



**HAL**  
open science

## Prise en compte de la variabilité spatiale du sol dans l'analyse du comportement de palplanches

Abdelhammid Mokeddem, Humberto Yáñez-Godoy, Sidi Mohammed  
Elachachi

### ► To cite this version:

Abdelhammid Mokeddem, Humberto Yáñez-Godoy, Sidi Mohammed Elachachi. Prise en compte de la variabilité spatiale du sol dans l'analyse du comportement de palplanches. Rencontres Universitaires de Génie Civil, May 2015, Bayonne, France. hal-01167688

**HAL Id: hal-01167688**

**<https://hal.science/hal-01167688>**

Submitted on 24 Jun 2015

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

---

# Prise en compte de la variabilité spatiale du sol dans l'analyse du comportement de palplanches

A. Mokeddem<sup>1</sup>, H. Yáñez-Godoy<sup>1</sup>, S. M. Elachachi<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Université de Bordeaux, I2M, département de Génie Civil Environnemental, Talence, France.

---

## RÉSUMÉ

*L'endommagement structurel des ouvrages étendus (à l'exemple des palplanches) est souvent lié aux facteurs d'ordre géotechnique. Ceux-ci sont dus à la méconnaissance ou à la connaissance partielle des données (géotechniques) et à la non prise en compte de la variabilité spatiale du sol (intrinsèque du sol) lors de la conception. D'autre part, les modèles numériques employés pour la modélisation des ouvrages enterrés sont perfectibles en prenant en compte de meilleure manière l'interaction sol-structure. Une comparaison entre deux types de méthodes MISS « Méthode d'interaction sol-structure » (éléments finis (MEF) et coefficient de réaction (CR)) a été menée pour le cas d'une palplanche dans un sol sableux. Les résultats de cette démarche ont permis de retenir la méthode MEF pour sa robustesse et sa précision pour l'utiliser dans l'analyse probabiliste menée par la suite. Cette dernière (analyse probabiliste) consiste à intégrer la variabilité du sol de deux manières différentes : variabilité non structurée et variabilité structurée (spatiale).*

## ABSTRACT.

*Structural damage of extended structures (e.g. sheet piles) is often related to geotechnical factors. These are due to lack of knowledge or partial knowledge of the geotechnical data and also not taking into account the spatial variability of soil when designing. On the other hand, the numerical models used for modelling underground structures can be improved by taking into account soil-structure interaction. A comparison was conducted between two types of SSIM methods "soil-structure interaction methods" (by finite elements (FEM) and subgrade reaction methods (SR)) applied to a sheet pile in sandy soil. From the results of this approach, we retain the FEM for its robustness and accuracy which we use into the probabilistic analysis conducted thereafter. This one (probabilistic analysis) consist to include the soil variability by two different ways: the unstructured variability and the structured variability (spatial).*

*MOTS-CLÉS : interaction sol-structure, variabilité spatiale du sol, méthodes des éléments finis, coefficient de réaction, palplanche.*

*KEY WORDS: soil-structure interaction, soil spatial variability, finite element method, subgrade reaction, sheet pile.*

---

## 1. Introduction

Les paramètres géotechniques décrivant le sol sont principalement l'objet de deux types d'incertitudes: l'incertitude dite aléatoire liée à l'hétérogénéité du sol et à la variabilité de ses propriétés, et l'incertitude dite épistémique liée notamment à sa modélisation [GRE 03]. Dans la pratique géotechnique, la plupart des codes normatifs ([NFP 94], [EUR 97]) adoptent une approche quasi déterministe (par exemple des caractéristiques uniques de chaque couche constitutive d'un sol multicouches). Ils prévoient cependant des facteurs de sécurité permettant de majorer les sollicitations sur l'ouvrage et réduire les capacités portantes. Cette pratique amène le géotechnicien à faire des choix raisonnables et conservateurs pour exprimer les grandeurs physiques et mécaniques du sol [SCH 01].

L'approche déterministe reste cependant incomplète, une analyse probabiliste pour intégrer les incertitudes du sol [ASH 12] semble plus adaptée. En ce qui concerne les palplanches, plusieurs études ont traité le sujet ([WAN 13b], [BAK 14]) en associant l'analyse probabiliste à la méthode de l'équilibre limite (destinée souvent au pré-dimensionnement). On notera par ailleurs que peu de recherches à ce jour ont intégré la variabilité du sol en faisant appel à des méthodes numériques plus performantes (éléments finis, coefficient de réaction, ...). Les rares études qui existent ont un avis partagé sur la pertinence de la prise en compte de l'ISS (l'interaction sol-structure). Schweiger [SCH 01] a procédé à une analyse fiabiliste basée sur la méthode des éléments finis. Ces résultats montrent que les incertitudes géotechniques non-prises en compte peuvent être à l'origine d'un sous-dimensionnement. Une autre étude portée par [SCH 06] a permis de constater que l'effet lié à la variabilité du sol seule est négligé mais nécessite d'être associé à d'autres facteurs tels que la corrosion. Ces deux dernières études se basent sur une variabilité non structurée et n'intègrent pas la variabilité spatiale du sol tel qu'elle l'est réellement. L'objet de la présente étude est de prendre en compte cette variabilité spatiale.

