

Etude du comportement des ouvrages de soutènement souples avec prise en compte de la variabilité spatiale du sol

Mokeddem A.¹

¹ Université de Bordeaux, I2M, UMR 5295, département GCE, France,
mail : abdelhammid.mokeddem@u-bordeaux.fr

Prix Jeunes Chercheurs « René Houpert »

RÉSUMÉ. On s'intéresse dans le cadre de cette thèse au comportement des ouvrages de soutènement flexibles (les palplanches). Ces ouvrages sont dimensionnés en section droite (en 2D) avec une prise en compte de l'incertitude par le biais des coefficients partiels de sécurité. L'objectif de cette thèse est d'évaluer l'impact de la variabilité spatiale du sol sur le comportement des palplanches à travers une démarche mécano-fiabiliste. 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 et de coefficients de réaction du sol (ce modèle est appelé « MISS-CR-PLQ »). Le calcul tridimensionnel classique et les simulations de Monte Carlo nécessitent un temps de calcul important, d'où l'intérêt de la démarche développée qui a permis d'abord d'optimiser le temps sur la résolution par éléments finis, par le modèle « MISS-CR-PLQ », et également à travers la parallélisation des simulations de Monte Carlo. 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. In this thesis we focused on the behaviour of a flexible retaining wall (sheet pile). It's commonly designed only as cross-section (2D) by using partial safety factors to cover the soil uncertainties. The purpose of this thesis is to study the soil heterogeneity effects on the structural behaviour of sheet pile walls. We used a mechanical reliability approach. This methodology is based, on one hand, by modelling the soil uncertainty as a random field and, on the other hand, by modelling the soil-structure interaction as a system of a plate and subgrade reaction of soil (this system is called "MISS-CR-PLQ" model). The computation of the classical three dimensional model and the Monte Carlo simulation require a significant time. Hence, the developed methodology which optimize the computation time through the finite element resolution (MISS-CR-PLQ), and through the parallelisation of the Monte Carlo simulation. The first results expressed in terms of reliability index show the effects of the longitudinal behaviour and the soil spatial variability.

MOTS-CLÉS : palplanche, interaction sol-structure, MISS-CR-PLQ, variabilité spatiale, champ aléatoire, fiabilité.

KEY WORDS: sheet pile, soil-structure interaction, MISS-CR-PLQ, spatial variability, random field, reliability.

1. Introduction

La maîtrise du comportement des ouvrages géotechniques (enterrés ou semi-enterrés) est conditionnée par une bonne compréhension et modélisation de l'interaction de l'ouvrage avec son environnement proche. Cette approche est communément connue par « modélisation de l'interaction sol structure (ISS) » et implique une bonne maîtrise de l'ensemble des paramètres pouvant affecter cette modélisation. En effet, les paramètres géotechniques sont souvent entachés d'incertitudes où de méconnaissance par les praticiens. Nous nous intéressons dans le cadre de cette thèse au comportement des rideaux de palplanches. Dans la pratique actuelle [NFP 09], le calcul se fait en section transversale en ne tenant compte d'aucune manière de la dimension longitudinale. A cela s'ajoute également, la prise en compte forfaitaire des effets liés à la variabilité du sol par des coefficients partiels de sécurité sans tenir compte de la variabilité spatiale. L'état de l'art réalisé montre un manque considérable en la matière. En effet, pour ce type d'ouvrage on constate peu d'études ayant combiné à la fois la variabilité spatiale (à travers des champs aléatoires) et d'autre part des modèles de calculs basés sur la prise en compte de l'ISS ([PAP 12], [YAN 17]). Notons, que ces travaux se basent sur une modélisation transversale. Le calcul tridimensionnel intégrant la dimension longitudinale constitue une difficulté de par la taille, le temps de calcul en plus de la complexité relative au couplage éléments finis (EF) et champs aléatoires. Pour cela, la démarche suivie dans le cadre de cette thèse, consistait à décomposer le problème en trois parties :

- *Modélisation de l'ouvrage* : dans cette première partie on s'intéresse à la modélisation de l'écran de soutènement, d'abord, en reproduisant les différentes méthodes de calcul qui existent. Puis, en développant une nouvelle méthode de calcul tridimensionnel plus efficace.
- *Modélisation de l'incertitude géotechnique* : dans la seconde partie on s'intéresse à la modélisation de l'incertitude "géotechnique" soit en utilisant la génération de la variabilité aléatoire (V.A) (moyenne et écart type) qui ne prévoit pas de structuration spatiale. Soit en utilisant les méthodes de génération de champs aléatoires « C.A » en intégrant une structuration spatiale et des longueurs de corrélation selon chaque direction en plus de la moyenne et de l'écart type.
- *Couplage mécano-fiabiliste* : dans cette dernière étape on couple les deux étapes précédentes pour réaliser un calcul probabiliste ou fiabiliste. Sachant que d'une part, les outils de calcul commercialisés ne sont pas forcément adaptés pour réaliser ce type de calcul, et que d'autre part, le temps de calcul est prohibitif, nécessitant des ressources informatiques importantes. Une démarche adaptée à cette problématique a été donc développée.

