m_k et la variance σ_k^2 satisfont à une distribution log-normale.

5 Simulations et discussions des résultats

5.1 Modélisation d'une semelle filante sur un sol à propriétés géo-mécaniques aléatoires

Dans cette partie, les résultats présentés concernent le cas d'une fondation type semelle filante en béton armé ($E_c = 30000$ MPa) ayant une longueur de 25.0 m et dont la largeur de sa section transversale est de 1.0m ($I_c = 0.0634$ m⁴). La structure est simplement appuyée à ses extrémités $y(0)=y(L)=0$ (Figure 1), supportée par des appuis élastiques sur sa longueur et soumise à l'action d'une charge uniformément répartie ($Q=61.25$ kN/ml) résultante du poids des terres des remblais au-dessus de la fondation, de son poids propre et celui du mur voile. L'analyse a été menée sur la base d'un calcul non-linéaire suivant le modèle de Mohr-Coulomb (EPP) pour deux types de sol : argile raide et argile molle, [20-22] dont les propriétés sont représentées dans le Tableau.1 ci-dessous.

Tableau 1. Propriétés mécaniques des sols

	E [MPa]	Coeff. Poisson. μ	Cohésion c. [MPa]
Argile Raide	12,5	0,35	0,05
Argile Molle	6,0	0,40	0,0125

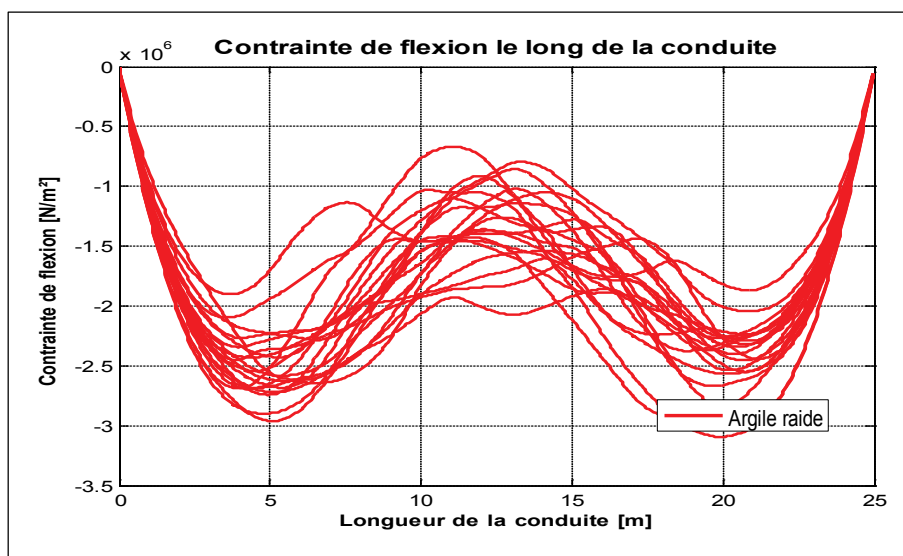


Fig. 3 – Contraintes de flexion le long de la semelle pour quelques réalisations du coefficient de réaction du sol k_{sol} (Argile raide- $L_c=0.5m$)

Le calcul est effectué pour chaque réalisation issue de la base stochastique générée par la méthode de Monte Carlo en fonction de la moyenne du coefficient de réaction du sol $\overline{k_{sol}}$ et sa variance. Les réponses structurelles de la semelle sont

représentées à la Figure 3 pour quelques réalisations formant une enveloppe décrivant les valeurs limites des contraintes normales qui peuvent être utiles pour la vérification de la résistance de la fondation.

