

ANALYSE ET MODÉLISATION FIABILISTES DES CONDUITES ENTERRÉES SOUS ACTION SISMIQUE ET VARIABILITÉ SPATIALE DU SOL

S.M. ELACHACHI, H. BENZEGUIR

Université Bordeaux I, Ghymac, bat B18, Av des Facultés, 33405 Talence,
Université de Sidi Bel Abbès, BP 89 Cité Ben M'hidi, Sidi Bel Abbès, Algérie

1. INTRODUCTION

Les dysfonctionnements et les dommages observés dans les réseaux de canalisations enterrées, tels que les réseaux d'assainissement, sont principalement dus à l'hétérogénéité des conditions géotechniques, dans le sens longitudinal, et aux actions appliquées, en particulier l'action sismique. Les défauts dans le sol (tassements différentiels le long de la conduite, glissement de terrain, vides pouvant apparaître autour de la conduite, etc.) et l'accélération maximum du sol produisent des contraintes (pouvant mener à un état limite ultime) et des déplacements (pouvant compromettre le bon fonctionnement et atteindre ainsi un état limite de service). Il est à noter qu'il n'est pas tenu compte dans les normes européennes actuelles [EUR,97] de l'influence de la variabilité du sol.

2. MODÉLISATION DE LA CONDUITE

2.1 Modèle de Pasternak

Parmi tous les modèles existant qui décrivent le comportement d'une poutre dans un sol et de leur interaction, le modèle de Pasternak [PAS,54] semble pertinent.

L'interaction sol-conduite se traduit par une force répartie dans le sol $R(x)$ (en N/m), qui s'oppose au mouvement transversal de la canalisation, donnée par l'expression [1] :

$$R(x) = p(x) \cdot D_{\text{ext}} \quad [1]$$

Où $p(x)$ est la pression sous la conduite (en Pa), et D_{ext} le diamètre extérieur de la conduite (en m). La contrainte répartie $p(x)$ selon le modèle de Pasternak est exprimée par :

$$p(x) = k_w \cdot w(x) - k_s \frac{d^2 w}{dx^2} \quad [2]$$

Où k_w est le coefficient de réaction du sol ou coefficient de Winkler (en N/m³ ou Pa/m), k_s est le coefficient de réaction en cisaillement du sol (en N/m) et $w(x)$ le déplacement vertical (transversal) de la conduite.

Le modèle de Pasternak considère le sol comme étant un système de ressorts voisins élastiques identiques, indépendants, discrets à comportement linéaire, reliés par « une couche de cisaillement » fictive incompressible, d'épaisseur unitaire, qui traduit uniquement la résistance verticale du sol aux forces de cisaillement. Ceci peut être considéré comme un raffinement du modèle de Winkler qui souffre de la non prise en compte du cisaillement dans sa description. L'utilisation du modèle à deux paramètres, k_w et k_s pour caractériser la réponse du sol, peut sembler trop simplifiée, cependant une telle simplification est cohérente si l'on tient

compte de la variabilité et des incertitudes liées à la caractérisation d'un sol. Les corrélations spatiales qui sont introduites permettent une description des déplacements proche de celle d'un milieu continu. Il convient de noter que les deux coefficients k_w et k_s ne sont pas des paramètres spécifiques au sol. Ils sont également affectés par la rigidité de la conduite. Ces paramètres de rigidité dépendent de la longueur et/ou la largeur (diamètre) de la conduite, de la profondeur de pose, du type de matériau utilisé et du type de lit de pose. La valeur de ces coefficients ne peut être approchée que par des expressions semi-empiriques. Pour un même ensemble de valeurs, une étude paramétrique [ELA,94a] a montré que par exemple, le coefficient k_w variait dans un rapport de 1 à 3 selon les auteurs. D'autre part, il n'existe pas dans la littérature actuelle d'expressions suffisamment fondées du coefficient k_s à partir de données matérielles et/ou géométriques [MOR,02].

Afin d'intégrer l'amortissement du système, le modèle de Pasternak est adapté et étendu au modèle de Kelvin-Voigt en ajoutant, comme cela est montré à la figure 1, des amortisseurs.

