

---

# Modélisation tridimensionnelle de rideaux de palplanches tenant compte de la variabilité spatiale du sol

Mokeddem A., Elachachi S.M., Yáñez-Godoy H.

<sup>1</sup> Université de Bordeaux, I2M, UMR 5295, département GCE, France,  
mail : [abdelhammid.mokeddem@u-bordeaux.fr](mailto:abdelhammid.mokeddem@u-bordeaux.fr)

---

*RÉSUMÉ.* Cette communication porte sur l'analyse du comportement des ouvrages de soutènements flexibles, en l'occurrence des rideaux de palplanches. En pratique et selon [NFP 09], ce type d'ouvrage est dimensionné en section droite sans prise en compte de la variabilité spatiale du sol. Les outils de calcul numérique tridimensionnel classiques permettent difficilement d'évaluer l'effet de cette variabilité spatiale sur le comportement de ces ouvrages. Une approche probabiliste est développée, celle-ci est basée d'une part, sur une modélisation des propriétés du sol par des champs aléatoires et d'autre part, sur une modélisation de l'interaction sol-structure par un système de plaque sur coefficient de réaction « MISS-PLQ-CR ». La méthode MISS-PLQ-CR est aussi performante que les méthodes 3D classiques mais moins coûteuse en termes de temps de calcul. Une parallélisation des calculs sur cluster a également été réalisée. Les premiers résultats exprimés en termes d'indices de fiabilité montrent l'intérêt de la prise en compte de la dimension longitudinale et de la variabilité spatiale des propriétés du sol.

*ABSTRACT.* This paper focuses on the behaviour of flexible retaining walls as sheet piles. The standard [NFP 09] used to design this kind of structures considers only the cross sectional behaviour and neglect the soil spatial variability. The conventional three-dimensional numerical calculation tools make it difficult to evaluate the effect of this spatial variability on the behaviour of these structures. A probabilistic approach is developed, based on modelling of the soil properties by random fields and on modelling of the soil-structure interaction by a subgrade reaction "MISS-PLQ-CR" method. The MISS-PLQ-CR method is as efficient as the conventional 3D methods but less expensive in terms of computing time. Parallelization of the computation on cluster was also carried out. The first results expressed in terms of reliability index showed the advantage of taking into account the longitudinal dimension and the spatial variability of soil properties.

*MOTS-CLÉS :* modélisation 3D, coefficient de réaction, variabilité spatiale, palplanche, indice de fiabilité, parallélisation.

*KEY WORDS:* 3D modelling, subgrade reaction, spatial variability, sheet pile, reliability index, parallelisation.

---

## 1. Introduction

Le dimensionnement des ouvrages de soutènement flexibles se fait, comme pour la plupart des ouvrages géotechniques étendus (semelle filantes, conduites, ...), en section droite et sans prise en compte de la variabilité spatiale du sol. Des coefficients partiels de sécurité sont associés à ce calcul pour couvrir les différentes incertitudes épistémiques (dues au modèle de calcul, aux transformations, ...) et aléatoires (dues principalement à la variabilité des propriétés du sol). Il est à noter que ce dernier type d'incertitude est considéré comme la source la plus importante. L'objet de cette communication vise donc à montrer l'intérêt de prendre en compte cette variabilité spatiale du sol (par la considération de champs aléatoires) et le développement d'un modèle numérique intégrant la dimension longitudinale de l'ouvrage.

Les modèles numériques tridimensionnels ont comme principal inconvénient un coût de calcul conséquent lorsque l'on souhaite les associer à des approches probabilistes comme par exemple des simulations de Monte Carlo (100.000 simulations pour notre étude). L'intérêt de la méthode MISS-PLQ-CR proposée (méthode d'interaction sol-structure avec plaque et coefficient de réaction) est manifeste dans la mesure où l'on souhaite allier une finesse de calcul et un temps de calcul non prohibitif. Elle constitue un prolongement de la méthode MISS-CR basée sur une poutre et coefficient de réaction ([MOK 16], [OU 06]), Figure 1. D'autre part, les simulations de Monte Carlo étant indépendantes, un calcul parallèle est réalisé avec le cluster AVAKAS de l'université de Bordeaux permettant de réduire le temps de calcul de 98,5% (en passant d'un temps de calcul de 408 heures sur une machine à deux processeurs à 6 heures sur le cluster).