Les courbes des fonctions de distribution cumulée représentées à la Figure 4 permettent de quantifier les probabilités de dépassement des valeurs de déflexions maximales et d'orienter la conception de la fondation vers le dimensionnement le plus optimal et ceci en fonction des sollicitations les plus représentatives sachant que les sollicitations adoptées dans la conception des systèmes de fondations sont liées principalement à la répartition des rigidités au niveau des interfaces fondation-sol. Pour les longueurs de corrélation faibles ($L_c=0.5-2.5m$), l'enveloppe des courbes représentées dans la Figure 4, semble relativement serrée par rapport aux valeurs de déflexions (en abscisse), enregistrées pour l'ensemble des 500 aléas du coefficient de réaction du sol k_{sol} . Cette tendance est valable pour les deux types de sol, argile molle et argile raide.

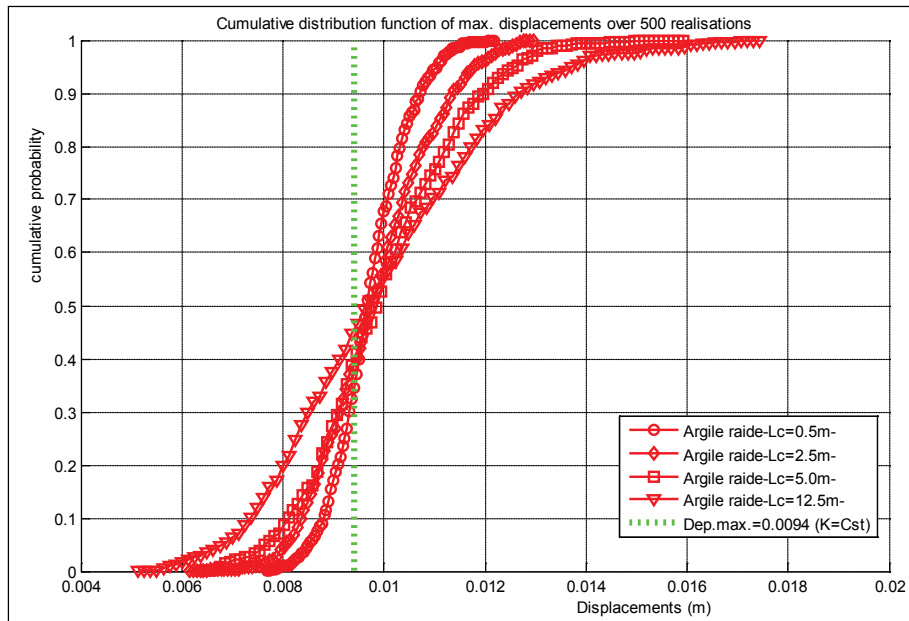


Fig. 4 –Fonctions de distribution cumulée des déflexions maximales pour 500 réalisations et différentes valeurs de la longueur de corrélation ($L_c=0.5-2.5-5.0m$ et $12.5m$) –Argile Raide-

Les simulations effectuées pour le cas où les propriétés géo-mécaniques du sol sont supposées constantes tout le long de la semelle, donnent un déplacement maximal de ($Defl.max=0.0094m$) pour le cas des argiles raides (Figure 4) et ($Defl.max=0.0975m$) pour le cas des argiles molles. Ces valeurs montrent que l'écart entre les déflexions maximales évaluées pour les deux cas de figures (avec et sans prise en compte de la variabilité du sol) devient important pour le cas des argiles molles (faible rigidité du système). En outre, l'influence de l'aspect aléatoire du sol est relativement plus prononcée pour le cas des argiles molles, par contre, pour le cas des argiles raides et sous le même chargement, l'effet de la variabilité du sol sur les réponses de la conduite diminue (Figure 4).

Les valeurs de la longueur de corrélation L_c et le nombre de simulations restent toujours des paramètres déterminants présentant une influence significative sur les réponses de la fondation. Nous rappelons qu'il est recommandé de procéder au choix de ces paramètres par le biais d'une analyse particulière basée sur la nature du sol, de la structure et sa topologie. Les principaux facteurs gouvernant le comportement mécanique de la fondation à savoir, les propriétés géo-mécaniques du sol et leurs variabilités ainsi que les longueurs de fluctuation nous permettent de quantifier les risques structurels qui peuvent affecter les systèmes de fondations et cela par le dépassement de certaines valeurs caractéristiques de déplacements ou de contraintes.