2.2 Paramètres gouvernant le comportement

Le système d'interaction sol-conduite présenté à la figure 1, est gouverné par un paramètre géométrique L (longueur de la conduite) et trois paramètres relatifs adimensionnels correspondant à des ratios de rigidité :

r_p : du sol par rapport à la conduite,
 r_{ks} : de la compression du sol par rapport à son cisaillement,
et r_{joint} : du joint par rapport à la conduite.

La rigidité relative sol-conduite r_p est définie par l'expression [3] :

$$r_p = \frac{1}{L} \sqrt{\frac{E_p I}{k_w}} \quad [3]$$

avec E_p , I , L respectivement, le module de Young de la conduite, le moment d'inertie de la section droite de la conduite, la longueur de la conduite.

Le paramètre r_{ks} qui relie le coefficient de Winkler k_w au coefficient de cisaillement k_s est défini par :

$$r_{ks} = \frac{k_s}{k_w D_{ext}^2} \quad [4]$$

L'étanchéité entre conduites est assurée par des joints en mortier de ciment ou plus fréquemment à base d'élastomère. La rigidité R_j de ces joints est aussi variable que les techniques utilisées pour leur réalisation. Elle peut être faible (joints souples) ou élevée (assemblages soudés). Il est difficile d'estimer les valeurs numériques de la rigidité du joint, même si certaines expériences de laboratoire ont été menées pour cette question [BUC,06]. Nous supposons la continuité des déplacements verticaux à la connexion et contrairement à un modèle de poutre continue, nous avons développé un modèle qui permet d'introduire des discontinuités de la rotation entre les extrémités des conduites. Pour tenir compte de la raideur des joints, nous introduisons la rigidité relative du joint par rapport à la conduite r_{joint} , et défini par :

$$r_{joint} = \frac{R_j L}{E_p I} \quad [5]$$

3. MODÉLISATION DE LA VARIABILITÉ SPATIALE DES SOLS ET DE SES EFFETS : LA LONGUEUR DE CORRÉLATION

Dans de nombreux problèmes de géotechnique, la variabilité des sols est prise en compte en considérant des valeurs conservatives des paramètres du sol résultant d'une longue pratique pour être justifiées [DUN,00]. Les propriétés du sol peuvent être considérées comme spatialement structurées : existence d'une longueur de corrélation l_c (distance au-delà de laquelle les propriétés locales de deux points peuvent être supposés indépendantes). Nous avons choisi de modéliser la variabilité du sol en faisant appel à la théorie de la moyenne locale d'un champ aléatoire, développée par Vanmarcke [VAN,83]. Le champ aléatoire des coefficients k_w ou k_s est défini par trois propriétés : la valeur moyenne \bar{k}_w (respectivement \bar{k}_s), la variance k_w (respectivement k_s) et la taille (ou longueur) de corrélation l_c (respectivement l_{cs}). Un développement complet de cette méthode est effectué dans [ELA,04b]