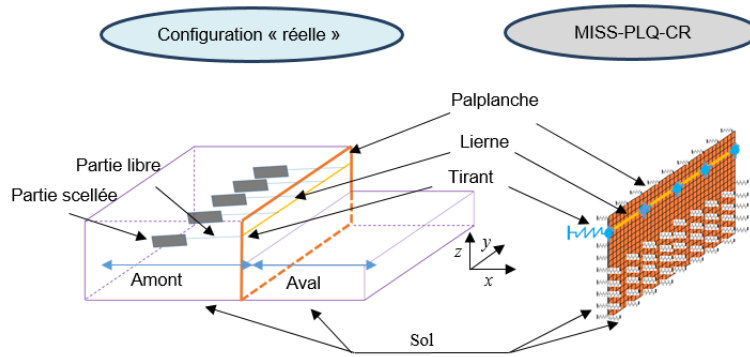


Figure 1. Principe de la méthode MISS-PLQ-CR

## 2. Approche mécano-probabiliste suivie

La démarche proposée est décomposée en quatre étapes :

- une première consiste à introduire les données d'entrées,
- une seconde consiste à préparer les données de calcul sur cluster,
- une troisième étape consiste à paralléliser les calculs sur plusieurs nœuds de calcul du cluster,
- la quatrième étape consiste à post-traiter les résultats de l'ensemble des simulations (100.000).

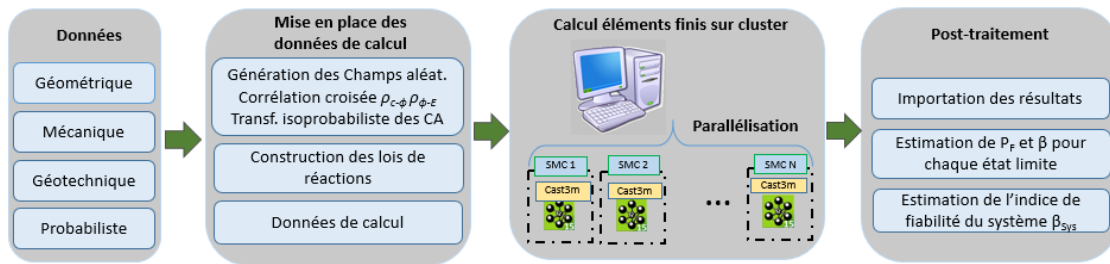


Figure 2. Organigramme du calcul probabiliste.

Dans le cadre de cette étude, la variabilité spatiale du sol est modélisée par des champs aléatoires bidimensionnels en utilisant la méthode circulant embedding CE [DIE 93]. Le choix pour cette méthode est motivé par ses performances en termes de rapidité de temps de calcul.

## 3. Du calcul probabiliste au calcul fiabiliste

### 3.1. Cas d'étude

Une présentation assez synthétique du cas d'étude est donnée dans cette partie. L'ouvrage considéré est un rideau de palplanches de type AU 14 inséré dans un sol tri-couche (cf. Tableau 2). Un dispositif de tirants précontraints d'une force admissible de 340kN et d'une section de 560mm<sup>2</sup> est mis en place. Ces tirants sont inclinés de 45° et espacés de 3m. Des liernes longeant l'écran et formées de deux UPE 240 sont mises à la profondeur des têtes d'ancrage. Les dimensions de l'ouvrage et les profondeurs de la nappe phréatique sont indiquées à la Figure 3.

Tableau 1. Propriétés géotechniques.