5.2 Comparaison entre un comportement élastique et élastoplastique du sol pour les mêmes variabilités de k_{sol}

Dans cette section, nous allons concentrer notre attention sur l'avantage pratique de la prise en compte de l'aspect élastoplastique du sol dans la conception des structures enterrées. Les simulations effectuées concernent un tronçon de canalisation souterraine articulé aux extrémités, de 1.5m de diamètre, s'étalant sur une longueur de 50.0m et soumise à une charge uniformément répartie ($Q = 79.5$ kN/ml). Le système est supporté par des sols cohérents de type, argile raide et argile

molle. Les simulations numériques effectuées pour le cas du comportement élastique linéaire (EL) et élastoplastique (EP) du sol de type argile raide, (Figures 5-6), sont basées sur les mêmes variabilités des propriétés géo-mécaniques k_{sol} , et ceci, pour une seule réalisation issue de la base de données stochastique générée par le biais de l'approche probabiliste de Monte Carlo pour une longueur de corrélation, $L_c=1.0m$.

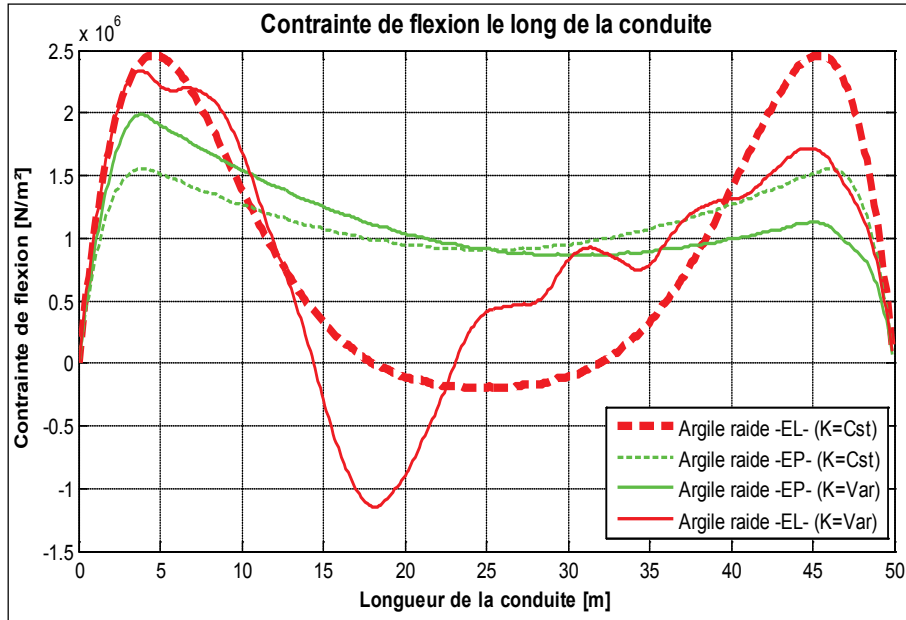


Fig. 5 – Répartition des contraintes de flexion le long de la conduite pour le cas du comportement élastique linéaire (EL) et élastoplastique (EP) du sol (Argile raide - $L_c=1.0m$).