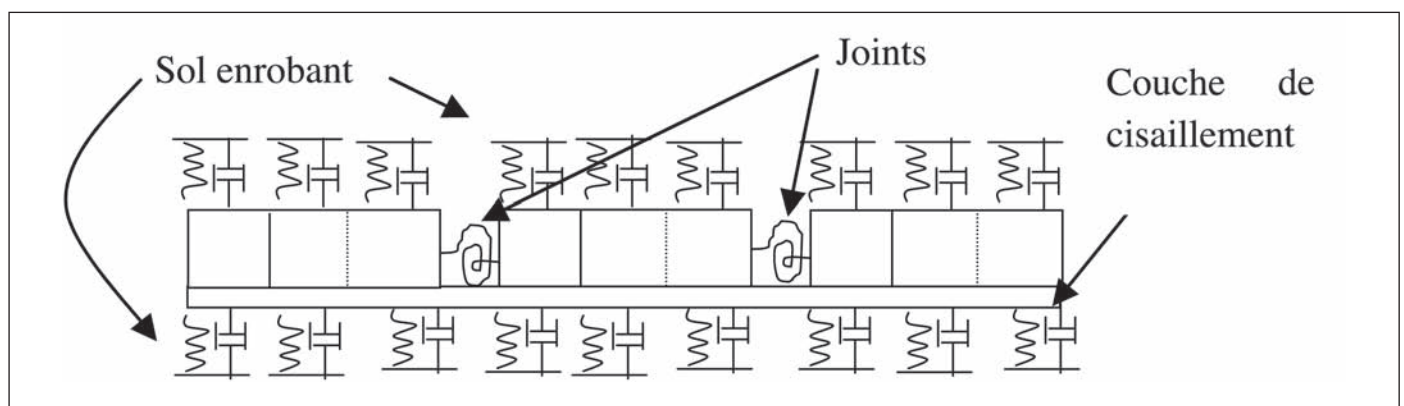


Figure 1. Modèle rhéologique d'une conduite enterrée

4. ÉQUATIONS DU MOUVEMENT DU SYSTÈME SOL-CONDUITE

La réaction du sol au mouvement de la conduite est principalement générée par le mouvement relatif u entre la conduite et le sol (Figure 2). L'équation du mouvement qui gouverne le système est la suivante [NED,07] :

$$[M_p]\{\ddot{U}\} + [C_p + C_s]\{\dot{U}\} + [K_p + K_w + K_s]\{U\} = [C_{st}\dot{u}_s] + [K_w + K_s]\{u_s\} \quad [6]$$

Où M_p est la matrice de masse de la conduite, K_p , K_w et K_s les matrices de rigidité de la conduite et du sol (Winkler et cisaillement), C_p et C_s respectivement les matrices d'amortissement de la conduite et du sol. Il est à noter que les matrices d'amortissement sont construites à partir de l'amortissement de Rayleigh. U , \dot{U} , \ddot{U} , respectivement les vecteurs de déplacement, de vitesse et d'accélération absolus ; u , \dot{u} et \ddot{u} sont les vecteurs de déplacement, de vitesse et d'accélération relatifs, u_s , \dot{u}_s et \ddot{u}_s sont les vecteurs de déplacement, de vitesse et d'accélération du sol.

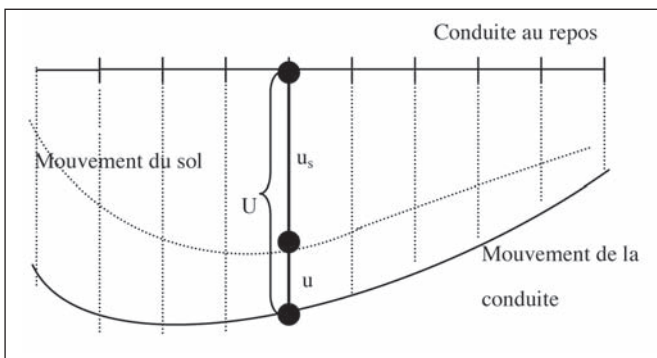


Figure 2. Mouvement de la conduite et du sol

En notant la rigidité totale $[K] = [K_p] + [K_w] + [K_s]$ et l'amortissement total $[C] = [C_p] + [C_{soil}]$, le déplacement absolu $\{U\} = \{u_s\} + \{u\}$, les équations du mouvement en termes relatifs peuvent être réécrites comme suit :

$$[M_p]\{\ddot{u}\} + [C]\{\dot{u}\} + [K]\{u\} = -[M_p]\{\ddot{u}_s\} - [C_p]\{\dot{u}_s\} - [K_p]\{u_s\} \quad [7]$$

Ces équations du mouvement sont résolues à tout instant. Les conditions aux limites peuvent être considérées soit fixes, soit libres si l'on souhaite éliminer les effets de bord dans l'analyse des résultats obtenus.

5. LES FONCTIONS DE PERFORMANCE ET ÉTATS LIMITES

Deux fonctions de performance sont définies:

La première concerne la contre-pente et correspond à un état limite de service (ELS), en mettant en relation le rendement hydraulique de la conduite avec la contre-pente locale. La présence de contre-pentes trop élevées nuit à

l'écoulement des effluents et facilite l'encombrement des canalisations par la sédimentation des particules en suspension. La fonction correspondante de l'état limite est :

$$G_{CS} = CS_R - CS_S \quad [8]$$

Où CS_R est la contre-pente maximum acceptable et CS_S est la contre-pente maximale calculée.