## 2. Modélisation de l'interaction sol-palplanche

### 2.1. Méthode de calcul des palplanches

Il existe deux types de méthodes utilisées habituellement dans l'analyse des palplanches. Elles sont classées selon le mode de calcul vis-à-vis de l'interaction sol-structure. La première catégorie qualifiée de méthode d'équilibre limite est constituée de méthodes analytiques destinées plutôt au pré-dimensionnement et basées sur un calcul classique de poussée et butée  $k_a$  et  $k_p$  (théories de Coulomb ou de Rankine) avec une résolution de type RDM (résistance des matériaux) du problème. La seconde catégorie est constituée des méthodes MISS « méthodes d'interaction sol-structure ». Ce sont des méthodes numériques (éléments finis ou différence finis) considérées comme plus précises que la première catégorie puisqu'elles intègrent l'environnement géotechnique (l'interaction entre deux milieux) avec plusieurs représentations possibles : discrète (appuis élastique en 1D) ou par massif (en représentant le sol et l'interface en 2D ou 3D).

### 2.2. Modélisation de l'interaction sol-structure

L'interaction sol-structure (ISS) consiste à prendre en considération l'influence du sol sur le comportement de la structure. Les deux principaux modèles de représentation du phénomène sont abordés dans les méthodes MISS présentées dans les sections suivantes.

#### 2.2.1. Méthode MISS-MEF (méthode des éléments finis)

La modélisation de l'ISS impose pour ce type de modèle une représentation appropriée du sol et de son contact avec la structure (interface). Dans la littérature, la plupart des modèles numériques ont recours à une représentation du massif de sol par des lois élastoplastiques parfaites (modèle Mohr-Coulomb) ou avec écrouissage isotrope (modèle Cam-Clay). En général, les résultats obtenus par ces modèles sont considérés satisfaisants [BOE 10], même s'il existe d'autres modèles plus robustes et performants pouvant être utilisés pour mieux reproduire certains comportements du sol. A titre d'exemple, le modèle élastoplastique de Hujeux employé par [VOS 01] permet de reproduire la variation de la rigidité et de la cohésion du sol en fonction de la profondeur. D'autre part, le contact entre le sol et la structure (l'interface) est quant à lui modélisé par des éléments d'interface de dimensions nulle (éléments du type joint). Ces éléments génèrent des petites déformations élastiques entre les deux surfaces de contact et permettent d'intégrer leur rugosité [BOE 10]. Ces modèles sont souvent basés sur une loi élastoplastique avec un critère de rupture de type Mohr-Coulomb pour simuler l'interface.

#### 2.2.2. Méthode MISS-CR (coefficient de réaction)

Cette méthode est aussi appelée méthode des poutres sur appuis élastiques (Winkler, voir équation [1]). Ce modèle est très utilisé pour la modélisation des ouvrages étendus en géotechnique comme les semelles filantes. Il a été adapté pour d'autres types d'ouvrages, notamment les écrans de soutènement ou les conduites enterrées. Dans

ce contexte, plusieurs méthodes ont été développées en se basant sur des hypothèses de calcul et d'application différentes. Il existe deux approches aux conditions aux limites différentes [CHA 06] où l'une intègre l'interaction avec le sol en fiche seulement et l'autre l'intègre sur toute la hauteur de la structure. D'autre part, selon [JOS 74] il existe plusieurs méthodes classiques communément utilisées pour la détermination des rigidités élastiques du sol (Terzaghi, Rowe, Ménard ...). Certaines de ces méthodes considèrent une rigidité constante sur la profondeur, fonction de la profondeur (non liée à la variabilité du sol), ou encore bornée par des seuils de plasticité de poussée et de butée.

$$EI \frac{d^4 y}{dz^4} + k(z)y = 0 \quad [1]$$

où  $EI$  est la rigidité à la flexion de la palplanche,  $y$  est le déplacement perpendiculaire au plan de l'écran et  $z$  est la coordonnée en profondeur.