L'objectif de cette thèse vise à apporter des éléments de réponse concernant l'influence de la variabilité spatiale du sol sur le comportement des écrans de soutènement flexibles. Dans le cadre de cette communication, nous nous intéressons uniquement au comportement tridimensionnel.

2. Modélisation tridimensionnelle des écrans de soutènement

En calcul transversal des soutènements, il existe deux types de méthodes intégrant l'ISS dans le calcul :

- la méthode basée sur une représentation par massif en éléments finis (EF) ou en différences finies (DF),
- la méthode basée sur les coefficients de réactions du sol (CR) par poutre (PTR).

En calcul tridimensionnel des soutènements, le modèle couramment utilisé s'appuie sur l'extension du modèle en massif 2D en intégrant la dimension longitudinale de l'ouvrage. L'état de l'art que nous avons mené montre qu'aucun développement n'a été proposé pour étendre la méthode de CR pour intégrer la dimension longitudinale (excepté pour les radiers). Nous avons jugé nécessaire donc développer cet axe et proposer un modèle tridimensionnel permettant d'obtenir des résultats aussi précis que la méthode 3D mais plus performant en termes de temps de calcul.

Le modèle numérique développé MISS-CR-PLQ est schématisé sur la Figure 1. Celui-ci est basé sur la modélisation de la palplanche par une plaque de comportement orthotrope et de l'ISS par des ressorts à comportement élastoplastiques. Les tirants sont également modélisés par des ressorts de comportement élastique. Par ailleurs, les liernes sont modélisées par des éléments poutres contrairement à l'approche bidimensionnelle classique où elles ne sont pas intégrées. La méthode développée est basée sur un calcul itératif en utilisant des lois de réaction de type force-déplacement (notée p - y [OU 06]) où l'on passe d'une situation initiale au repos à une situation d'équilibre après convergence.

$$\frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + 2 \frac{\partial^4 w}{\partial x^2 \partial z^2} + \frac{\partial^4 w}{\partial z^4} = \frac{1}{D_i} [p_y(x, z) - K_{SS}(x, z)w] \quad [1]$$

Avec : K_{ss} qui représente la raideur de l'interaction sol structure en chaque point de contact entre le sol et la structure. Cette raideur est calculée en utilisant l'expression de Menard [MEN 64], et constitue la branche élastique de la loi de réaction qui est limitée par des paliers de plasticité nommés aussi les états limites de poussée et de butée (calculés à partir des expressions de Coulomb ([COU 76])). Le rôle de cette loi de réaction est majeur puisqu'il permet de définir la force devant être appliquée à chaque nouvelle itération ; w représente le déplacement de la plaque ; $p_y(x, z)$ la pression exercée par le sol sur l'ouvrage ; D_i représente la rigidité flexionnelle ou tensionnelle de la plaque.

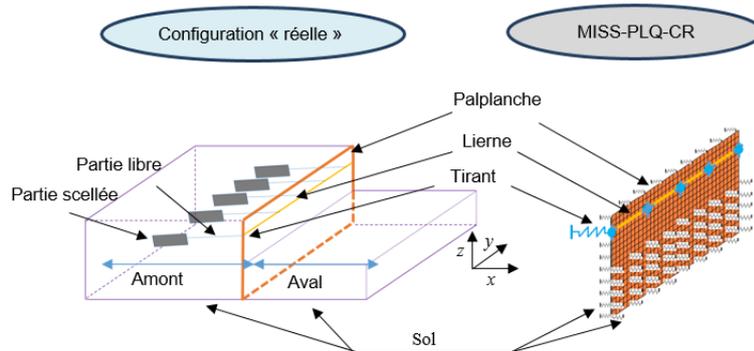


Figure 1. Schématisation de la méthode MISS-CR-PLQ.

3. Couplage mécano fiabiliste

La démarche de calcul développée (Figure 2) dans le cadre cette thèse est organisée en quatre phases :

La première phase consiste à introduire les données caractérisant la géométrie, les caractéristiques mécaniques des structures (palplanche, tirant, lierne), le sol et l'incertitude du sol.