Couche	Depth [m]	$\gamma$ [kN/m <sup>3</sup> ]	$\gamma'$ [kN/m <sup>3</sup> ]	$\phi$ [°]	$c$ [kPa]	$E_p$ [Mpa]
1	[0, 4]	13,1	12,1	23,9	7,5	1,27
2	[4, 11]	18,5	17,5	17,5	14,9	3,41
3	[11, 15]	20,0	19,0	35	0	62,35

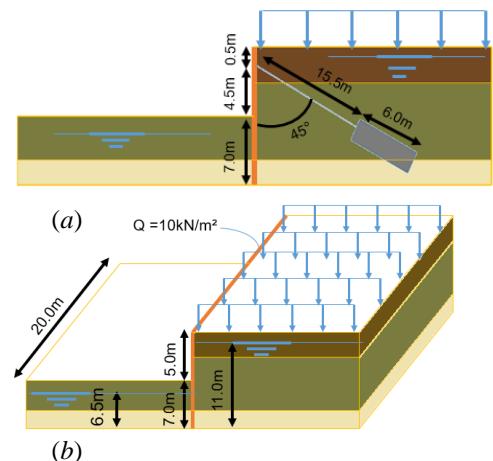


Figure 3. Cas d'étude, a) dimensions 2D b) dimensions 3D

Trois propriétés du sol sont considérées comme champs aléatoires : la cohésion  $c$ , l'angle de frottement  $\varphi$  et le module pressiométrique du sol  $E_p$ . Pour chaque propriété, le choix s'est porté sur une distribution de type lognormal garantissant ainsi des valeurs aléatoires positives après transformation iso-probabiliste. Les coefficients de variation sont respectivement de 40%, 20% et 50% pour  $c$ ,  $\varphi$  et  $E_p$ .

S'agissant des champs aléatoires, les longueurs de corrélation transversale et longitudinale du sol ( $\delta_V$  et  $\delta_H$  respectivement) sont à intégrer en plus des moyennes et des coefficients de variation. On s'intéresse également à l'influence de la corrélation croisée entre paramètres (corrélation croisée entre champs aléatoire  $\rho_{c-\varphi}$  et  $\rho_{c-E}$ ). Une étude paramétrique est effectuée et organisée de la manière suivante :

- effets des longueurs de corrélation  $\delta_V$  et  $\delta_H$  (Tableau 2) au travers de cinq cas différents,
- pour chaque cas du Tableau 2, quatre paires de corrélations croisées sont prises en compte (Tableau 3).

**Tableau 2.** Principaux cas étudiés de longueur de corrélations différentes.

Longueur de corrélation	Cas 1	Cas 2	Cas 3	Cas 4	Cas 5
$\delta_V$ [m]	1	3	5	3	3
$\delta_H$ [m]	30	30	30	10	50

**Tableau 3.** Les sous-cas d'étude identifiés pour des paires de corrélations croisées différentes.

Corrélation croisée	Cas $i$			
	Sc-1	Sc-2	Sc-3	Sc-4
$\rho_{c-\varphi}$	-0.6	-0.6	+0.6	+0.6
$\rho_{\varphi-E_p}$	-0.6	+0.6	-0.6	+0.6

On notera par exemple "Cas 3.Sc-2", le cas N°3 ( $\delta_V=5m$ ,  $\delta_H=30m$ ) associé au sous-cas N°2 ( $\rho_{c-\varphi}=-0,6$ ,  $\rho_{c-E_p}=0,6$ ).

Pour l'étude fiabiliste trois états limites sont retenus. Deux états limites ultimes (structurel ELU1 et géotechnique ELU2) et un état limite de service ELS (voir Tableau 4).

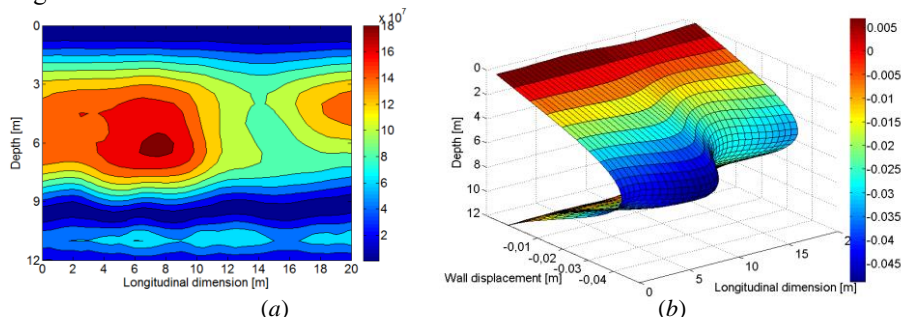
**Tableau 4.** Définition des états limites.