Les méthodes basées sur le coefficient de réaction prévoient une représentation des appuis (butons ou tirants) par des éléments mécaniques élastiques. Un exemple d'expression de la rigidité est proposé par [BAL 88] (voir équation [2]).

$$k_T = \frac{E_a S \cos \alpha^2}{l_f + 0.5l_b} \quad [2]$$

où  $E_a$  est le module de Young du tirant ou du buton d'ancrage,  $S$  est la section d'acier,  $\alpha$  est l'angle d'inclinaison du tirant,  $l_f$  est la longueur libre (entre le massif d'ancrage et la structure),  $l_b$  est la longueur de scellement.

### 2.3. Calcul déterministe

Dans cette partie une comparaison a été menée entre deux méthodes MISS-MEF et MISS-CR en faisant appel au logiciel Cast3m [CAS 00]. L'objet de cette démarche est de comparer deux concepts différents de prise en compte de l'interaction sol-structure dans le cadre de l'analyse du comportement des palplanches. Il est à noter que les méthodes basées sur l'équilibre limite ne prennent pas en compte l'ISS, nous les excluons donc de cette analyse.

#### 2.3.1. Présentation du cas étudié

L'ouvrage traité dans le cadre de cette étude est extrait de [BOE 12]. Ce cas d'étude est une palplanche métallique AU 26 posée dans un sol sableux homogène et monocouche. Nous considérons qu'il n'y a pas de différence des niveaux d'eau de part et d'autre de l'écran.

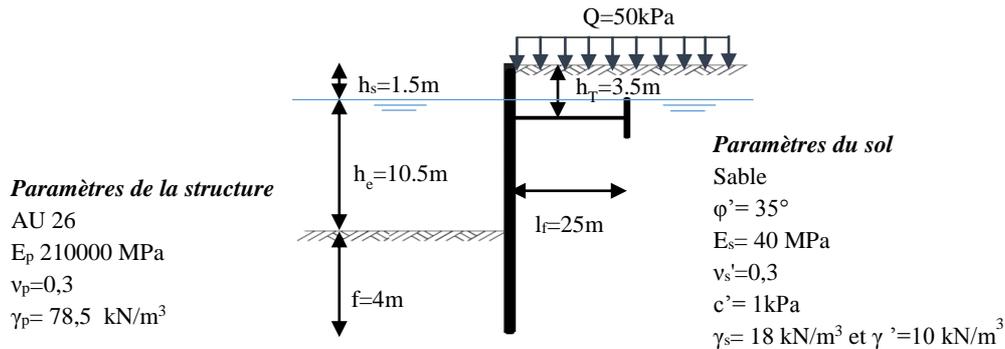


Figure 1. Caractéristiques géométriques et géotechniques du cas étudié.

En général, les données utilisées pour ces calculs ne sont pas gérées de la même manière par ces deux méthodes, c'est le cas de la cohésion du sol (utilisée comme paramètre du modèle Mohr-Coulomb dans la méthode MISS-MEF et comme pression exercée sur l'écran dans la méthode MISS-CR), ou encore le coefficient de poisson du sol  $\nu$  (intégré uniquement dans la méthode MISS-MEF).

#### 2.3.2. Modèles numériques utilisées

L'ensemble des paramètres utilisés par les deux méthodes est regroupé dans le Tableau 1. Nous précisons que le calcul mené par la méthode MISS-CR est basé sur les hypothèses de la méthode de Ménard [JOS 74] appliquées sur un modèle éléments finis 1D, à savoir :

- des ressorts élastiques en fiche seulement (pas de seuils de plasticités pour des raisons de simplification),
- une butée représentée que par la réaction du sol en fiche,
- la formule de Ménard (voir équation [3]) pour le calcul du coefficient de réaction du sol.

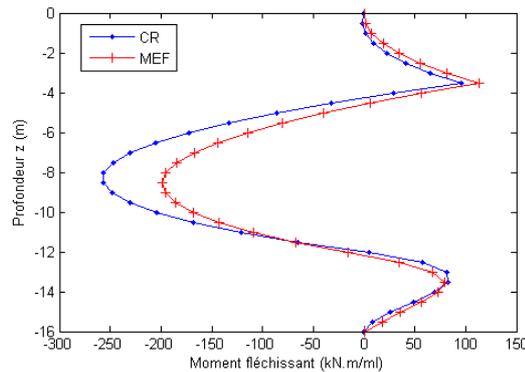
**Tableau 1.** Récapitulatif des modèles des paramètres de modélisation<sup>1</sup>.