La seconde fonction de performance porte sur les contraintes et définit l'équivalent d'un état limite ultime (ELU), en reliant l'état de fissuration (pour une conduite en béton) aux contraintes de flexion:

$$G_{\sigma} = \sigma_R - \sigma_S \quad (15)$$

où σ_R est la contrainte limite de traction du béton et σ_S la contrainte maximum de flexion calculée. Nous supposons que CS_S ainsi que σ_S suivent des lois de distribution lognormales, et que CS_R et σ_R suivent également des distributions lognormales avec des moyennes et des écarts types respectivement de 4%, 0,8%, et 2,0,3 MPa.

Il convient de noter qu'il n'existe dans la réglementation actuelle aucune limitation de la contre-pente, c'est pourquoi nous avons choisi une limite arbitraire de 4% sur la base de considérations liées à la conception. Les valeurs cibles de l'indice de fiabilité à atteindre sont respectivement de 3,8 à l'ELU et 1,5 à l'ELS pour une durée de vie en service de 50 ans [EUR,97]. A ces deux états limites nous faisons corres-

6. ÉTUDE DE CAS

6.1 Caractéristiques des conduits et du sol

On considère un tronçon de conduites en B.A ($E_p = 25.000$ MPa), de diamètre extérieur $D_{ext} = 1$ m, d'épaisseur 0,08 m, constitué de 20 buses de longueur $L=3$ m chacune. Il repose sur un sol dont le coefficient de Winkler vaut 10 kN/m^3 et le coefficient de réaction de cisaillement de 10 kN/m . Ce type de configuration correspond à un rapport de rigidité conduite-sol r_p de 0,678. Il est à noter que la géométrie de la conduite intervient aussi bien dans l'expression de l'inertie I que dans celle du coefficient de Winkler. Le système est soumis à une charge uniforme déterministe et au séisme d'El-Asnam (Algérie, 1980).

[...] la longueur de la conduite L . Dans les sous-paragraphe suivants, sont analysés:

- l'effet de la longueur de corrélation sur la réponse du système,
- l'effet de la rigidité relative sol-conduite pour une lon-
- l'effet de la rigidité relative joint-conduite.

Les valeurs des [...] à q [...] nues doivent être considérées plutôt de manière comparative que de manière absolue du fait:

- du caractère arbitraire des valeurs retenues pour CS_R et σ_R ,

- du type de loi de distribution probabiliste adoptée,
- des incertitudes épistémiques sur les caractéristiques du sol (k_w , k_s).

6.2 Effet de la longueur de corrélation

L'analyse est effectuée pour des longueurs de corrélation variant de 0,03m à 1500m, (soit 10^{-3} à 10^3). Deux types de joints sont considérés: rigide ($r_{\text{joint}}=10^{-5}$) et flexible ($r_{\text{joint}}=10^{-5}$). Les figures 3 et 4 montrent les indices de fiabilité à l'ELU et à l'ELS.

On peut observer l'existence d'une longueur de corrélation optimale. Les effets les plus défavorables dans la structure. L'évolution de la fiabilité n'est pas monotone. L'existence d'une telle valeur limite est un des invariants des problèmes d'interaction sol (hétérogène)-structure [BRE,05]. Les indices de fiabilité augmentent dans ces deux situations le sol tend à devenir homogène à l'échelle de l'analyse, soit parce que ses variations rapides sont filtrées par la conduite, ou soit ses variations lentes, induisent des valeurs quasi-uniformes entre éléments voisins. Nous avons également observé que pour des joints rigides et pour un fort coefficient de variation de k_w , l'ELU pour des joints flexibles les résultats sont meilleurs. D'un autre côté si l'on considère l'ELS, les joints flexibles fournissent des résultats légèrement plus faibles que ceux des joints rigides. On peut noter donc à ce niveau, un conflit dans le choix de la « longueur idéale » de la conduite pour répondre aux exigences simultanées de l'ELU et de l'ELS.