Nom	Type	Elément	Expression	Limite
ELU1	Structurel	Palplanche	$\sigma_{Von} = \sqrt{\frac{M_{YY}^2 + M_{ZZ}^2 - M_{YY}M_{ZZ} + 3M_{YZ}^2}{W_{ELp}^2}}$	$f_u = 240Mpa$
		Tirant	$\sigma_T = T_T/A_T$	$f_u = 1570Mpa$
		Lierne	$\sigma_L = M_L/W_{ELwL}$	$f_u = 240Mpa$
ELU2	Géotechnique	Géotechnique 1	Butée insuffisante	Test de convergence
		Géotechnique 2	Instabilité	Test de convergence
ELS	Urbain	Environnement urbain	Déplacement maximal de l'ouvrage	1,5% de la hauteur excavée

Avec :  $M_{YY}$ ,  $M_{YY}$ ,  $M_{ZZ}$  sont les moments fléchissants de la palplanche selon les axes  $y$  et  $z$  ;  $W_{ELp}$  module élastique de la palplanche ;  $\sigma_{Von}$  la contrainte équivalente de Von Mises ;  $f_u$  la contrainte limite de l'acier ;  $\sigma_T$  la contrainte du tirant ;  $T_T$  l'effort de traction du tirant ;  $A_T$  la section du tirant ;  $\sigma_L$  la contrainte maximale dans la lierne ;  $M_L$  le moment maximum dans la lierne ;  $W_{ELwL}$  le module élastique de la lierne.

### 3.2. Résultats d'une simulation Monte Carlo

Afin de montrer l'effet de la variabilité spatiale du sol, quelques résultats issus d'une seule simulation de Monte Carlo (contrainte équivalente de Von Mises et déplacement de la palplanche, Figure 4) sont montrés. On observe l'impact de la variabilité spatiale du sol : non uniformité des contraintes avec une concentration de contrainte bien localisée (Figure 4.a) et des déplacements très différents d'un profil vertical à un autre (Figure 4.b). Ces déplacements différentiels peuvent être à l'origine de tassements différentiels néfastes pour les bâtiments avoisinant l'ouvrage.



**Figure 4.** Résultats de la simulation N°71995 du Cas 3.Sc-4 : a) contrainte équivalente de Von Mises, b) déplacement de la palplanche.

### 3.3. Influence des longueurs de corrélation ( $\delta_V$ et $\delta_H$ ) et de la corrélation croisée ( $\rho_{c-\phi}$ et $\rho_{\phi-Ep}$ )

Les résultats relatifs aux données présentées aux Tableau 2 et Tableau 3 sont synthétisés dans les figures 5 et 6 représentant respectivement l'influence de la longueur de corrélation transversale  $\delta_V$  et longitudinale  $\delta_H$  respectivement sur la fiabilité (ELU1, ELU2 et ELS). Sur ces mêmes figures on observe également l'effet de la corrélation croisée entre paramètres à travers les sous-cas d'études.

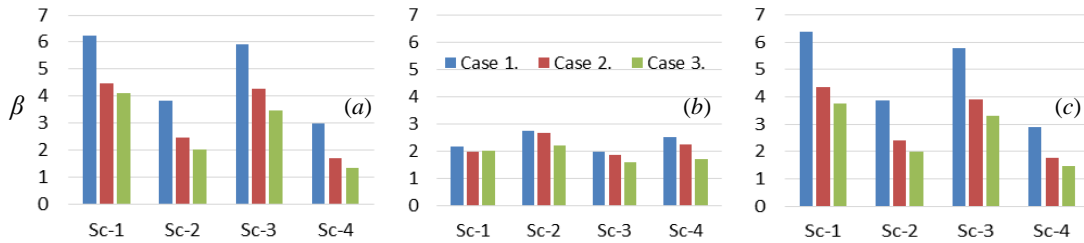


Figure 5. Influence de la longueur de corrélation transversale  $\delta_V$ , a) ELU1, b) ELU2, c) ELS.