Elément	MISS-MEF		MISS-CR	
	Modèle	Loi de comportement	Modèle	Loi de comportement
Sol	Plan	E.P M.C	Appuis élastiques	E.L
Palplanche	Poutre	E.L	Poutre	E.L
Tirant	Barre	E.L	Ressort	E.L
Interface	Joint	E.P M.C	-	-

<sup>1</sup> E.P M.C : modèle élastoplastique Mohr-Coulomb. E.L : modèle élastique linéaire.

$$k_h = \frac{E_M}{\frac{h}{6} + 0.133(9h)^{0.333}} \quad [3]$$

où  $E_M$  désigne le coefficient pressiométrique du sol (sachant que  $E_s = 3E_M$ ) pour les sols sableux [MES 04] et  $h$  représente la longueur de fiche du rideau.



**Figure 2.** Comparaison entre les méthodes MISS : Moment fléchissant de la palplanche, en fonction de la profondeur.

Les résultats sont présentés en Figure 2 pour le moment fléchissant le long de la palplanche. Ils nous permettent de constater que le modèle MISS-CR a tendance à surestimer le moment maximum (de 29% ici) par rapport à celui obtenu par la méthode MISS-MEF. Ceci s'explique certainement par la prise en compte partielle de l'interaction sol-structure (intégrée en fiche seulement). Par ailleurs, pour les deux parties qui restent (la fiche et le tirant) les résultats obtenus par la méthode MISS-CR semblent concordants à ceux obtenus par la méthode MISS-MEF.

Même si le modèle MISS-CR utilisé dans cette partie est un moyen rapide qui permet d'avoir un ordre de grandeur des moments fléchissant cohérent avec les caractéristiques mécaniques de l'ouvrage, nous baserons notre étude sur la méthode MISS-MEF qui reste plus précise en matière de prise en compte de l'interaction sol-structure par un modèle de sol plus performant (Mohr-Coulomb) et une représentation adéquate de l'interface par le joint.

### 3. Modélisation des paramètres incertains et de la variabilité spatiale

La variabilité inhérente traitée dans le cadre de la présente communication est considérée comme étant la source la plus importante d'incertitude en géotechnique [WAN 13a]. Sa prise en compte dans les calculs fait appel à l'analyse probabiliste pour transformer des grandeurs physiques déterministes ( $c$ ,  $\varphi$ ,  $E_s$ , ...) en données statistiques exprimées en termes de : valeur moyenne, coefficient de variation COV et longueur de corrélation (transversale et/ou longitudinale).

#### 3.1. Paramètres incertains

##### 3.1.1. Estimation de la variabilité du sol « coefficient de variation »

Différentes références ([JCS 06], [CHE 00]) montrent que le coefficient de variation (COV) des paramètres géotechniques dépend de plusieurs facteurs tels que l'état hydrique du sol (présence ou absence d'eau) ou la nature du sol (sableux ou argileux) [PHO 99]. Il existe même une relation entre le COV et la valeur moyenne de certains paramètres ([CHE 00], [PHO 99]). Le Tableau 2 présente les propositions de deux études.

**Tableau 2.** Coefficient de variation décrivant la variabilité inhérente du sol.

	$C'$	$C_u$	$\varphi'$	$\gamma$	$E_s$
[JCS 06]	10-50%	10-40%	10-20%	5-10%	20-100%
[CHE 00]	12,8-70%	12-145%	1-87,2%	1-27,9%	-

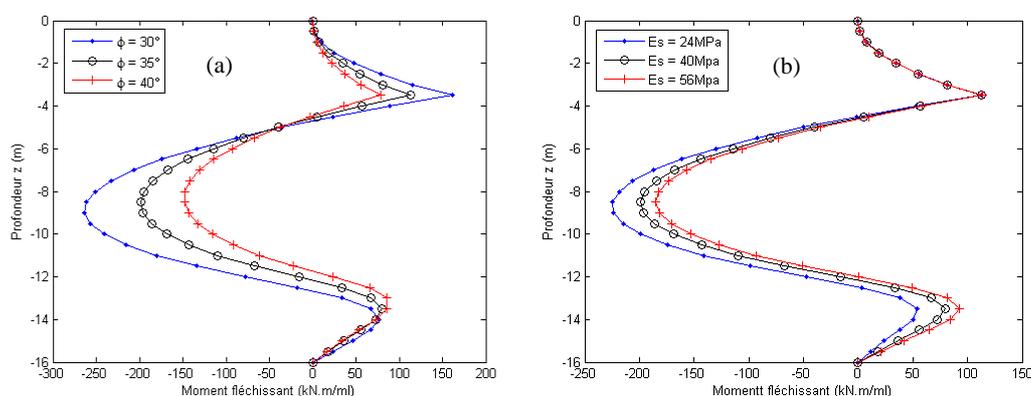
où :

$C'$  et  $C_u$  représentent respectivement la cohésion drainée (absence d'eau) et la cohésion non drainée,  $\gamma$  et  $E_s$  représentent respectivement le poids volumique du sol et le module de Young du sol,  $\varphi'$  représente l'angle de frottement effective.