La deuxième phase consiste à mettre en place les données de calcul qui alimenteront le code de calcul par éléments finis. Pour cela plusieurs étapes intermédiaires sont nécessaires, en passant d'abord par la génération de champs aléatoires C.A dans l'espace normé ($\mu=0$ et $\sigma=1$). Ensuite, par la corrélation entre les champs aléatoires des différents paramètres géotechniques pour décrire la corrélation physique existante (appelée corrélation croisée ou transversale à l'exemple de celle qui existe entre c et φ). Enfin, par la transformation de ces champs corrélés de l'espace normée vers l'espace physique des paramètres géotechniques (cohésion « c », angle de frottement « φ » et module pressiométrique « E_p »). A l'issue de ces étapes intermédiaires les lois de réaction seront construites et prêtes à être utilisées par le code éléments finis.

La troisième phase consiste à procéder à la résolution par éléments finis. Cette phase est généralement la plus contraignante puisqu'elle nécessite de reproduire le calcul par éléments finis un certain nombre de fois N_{SIM} (dans cette communication $N_{SIM}=10^5$ simulations). La parallélisation des simulations de Monte Carlo sur le cluster AVAKAS de l'université de Bordeaux a permis de passer d'un calcul séquentiel réalisé sur un ordinateur personnel (PC) à un calcul parallèle exécutant plusieurs simulations en même temps, ceci a permis à un gain de temps estimé à 98,5%.

La quatrième étape consiste à post traiter les résultats mécaniques obtenus (moment fléchissant, contrainte, ...) et de les décrire de manière probabilistes (par des courbes de distribution par exemple), ou de manière fiabiliste en termes de fiabilité/probabilité de défaillance par état limite (ultime ou de service). Une description du système peut également être faite par la fiabilité/probabilité du système.

Dans ce qui va suivre nous nous intéressons au processus de génération de la variabilité spatiale du sol de la phase 2. De même pour la phase 4 où l'on va résumer les états limites ainsi que les démarches suivies pour le calcul de la défaillance du système.

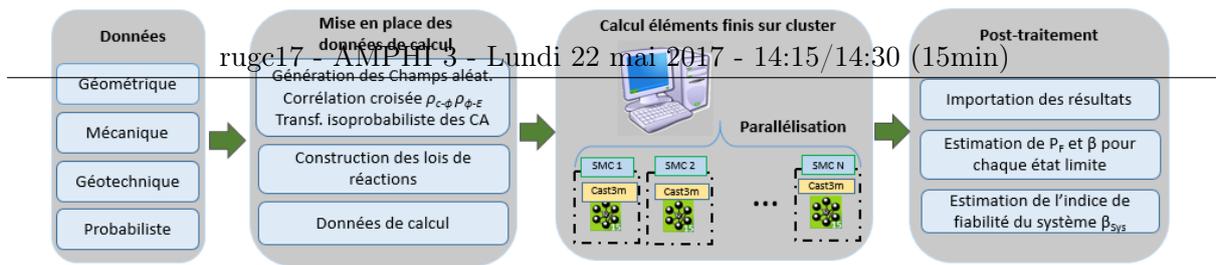


Figure 2. Organigramme du calcul probabiliste.

3.1. Modélisation de la variabilité spatiale du sol par champ aléatoire

Le recours à la modélisation de la variabilité spatiale par champs aléatoires s'est beaucoup développée ces dernières années et généralisée pour plusieurs types d'ouvrages de génie civil en décrivant soit l'environnement de l'ouvrage comme l'incertitude du sol, soit en décrivant l'incertitude du matériau de l'ouvrage (béton, maçonnerie,...). Il existe plusieurs types de méthodes de génération de C.A (LAS (Local Average Subdivision), FFT-Spectral, BT (Bandes tournantes), CE (Circulant Embedding), ...). Chaque méthode a ses propres spécificités mais la procédure de génération est la même pour toutes (voir §3, deuxième phase) c.-à-d. le champ aléatoire est d'abord généré dans un espace normé, pour être ensuite transformé dans l'espace physique (variable physique ex. cohésion, angle de frottement,...) par les méthodes de transformation isoprobabiliste. Le critère le plus important de comparaison entre méthodes est sans doute celui de l'efficacité de la méthode (sa rapidité). En littérature, des comparaisons faites notamment par [FEN 08] et [DAN 12] montrent que les méthodes employant la transformée de Fourier FFT sont plus rapides. Le choix s'est porté donc pour la méthode C.E qui a recours à la FFT. Cette méthode a été développée initialement par [DIE 93] et permet de générer des champs aléatoires gaussiens stationnaires en intégrant la matrice de covariance dans un bloc de matrice circulaire. Pour ce qui est de la structuration spatiale le choix s'est porté sur la fonction d'autocorrélation exponentielle $\rho(\tau_V, \tau_H)$, équation [2].