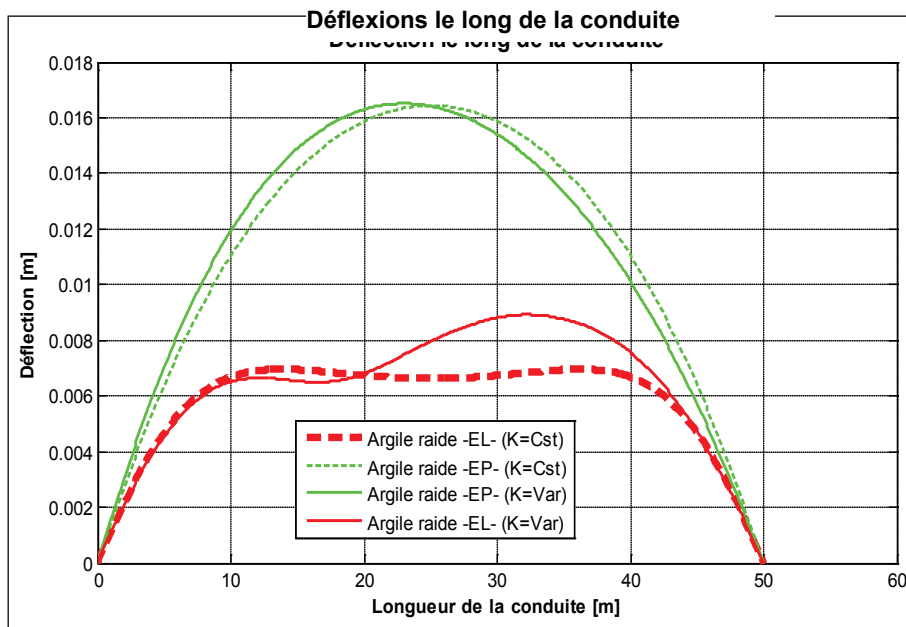


Fig. 6 – Déflexions de la conduite pour le cas du comportement élastique linéaire (EL) et élastoplastique (EP) du sol (Argile raide - $L_c=1.0m$).

Les mêmes calculs ont été reproduits pour les mêmes structures mais cette fois-ci, pour un sol de type argile molle, et cela pour évaluer l'influence des propriétés géo-mécaniques, k_{sol} , sur le comportement de la canalisation pour les deux cas de figures, comportement élastique linéaire (EL) et élastoplastique (EP) du sol, (Figures 7-8).

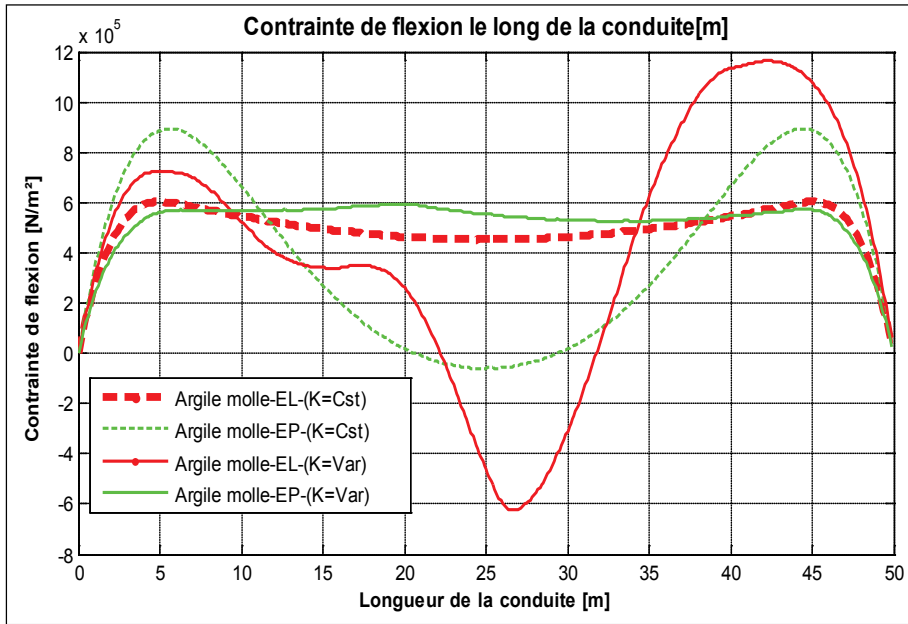


Fig. 7 – Répartition des contraintes de flexion le long de la conduite pour le cas du comportement élastique linéaire (EL) et élastoplastique (EP) du sol (Argile molle - $L_c=1.0m$).