L'intégration de ces données aux modèles probabilistes exige de leur attribuer une distribution probabiliste (Gamma, Beta, Normale, Log-normale...). Le choix de la distribution dépend de la nature des données d'entrées, de l'information disponible et des exigences des applications probabilistes utilisées par la suite.

### 3.1.2. Paramètres influençant le comportement des palplanches

Avant de mener une étude probabiliste il est nécessaire de déterminer les paramètres dont la variabilité influe le plus sur le comportement des palplanches. On présente dans cette partie une étude paramétrique dans laquelle on s'intéresse à la variation de quelques paramètres géotechnique ( $E_s$  et  $\varphi'$ ) prépondérant dans un milieu sableux. Les résultats obtenus (voir Figure 3) montrent que le comportement de la structure, exprimé en termes de moment fléchissant, est beaucoup plus sensible vis-à-vis d'une variation de l'angle de frottement (augmentation de 40% du moment maximum pour une variation de 17% de  $\varphi'$ ) par rapport à une variation du module de Young du sol (augmentation de 13% du moment maximum pour une variation de 40% de  $E_s$ ). Par ailleurs, nous avons mené la même étude pour observer l'influence du poids volumique du sol, et il apparaît que la variation de ce paramètre est insignifiante par rapport aux deux premiers.



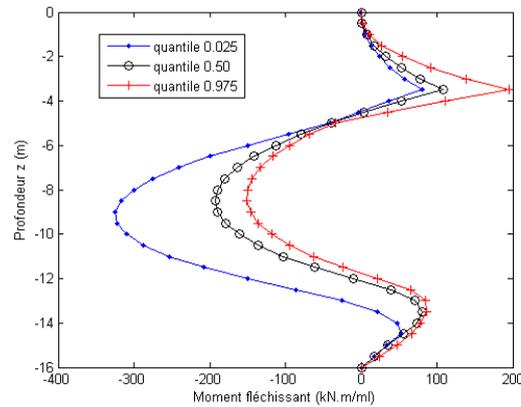
**Figure 3.** Moment fléchissant de la palplanche en fonction de la variation (a) de l'angle de frottement (b) du module de Young.

## 3.2. Analyse probabiliste du comportement structurel

Nous nous intéresserons ici à la variabilité du sol de deux manières différentes : d'abord, en considérant une variabilité non structurée du sol puis, en intégrant la variabilité spatiale. Les deux analyses seront aussi effectuées sur le même modèle MISS-MEF présenté en §2.3.1 et §2.3.2. Dans ce qui suit nous nous intéresserons uniquement à l'influence due à la variation de l'angle de frottement intégrée dans le modèle Mohr-Coulomb non-linéaire.

### 3.2.1. Variabilité non structurée d'un sol

Nous propageons les incertitudes sur le modèle par la méthode de Monte-Carlo (1000 simulations) pour examiner l'influence de  $\varphi'$ . Nous considérons une distribution de type beta de l'angle de frottement (distribution bornée). Le traitement de l'ensemble des simulations permet d'exprimer les résultats du moment fléchissant agissant sur la palplanche au travers de trois valeurs caractéristiques du sol : quantiles à 2,5%, 50% et 97,5%.



**Figure 4.** Moment fléchissant de la palplanche pour une variabilité non-structurée de l'angle frottement,  $N=1000$  simulations et  $COV=10\%$

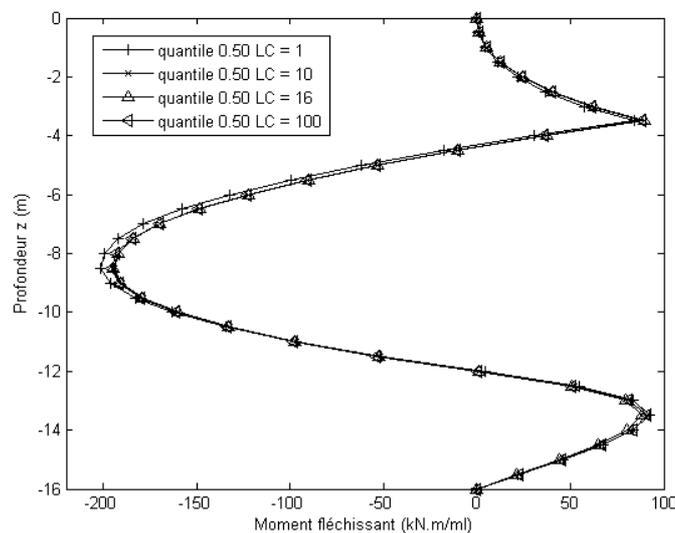
On constate à travers ces résultats obtenus (figure 4) que le moment fléchissant maximum au niveau de la palplanche est plus important en partie excavée lorsque les valeurs de l'angle de frottement du sol sont relativement faibles (représentées ici par le quantile à 2,5%). Dans ce cas, une augmentation de 100% est observée par rapport à la médiane. On observe par ailleurs le même taux au niveau de l'appui (tirant) pour le quantile à 97,5%. La non symétrie des deux résultats (quantile à 2,5% et 97,5%) par rapport à la médiane s'explique par la nature de la loi de distribution choisie pour cette étude (loi beta).