6.3 Effet de la rigidité relative joint-conduite

Les effets des joints sur le comportement global du système sont analysés en faisant varier la rigidité relative joint-conduite r_{joint} de 10^{-5} à 10^{-1} . Les figures 5 et 6 montrent l'évolution des indices de fiabilité pour différentes valeurs du coefficient de variation de k_w (coefficient de Winkler).

Il est intéressant de souligner la forte influence de la rigidité des joints, puisque la présence de joints rigides pénalise l'ELU du fait qu'ils induisent nécessairement des contraintes significatives. D'un autre côté, la présence de joints flexibles pénalise l'ELS. Il est donc utile de choisir une rigidité de joint intermédiaire permettant d'obtenir le meilleur compromis pour assurer aussi bien l'ELU que l'ELS. Finalement, l'on peut également noter que pour une valeur donnée de r_{joint} , aussi bien l'indice de fiabilité à l'ELU que celui à l'ELS diminuent avec l'augmentation des coefficients de variation de k_w .

6.4 Effet de la rigidité relative sol-conduite

On fait varier le rapport sol-conduite r_p dans l'intervalle [0,4 à 1,7] qui correspond à un intervalle de [100 MPa à 100 kPa] pour le coefficient de Winkler pour quatre valeurs du coefficient de variation ($CV_{k_w} = 0,1; 0,2, 0,4$ et $0,8$).

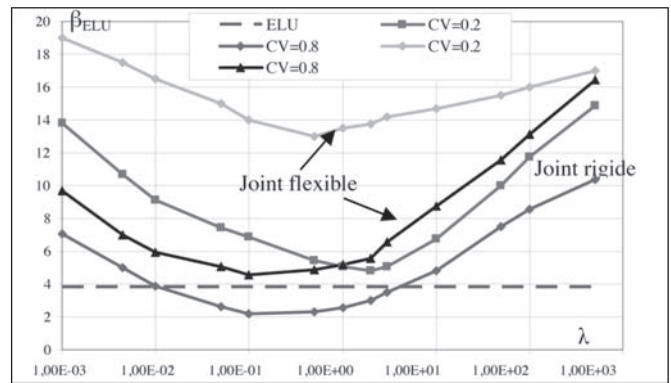


Figure 3. Indice de fiabilité β_{ELU} en fonction du ratio λ pour différentes valeurs du coefficient de variation de k_w et pour deux types de joints.

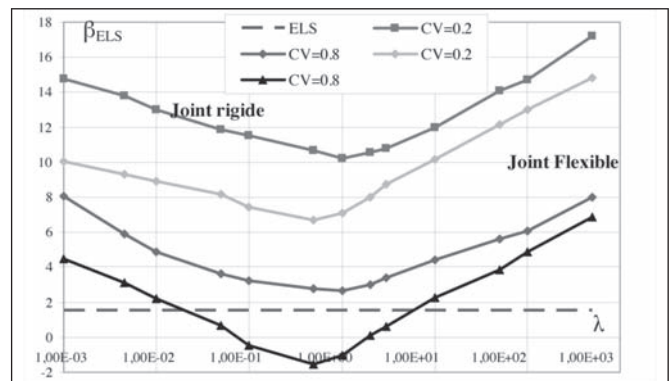


Figure 4. Indice de fiabilité β_{ELS} en fonction du ratio λ pour différentes valeurs du coefficient de variation de k_w et pour deux types de joints.

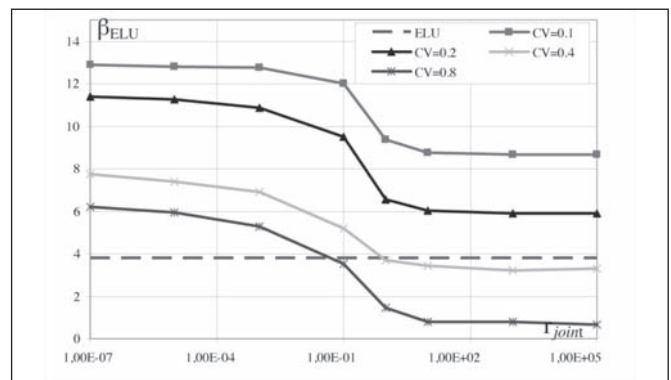


Figure 5. Effet de la rigidité relative joint-conduite sur l'Indice de fiabilité β_{ELU} pour différentes valeurs du coefficient de variation de k_w .