$$\rho(\tau_V, \tau_H) = \exp\left(-\frac{2|\tau_V|}{\delta_V} - \frac{2|\tau_H|}{\delta_H}\right) \quad [2]$$

Avec τ représente les distances entre deux points corrélés dans le champ aléatoire et δ représente la longueur de corrélation qui peut d'ailleurs être mesurée en géostatistique par un variogramme par exemple. Les indices V et H utilisés représentent respectivement les directions verticale et horizontale.

3.2. Défaillance par état limite et défaillance du système

3.2.1. Défaillance par état limite (ou individuelle)

La détermination de la probabilité de défaillance (par conséquent, l'indice de fiabilité) se fait à travers la définition de la fonction de performance $G(x)$ exprimée pour chaque mode de défaillance et à chaque simulation.

$$G(x) = R(x) - S(x) \quad [3]$$

Avec R et S représentent respectivement la résistance et la sollicitation vis-à-vis du mode de défaillance évalué en un point donné x . Les différents états limites retenues pour ce type d'ouvrage sont regroupés en trois familles (Figure 3) leurs définitions sont données au Tableau 1.

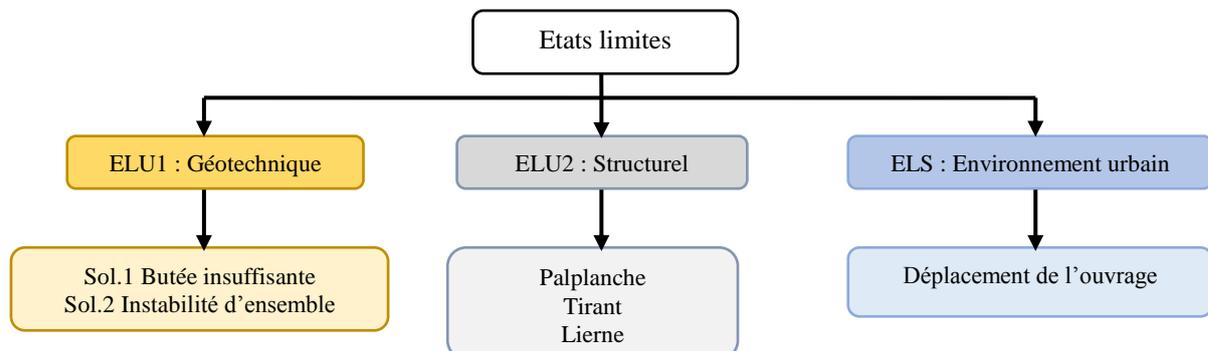


Figure 3. Familles d'états limites.

Type	Elément	Explication	Expression/explication numérique
ELU1 Géotechnique	Sol.1	Butée insuffisante, plastification totale des ressorts de l'ISS	Test de convergence
	Sol.2	Instabilité du système sol-structure, critère de convergence non respecté au cours du calcul itérative	Test de convergence
ELU2 Structurel	Palplanche	Rupture par plastification de la planche	$\sigma_{Von} = \sqrt{\frac{M_{YY}^2 + M_{ZZ}^2 - M_{YY}M_{ZZ} + 3M_{YZ}^2}{W_{ELp}^2}}$
	Tirant	Rupture à la traction du tirant	$\sigma_T = T_T/A_T$
	Lierne	Rupture par plastification de la lierne	$\sigma_L = M_L/W_{ELwL}$
ELS Urbain	Environnement urbain	Déplacement important de l'ouvrage	Déplacement maximal de l'ouvrage

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

3.2.2. Défaillance du système

La défaillance d'un écran de soutènement est assimilée ici à un système en série, dans lequel la défaillance d'un état limite conduit nécessairement à la défaillance de tout le système. L'expression couramment utilisé pour la détermination p_{sys} pour des états limites non corrélés est donnée dans l'équation [6] :

$$p_{sys} = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - p_i) \tag{4}$$

Avec : n étant le nombre d'état limite considéré et p_i la probabilité de défaillance de l'état limite i .