### 3.2.2. Variabilité aléatoire du sol « variabilité spatiale »

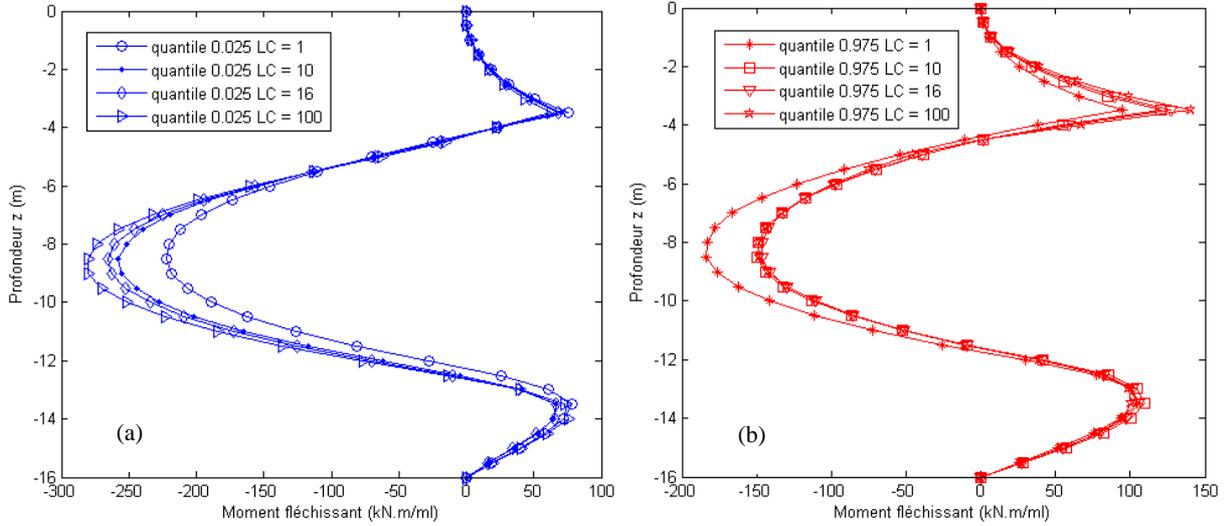
Dans cette partie nous nous intéressons à l'influence de la variabilité de l'angle de frottement  $\varphi_s$  en fonction de la profondeur  $z$ . Deux notions supplémentaires par rapport à la variabilité non structurée sont intégrées, la corrélation spatiale et la génération de champs aléatoires.

La corrélation spatiale est utilisée pour décrire la variation entre deux points spatialement distincts. Ceci s'effectue à travers l'introduction d'une propriété statistique appelée structure de corrélation de Vanmarcke [GOR 08] appliquée sur une distance  $\delta$  (longueur de corrélation).

D'autre part, plusieurs méthodes peuvent être utilisées pour générer un champ aléatoire : LAS (Local average subdivising), TBM (Turninig-band method), FFT (Fast Fourier Transform), etc. Nous avons opté pour la méthode FFT plus facile à utiliser en présence de données anisotropes [GOR 08]. Le champ généré est de nature gaussienne (et permet donc l'application du théorème central limite [GRE 03]) et stationnaire 1D. Il est caractérisé par sa moyenne  $\mu_\varphi$ , sa variance  $\sigma_\varphi^2$  et la fonction de corrélation  $\rho(\tau)$  de type Markov (voir équation [4]) dans laquelle  $\tau$  représente la distance entre deux positions distincts, et  $\delta$  représente la longueur de corrélation.



**Figure 5.** Valeurs médianes du moment fléchissant de la palplanche dans un sol hétérogène : variabilité spatiale de l'angle de frottement  $\mu_\varphi=35^\circ$ ,  $N=1000$  simulations et  $COV=10\%$ ,  $LC=1m$ ,  $LC=10m$ ,  $LC=16m$ ,  $LC=100m$ .