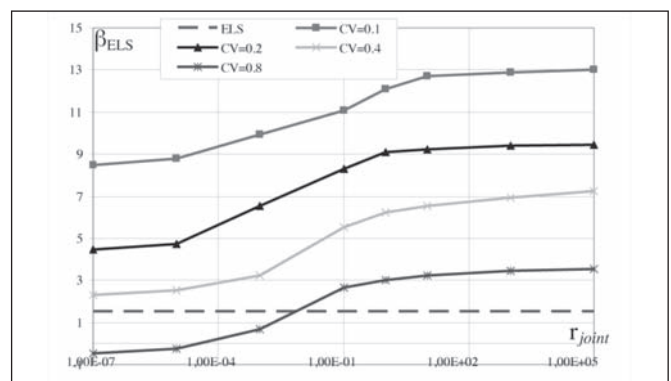


Figure 6. Effet de la rigidité relative joint-conduite sur l'Indice de fiabilité β_{ELS} pour différentes valeurs du coefficient de variation de k_w .

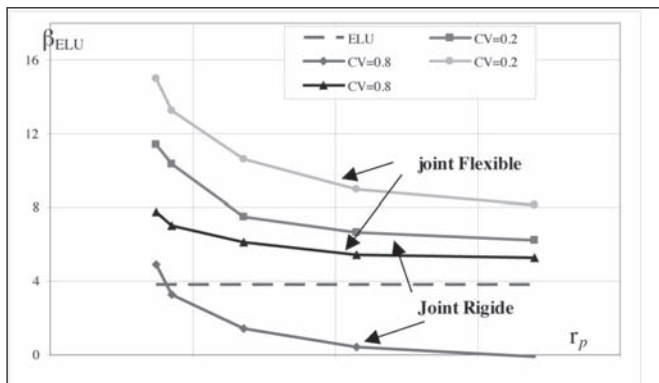


Figure 7. Effet de la rigidité relative sol-conduite sur l'Indice de fiabilité β_{ELU} pour différentes valeurs du coefficient de variation de k_w .

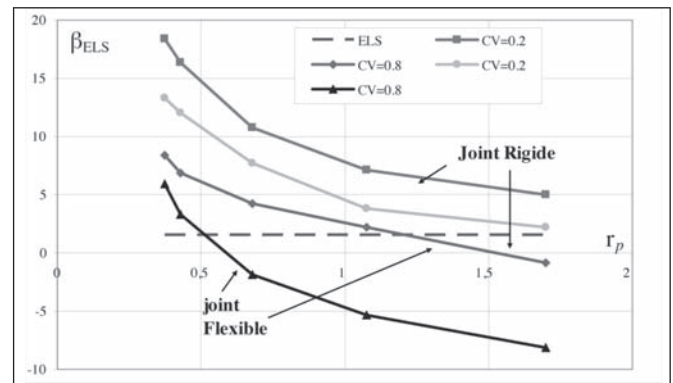


Figure 8. Effet de la rigidité relative sol-conduite sur l'Indice de fiabilité β_{ELS} pour différentes valeurs du coefficient de variation de k_w .