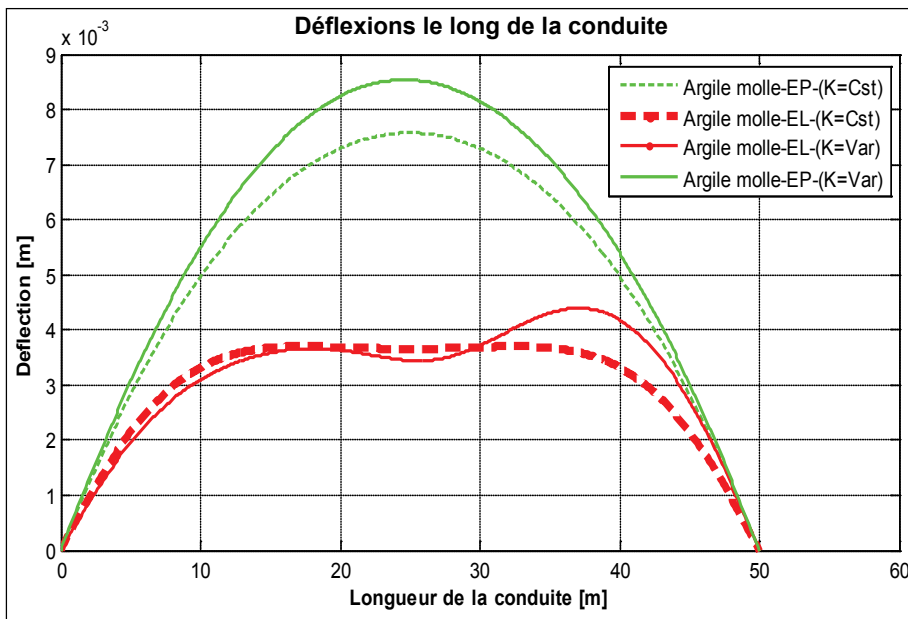


Fig. 8 – Déflexions de la conduite pour le cas du comportement élastique linéaire (EL) et élastoplastique (EP) du sol (Argile molle - $L_c=1.0m$).

Les tendances de courbes de déflexions (Figures. 6 et 8), représentées pour les mêmes variabilités du coefficient de réaction du sol, pour ($L_c=1.0m$) montrent que le calcul des réponses de la canalisation pour un comportement élastoplastique du sol donne toujours les valeurs les plus défavorables et cela, indépendamment de la variabilité spatiale des propriétés géo-mécaniques du sol, notamment si la rigidité du système sol-conduite est relativement faible (argiles molles). Sur les mêmes graphes, il est important de constater que la dispersion entre les valeurs des réponses de la canalisation est relativement beaucoup plus prononcée au niveau de la partie centrale de la conduite. Cette tendance apparaît d’une manière significative pour les cas où la structure repose sur des argiles raides (Figures 5-6).

Pour l’ensemble des simulations effectuées, le calcul élastoplastique combiné avec la modélisation stochastique des propriétés géo-mécaniques du sol donne toujours les valeurs ultimes des déflexions qui sont utiles pour les vérifications liées

aux états limites de service. Par contre, le calcul élastique linéaire donne toujours les valeurs ultimes des contraintes de flexion et cela, pour les deux types de sols (argiles molles et argiles raides) et indépendamment de la prise en compte de la variabilité spatiale des propriétés géo-mécaniques des sols.

Par conséquent et pour la majorité des cas, la modélisation basée sur le comportement élastique parfaitement plastique du sol pourra mener à une conception plus réaliste et offre plus de sécurité aux ouvrages en interaction avec les sols cohérents. La combinaison du calcul élastoplastique avec les approches probabilistes d'évaluation des propriétés géo-mécaniques du sol supportant la canalisation nous permet d'avoir une prédiction plus réaliste et plus précise des sections critiques et des zones de concentration de contraintes qui nécessite une attention particulière notamment pour le cas des structures enterrées des ouvrages de grande importance de l'infrastructure urbaine.