**Figure 6.** Quantile à 2.5% (a) et 97.5% (b) du moment fléchissant de la palplanche dans un sol hétérogène : variabilité spatiale de l'angle de frottement  $\mu_\phi=35^\circ$ ,  $N=1000$  simulations et  $COV=10\%$ ,  $LC=1m$ ,  $LC=10m$ ,  $LC=16m$ ,  $LC=100m$ .

$$\rho(\tau) = \exp\left(-\frac{2|\tau|}{\delta}\right) \tag{4}$$

Une étude paramétrique de l'influence de la longueur de corrélation LC a été menée. Généralement, cette dimension est de l'ordre de quelques mètres dans le sens vertical du sol (profondeur) [PHO 99]. Nous nous intéressons également aux LC plus importantes afin d'examiner leur influence sur le moment fléchissant appliqué sur la structure. Les résultats sont exprimés en termes de valeurs médianes (figure 5) et de quantiles correspondants aux probabilités 2,5% et 97,5% (figure 6), pour les paramètres  $\mu_\phi = 35^\circ$  et  $COV = 10\%$ . Une grande sensibilité du moment maximum,  $M_{max}$  à 8,5 m au-dessous du niveau supérieur du sol, en prenant en compte la variabilité du sol, est constatée par rapport au cas déterministe présenté en figure. 3 ( $M_{max} = -199$  kN.m/ml pour une valeur déterministe de  $\phi' = 35^\circ$ ). En effet, pour l'intervalle  $LC = [1 \text{ m} ; 10 \text{ m}]$ , les quantiles à 2,5% indiquent une augmentation du moment allant de 12% à 30%. En revanche, pour des valeurs supérieures à  $LC = 10 \text{ m}$ , nous constatons que les variations du moment, par rapport à la valeur de  $LC = 10 \text{ m}$ , sont plus faibles. En ce qui concerne les quantiles à 97,5%, pour l'intervalle  $LC = [1 \text{ m} ; 10 \text{ m}]$  on observe une diminution du moment, par rapport à la valeur déterministe, comprise entre 8% et 25%. Pour des valeurs supérieures à  $LC = 10 \text{ m}$ , on constate aussi des faibles variations par rapport à la valeur de  $LC = 10 \text{ m}$ . Nous focaliserons notre regard sur les cas les plus défavorables dans la section suivante, à savoir les moments maximums supérieurs au moment déterministe.

**4. Evaluation de la variabilité**

On souhaite dans cette partie estimer la probabilité de dépassement d'une valeur limite fixée pour le moment fléchissant exercé sur la palplanche pour le cas présenté en §2.3.2 en considérant les deux représentations de variabilité du sol : variabilité non structurée et variabilité structurée (spatiale) du sol. L'estimation de la probabilité est calculée par l'équation [5] :

$$P_r = P(M_{Max}(A) > M_n) \tag{5}$$

où le  $M_{max}(A)$  représente le moment maximum obtenu par la variable aléatoire  $A = \{\phi'\}$  (variabilité non structurée) ou du champ aléatoire  $A = \mu_\phi + \{\phi'(z)\}$  et  $M_n$  représente le moment du calcul déterministe §2.3.1 (Figure 3).

Les résultats obtenus (Tableau 3) nous permettent de constater que la probabilité de dépassement d'un moment résistant de 199 kNm/ml est très élevée pour des longueurs de corrélation de l'ordre de 1 m. Elle est du même ordre (44-45%) pour les autres longueurs de corrélation ainsi que pour le cas de variabilité non structurée.

**Tableau 3.** Analyse probabiliste pour les différents cas,  $COV=10\%$ ,  $N=1000$  simulations.

Distribution	A = $\mu_\phi + \{\phi'(z)\}$			
	Longueurs de corrélation (m)			
Béta	1	10	16	100
0.443	0.608	0.443	0.447	0.454

## 5. Conclusion

Nous nous sommes intéressés dans le cadre de cette communication au comportement mécanique des écrans de soutènement (ici palplanches) associé à leur environnement géotechnique (interaction sol-structure) et tenant compte de la variabilité spatiale. Une comparaison numérique a permis d'analyser les avantages et inconvénients des méthodes MISS-MEF et MISS-CR.