En prenant une longueur de corrélation l_c voisine de la longueur de la conduite, les résultats obtenus sont défavorables vis-à-vis des conditions géotechniques. Les figures 7 et 8 montrent les valeurs des indices de fiabilité. Quelque soit le type de joint, l'indice de fiabilité est plus faible pour les forts rapports sol-conduite, situation correspondant à des tronçons dont soit les conduites ont une rigidité élevée soit la raideur du sol est faible. En présence de joints rigides (Figure 7) et pour un fort coefficient de variation de k_w ($CV=0,8$), l'indice de fiabilité préconisé par l'État (inférieur à 3,8). L'on peut noter que l'accroissement du coefficient de variation induit une réduction de la fiabilité. On peut également voir qu'il est plus intéressant d'avoir des joints flexibles que des joints rigides ; mieux vaut privilégier un faible r_p afin d'assurer « une bonne » fiabilité du réseau. En termes de contre-pentes (Figure 8), il est préférable par contre d'avoir des joints rigides comparativement aux joints flexibles. La garantie d'une meilleure fiabilité des tronçons de conduites reliés par des joints rigides impose que le sol soit relativement homogène. Il est préférable d'être en présence d'un sol qui soit relativement homogène même si ses caractéristiques sont médiocres qu'en présence d'un meilleur sol mais dont l'hétérogénéité est plus prononcée.

7. CONCLUSIONS

Les résultats obtenus à partir de cette étude permettent d'aboutir aux conclusions suivantes:

- (a) les effets (tassements différentiels, moment de flexion, contraintes et fissurations éventuelles) induits uniquement par l'hétérogénéité du sol et qui ne sont nullement décrits lorsque l'hypothèse d'homogénéité est mise en avant,
- (b) l'intensité des contraintes générées dépend principalement de quatre facteurs:
 - la variabilité du sol (i.e. son coefficient de variation),
 - le rapport de rigidité sol-conduite,
 - le rapport de rigidité conduite-joint (flexibilité relative),
 - le rapport de longueur sol-conduite, qui combine l'échelle de fluctuation du sol et une longueur caractéristique de la structure (ici la longueur normalisée de la conduite).

L'intérêt majeur de l'approche présentée dans ce travail est de mieux appréhender les désordres liés aux actions sismiques et les irrégularités géométriques d'un profil en long dans une tranchée de réseau d'assainissement. Ce type d'approche peut également apporter aux experts de nouveaux outils pour un meilleur calibrage du risque (de la sécurité) dans la résolution des problèmes d'interaction sol-structure où la variabilité du sol est un paramètre prépondérant.

BIBLIOGRAPHIE

- [BRE,05] Breyse, D., Niandou, H., Elachachi, S.M. and Houy, L., Generic approach of soil-structure interaction considering the effects of soil heterogeneity. *Geotechnique*, LV(2), 143–150, 2005.
- [BUC,06] Bucu J., Emeriault F., Le Gauffre P., Kastner R., Statistical and 3D Numerical Identification of Pipe and Bedding Characteristics Responsible for Longitudinal Behavior of Buried Pipe, *Pipelines 2006, The Pipeline Division Specialty Conference*, USA, July 30–August 2, 2006,
- [DUN,00] Duncan, J.M., Factors of safety and reliability in geotechnical engineering, *J. Geot. Geoenviron. Eng. ASCE*, 126(4), 307–314, 2000.
- [ELA,04a] Elachachi S.M., M. Bensafi, M. Hamane, D. Nedjar, D. Breyse, Longitudinal flexural behavior of a pipe buried in an heterogeneous embankment, *Geotechnical French Review*, N° 108, pp 17-29, 2004.
- [ELA,04b] Elachachi S.M., D. Breyse, Laurent Houy. Longitudinal variability of soils and structural response of sewer networks, *Computers and Geotechnics*, 31, pp.625-641, 2004.
- [EUR,97] Eurocode 7, *Geotechnical design, Part 1: general rules*, Setra, 1997.
- [MOR,02] Morfidis K., Avramidis I.E., Formulation of a foundation with semi-rigid connections and rigid offsets, *Computers and Structures* 80, pp.1919–1934, 2002.
- [NED,07] Nedjar D., Hamane M., Bensafi M., Elachachi

S.M., Breysse D., Seismic response analysis of pipes by a probabilistic approach, Soil Dynamics and earthquake engineering, vol.27 n°2, pp.111-115, 2007.
 [PAS,54] Pasternak P.L., On a new method of analysis of an elastic foundation by means of two foundation

и метода двух опор
 Literaturi po Stroitelstvu Arkhitecture, Moscow, USSR, 1954.
 [VAN,83] VanMarcke E., Random fields : Analysis and synthesis, M.I.T. Press, 1983.