6 Conclusion

L'analyse probabiliste de la variabilité spatiale des propriétés du sol est effectuée par l'approche de VanMarcke [23], basée sur la théorie de la moyenne locale, a donc été utilisée en combinaison avec les simulations de Monte Carlo. Pour l'ensemble des simulations effectuées, les courbes représentées en Figure 3 forment une enveloppe des valeurs ultimes des réponses de la semelle filante et permettent d'avoir une base de données conséquente de sollicitations permettant le dimensionnement des sections de la fondation. Le calcul non linéaire est effectué pour chaque réalisation issue de la base stochastique générée à base de la moyenne du coefficient de réaction du sol (k_{sol}) et de sa variance.

Les courbes de fonctions de distribution cumulée (Figure 4) permettent de quantifier les probabilités des valeurs de déplacements maximales pour les 500 réalisations et d'orienter la conception de la fondation vers le dimensionnement le plus optimal en fonction des sollicitations les plus représentatives sachant que celles adoptées dans la conception des systèmes de fondations sont liées principalement à la répartition des rigidités au niveau des interfaces fondation-sol.

Les valeurs de la longueur de corrélation L_c ainsi que le nombre de simulation ont une influence significative sur le calcul des réponses de la fondation et leurs choix doit faire l'objet d'une analyse particulière en fonction de la nature de la structure et sa topologie. La variabilité spatiale des propriétés géo-mécaniques représente l'un des paramètres les plus importants qui permet de quantifier les risques structurels susceptibles d'affecter les systèmes de fondations et aussi, de mener la conception des infrastructures de génie civil vers des solutions plus optimales en termes de durabilité structurelle et fiabilité mécanique.

En perspective, nous comptons vivement étayer cette présente analyse à l'étude de l'influence d'autres paramètres afin d'acquérir plus de connaissances en décrivant les propriétés mécaniques du sol en l'occurrence le module d'Young (E). En outre, des comparaisons avec des résultats expérimentaux ou même sur des calculs dynamiques seront prévues pour différents types de chargements et conditions aux limites et ce, pour donner plus d'intérêt pratique à cette présente thématique.

REFERENCES

- [1]- E. Winkler, The teaching of elasticity and strength with special regard to their application in technology for polytechnic schools, construction academies, engineers, mechanical engineers, architects, etc. (In German) Ed. H. Dominicus, 1867
- [2]- MM. Filonenko-borodich, Some approximate theories of the elastic foundation. *Uchenyie Zapiski Moskovskogo Gosudarstvennogo Universiteta, Mekhanika*, (in Russian) 18 (1940) 46-3.
- [3]- PL. Pasternak, On a new method of analysis of an elastic foundation by means of two foundation constants. (in Russian) Gosudarstvennoe Izdatelstvo Literaturi po Stroitelstvu Arkhitekture, Moscow, USSR, 1954.
- [4]- M.A. Hetényi, A general solution for the bending of beams on an elastic foundations of arbitrary continuity. *J. Appl. Phys.* 21(1) (1950) 55-58. doi:10.1063/1.1699420
- [5]- A.D. Kerr, Elastic and viscoelastic foundation models. *J. Appl. Mech-T. ASME* 31(3) (1964) 491-498. doi:10.1115/1.3629667
- [6]- A.D. Kerr, A study of a new foundation model. *Acta Mech.* 1(2) (1965) 135-147. doi:10.1007/BF01174308
- [7]- J.S. Horvath, Beam-column-analogy model for soil-structure interaction analysis. *J. Geotech. Eng-ASCE* 119(2) (1993) 358-364. doi:10.1061/(ASCE)0733-9410(1993)119:2(358)
- [8]- S.M. Elachachi, D. Breyse, L. Houy, Longitudinal variability of soils and structural response of sewer networks. *Comp. Geotech.* 31(8) (2004) 625–641. doi:10.1016/j.compgeo.2004.10.003
- [9]- D. Nedjar, M. Hamane, M. Bensafi, S.M. Elachachi, D. Breyse, Seismic response analysis of pipes by a