Dans la seconde partie de cette communication on s'est intéressé à la variabilité spatiale du sol non pris en charge par les codes normatifs, notamment [NFP 94]. Dans ce contexte nous avons intégré la variabilité géotechnique de deux manières différentes : variabilité non structurée et variabilité structurée (spatiale). Nous avons ensuite étudié l'influence de l'incertitude géotechnique sur le moment fléchissant de la palplanche. La longueur de corrélation pour les modèles traitant de la variabilité spatiale a une grande influence surtout pour des ordres de grandeur qui se situent aux alentours de quelques mètres. Cette conclusion a été confirmée dans la dernière partie où l'on a estimé la probabilité vis-à-vis du dépassement du seuil du moment maximum obtenu par un calcul déterministe. En effet, on a constaté une probabilité plus importante pour des petites dimensions de la longueur de corrélation.

Les résultats obtenus à travers cette étude pour le cas traité nous permettent de constater que la variabilité spatiale associée à l'étude de ce type d'ouvrage (les palplanches) peut s'avérer non négligeable pour certains paramètres comme l'angle de frottement du sol.

## 6. Bibliographie

- [ASH 12] ASHRAF A. et al., « Probabilistic analysis of strip footings resting on a spatially random soil using subset simulation approach ». *Georisk*, Vol.6, No.3, September 2012, 188-201, Nantes.
- [BAK 14] BAK KONG L., « Reliability-based design and its complementary role to Eurocode 7 design approach », *Computers and Geotechnics*, 65, (2015), 30-44.
- [BOE 10] BOERO J, Fiabilité des infrastructures portuaires : approche innovante d'analyse de modélisation probabiliste des données d'inspection, Thèse de doctorat, Université de Nantes, 2010.
- [BOE 12] BOERO J., et al, « Time-function reliability of harbour infrastructures from stochastic modelling of corrosion », *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, Vol. 16, No. 10, November 2012, 1187-1201.
- [BAL 88] BALAY J., « Parois moulées. Ancrage », *Techniques de l'ingénieur*, C252, (1988).
- [CHA 06] CHANG-YU OU, « Deep Excavation Theory and Practice », *Taylor & Francis*, London, 253-267.
- [CAS 00] Cast3m 2000, <http://www-cast3m.cea.fr>
- [CHE 00] CHERUBINI C., « Probabilistic approach to the design of anchored sheet pile walls », *Computers and Geotechnics*, 26, 309-330, (2000).
- [EUR 97] EUROCODE 7, « Calcul géotechnique NF EN 1997-1 Juin 2005 ». *Afnor*, 2005.
- [GRE 03] GREGORY B. BAECHEER et al, « Reliability and Statistics in Geotechnical Engineering », USA, *WILEY*, (2003).
- [GOR 08] GORDON A. and GRIFFITHS D. V., « Risk Assessment in Geotechnical Engineering », *John Wiley & Sons*, ISBN: 978-0-470-17820.
- [JCS 06] JCSS Probabilistic Model Code, Section 3.7: SOIL PROPERTIES, August 2006.
- [JOS 74] JOSSEAUME H., « Méthode de calcul des rideaux de palplanches. Etude bibliographique », *Bulletin des laboratoires des ponts et chaussées*, 72 – Juillet-Août, 1974 – Réf. 1495.
- [MES 04] MESTAT P., « Résultats de l'exercice de prévision des tassements d'un remblai construit des colonnes ballastées », ASEP.GI, 2004 – Vol. 2, Magnan (ed.), Presses de l'ENPC/LCPC, Paris.
- [NFP 94] NF P94-282 « Calcul géotechnique. Ouvrages de soutènement ». *Afnor*. Mars 2009.
- [PHO 99] PHOON Kok-Kwang and Fred H., « Kulhawy. Characterization of geotechnical variability », *Canadian Geotech. USA. J.* Vol 36, 612-630, (1999).
- [SCH 06] SCHWECKENDIEK T. « Reliability of sheet pile walls and the influence of corrosion – structural reliability analysis with finite elements », *Risk, Reliability and Societal Safety – Aven & Vinnem (eds) 2007*, Taylor & Francis Group, London, ISBN 978-0-415-44786-7.
- [SCH 01] SCHWEIGER H.F. et al. « Reliability Analysis in Geotechnics with Deterministic Finite Element », Austria, *The international Journal of Geotechnics*, Volume 1, Number 4, 389-413 (2001).
- [VOS 01] VOSSOUGH I., Etude numérique du comportement des ouvrages de soutènement à la rupture, Thèse de doctorat, Ecole centrale de Paris, 2001.
- [WAN 13a] WANG Y., CAO Z., « Expanded reliability-based design of piles in spatially variable soil using efficient Monte Carlo simulations », *Soil and Foundations*, 53(6), December 2013, 820-834.
- [WAN 13b] WANG Yu « MCS-based probabilistic design of embedded sheet pile walls ». *Georisk*, Vol. 7, No. 3, 151-162, 2013.