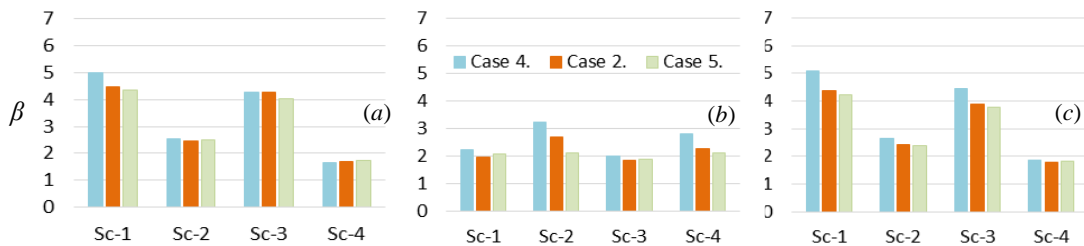


Figure 6. Influence de la longueur de corrélation horizontale  $\delta_H$ , a) ELU1, b) ELU2, c) ELS.

On constate que l'influence de la longueur de corrélation dépend des corrélations croisées entre paramètres choisies ( $\rho$ ), du type de l'état limite évalué (ELU1, ELU2 ou ULS) ainsi que la direction étudiée (transversale ou longitudinale). Dans certains cas, l'augmentation de la longueur de corrélation a tendance à faire diminuer l'indice  $\beta$  (Figure 5.a), Cas 1.Sc-4, Cas 2.Sc-4 et Cas 3.Sc-4, où l'on passe de 2,97 à 1,35). Pour d'autres cas on observe parfois une tendance contraire (Figure 6.a), Cas 4.Sc-4, Cas 2.Sc-4 et Cas 5.Sc-4, où l'on passe d'un indice de fiabilité de 1,67 à 1,74).

## 4. Conclusion

La démarche mécano-probabiliste présentée dans cette étude permet d'étudier l'effet de la variabilité spatiale du sol, modélisée par des champs aléatoires, sur le comportement de rideaux de palplanches. Le modèle mécanique simplifié proposé MISS-PLQ-CR permet, contrairement aux méthodes tridimensionnelles (en éléments finis ou différences finies), d'obtenir un compromis entre des analyses et résultats suffisamment précis et un temps de calcul réduit. D'autre part, la parallélisation du processus de calcul (simulations de Monte Carlo) sur le cluster AVAKAS a permis d'optimiser encore plus ce temps de calcul.

Les résultats obtenus montrent des effets conséquents des longueurs de corrélation  $\delta$  sur le comportement de l'ouvrage. Pour une grande partie des cas étudiés l'augmentation de  $\delta$  réduit l'indice de fiabilité  $\beta$  en fonction de la direction (verticale ou horizontale), de l'état limite étudié (structurel, géotechnique, environnementale) ou de la corrélation croisée entre paramètres.

## 5. Bibliographie

- [MOK 16] Mokeddem A., Yanez-Godoy H., Elachachi S. M. Comportement de rideaux de palplanches et variabilité spatiale multidimensionnelle du sol., JFMS 2016, 30 Mars-1 Avril, Nancy, 2016.
- [NFP 09] NF P94-282 AFNOR, Calcul géotechnique - Ouvrages de soutènement - Écrans, 2009.
- [DIE 93] C. Dietrich, G. Newsam. A fast and exact method for multidimensional Gaussian stochastic simulation. Water Resour. Res., (8), 2861–2869, 1993.
- [OU 06] OU C.Y, Deep Excavation Theory and Practice, Taylor & Francis Group, London, UK, 2006.