- probabilistic approach. *Soil Dyn. Earthq. Eng.* 27(2) (2007) 111-115. doi:10.1016/j.soildyn.2006.06.001
- [10]- M. Mekki, S.M. Elachachi, D. Breyse, M. Zoutat, Seismic behavior of R.C. structures including soil-structure interaction and soil variability effects. *Eng. Struct.* 126(1) (2016) 15–26. doi:10.1016/j.engstruct.2016.07.034
- [11]- N. Kazi Tani, D. Nedjar, M. Hamane, Non-linear analysis of the behavior of buried structures in random media. *Eur. J. Environ. Civ. En.* 17(9) (2013) 791–801. doi:10.1080/19648189.2013.822426
- [12]- N. Kazi Tani, D. Nedjar, T. Tamine, M. Hamane, A Probabilistic Assessment for Failure Prediction of Buried Cracked Spread Foundations. *Arab. J. Sci. Eng.* 42(3) (2017) 1161–1170. doi:10.1007/s13369-016-2368-z
- [13]- M. Seguni, D. Nedjar, Modelling of soil–structure interaction behaviour: geometric nonlinearity of buried structures combined to spatial variability of soil. *Eur. J. Environ. Civ. En.* 21(10) (2016) 1217-1236. doi:10.1080/19648189.2016.1153525
- [14]- S. Imanzadeh, D. Breyse, A. Marache, Settlement uncertainty analysis for continuous spread footing on elastic soil. *Geotech. Geol. Eng.* 33(1) (2015) 105-122. doi:10.1007/s10706-014-9828-6
- [15]- A. Khemis, A.H. Chaouche, A. Athmani, K.F. Tee, Uncertainty effects of soil and structural properties on the buckling of flexible pipes shallowly buried in Winkler foundation. *Struct. Eng. Mech.* 59(4) (2016) 739-759. doi:10.12989/sem.2016.59.4.739
- [16]- M. Zoutat, S.M. Elachachi, M. Mekki, M. Hamane, Global sensitivity analysis of soil structure interaction system using N2-SSI method. *Eur. J. Environ. Civ. En.* 22(2) (2018) 192-211. doi:10.1080/19648189.2016.1185970.
- [17]- T. Wood, M. Karstunen, Modelling the creep of deep foundations in soft Gothenburg clays. *Eur. J. Environ. Civ. En.* (2017). doi:10.1080/19648189.2017.1344146
- [18]- A.S. Vesic, Bending of Beams Resting on Isotropic Elastic Solid. *J. Eng. Mech-ASCE* 87(2) (1961) 35-53.
- [19]- A.S. Vesic, Beams on Elastic Subgrade and the Winkler's Hypothesis. In: *Proceedings of the 5th International Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, 1961, pp. 845-850.
- [20]- A.S. Vesic, *Foundation Engineering Handbook*. Ed. H.F. Winterkorn and K.Y. Fang, Van Nostrand Reinhold Company, New York, 1975.
- [21]- T.W. Lambe, R.V. Whitman, *Soil Mechanics*. Ed. John Wiley, 1969.
- [22]- G. Filliat, *The practice of soils and foundations*. (in French), Edition du moniteur, 1981.
- [23]- G.A. Fenton, E.H. VanMarcke, Simulation of random fields via local average subdivision. *J. Eng. Mech-ASCE* 116(8) (1990) 1733–1749. doi:10.1061/(ASCE)0733-9399(1990)116:8(1733)
- [24]- E. VanMarcke, *Random fields: analysis and synthesis*. Cambridge, MA, London, England: MIT, 1983.