On peut également proposer une simplification afin de mieux assimiler l'expression [6]. Cette équation peut être réécrite sous la forme de l'équation [7] qui consiste à supposer que la probabilité du système revient à cumuler les probabilités des différents états limites. En termes d'indice de fiabilité (obtenu par la loi normale standard inverse ϕ^{-1}), ceci conduit à une valeur β_{sys} minimale (plus la P_{sys} augmente, plus le β_{sys} lui correspondant diminue).

$$p_{sys} = \sum_{i=1}^n p_i \tag{5}$$

4. Du calcul probabiliste au calcul fiabiliste

4.1. Cas d'étude

Une présentation synthétique du cas d'étude est donnée dans cette partie. L'ouvrage considéré est un rideau de palplanches de type AU 16 implanté dans un sol bi-couches (cf. Tableau 2) à dominance sableuse. Un dispositif de tirants précontraints d'une force admissible de 340kN et d'une section de 560mm² 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 4. La contrainte limite de rupture de l'acier f_u est de 240Mpa pour la palplanche et la lierne, par ailleurs elle est de 1570Mpa pour les tirants.

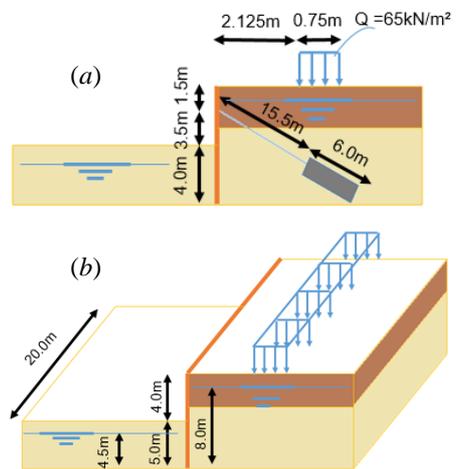


Figure 4. Dimensions du cas d'étude : a) en plan b) spatiales.

Tableau 2. Propriétés géotechniques.

Couche	Type	Profondeur [m]	γ [kN/m ³]	γ' [kN/m ³]	ϕ [°]	c [kPa]	E_p [Mpa]
1	Tourbe	[0, 4]	13,1	12,1	23,9	7,5	1,27
2	Sable	[4, 9]	20,0	12,0	35,0	0	25,00

Trois propriétés du sol sont modélisées par des champs aléatoires à la fois isotropes (l'angle) de frottement φ 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 , φ et E_p .

S'agissant des champs aléatoires, les longueurs de corrélation transversale et longitudinale du sol (δ_V et δ_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 ρ_{c-E}).

4.2. Résultat d'une simulation de Monte Carlo

On s'intéresse ici à quelques résultats issus d'une seule simulation de Monte Carlo (Figure 5). L'intérêt de ce type d'illustration est de montrer la non constance du comportement mécanique (manifesté par des résultats comme le déplacement, la contrainte ou le moment fléchissant) sur l'étendue de l'ouvrage contrairement à une approche classique déterministe ou non déterministe. En effet, on s'aperçoit clairement que d'une part, il y a une concentration de contrainte sur quelques profils (entre 12 et 14m sur la longueur de l'ouvrage), et d'autre part de la présence d'un déplacement différentiel. Sachant qu'il existe un lien direct entre le déplacement de l'ouvrage et le tassement se produisant en amont, ce qui peut donc avoir un impact sur les structures mitoyennes.

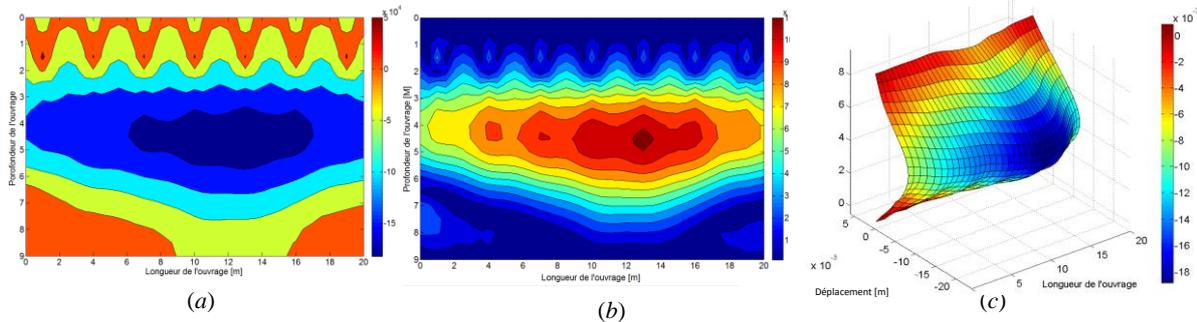


Figure 5. Résultats de la simulation N°15992 avec $\delta_V=5m$ et $\delta_H=50m$: a) moment fléchissant M_{yy} , b) contrainte équivalente de Von Mises, c) déplacement de la palplanche.

4.3. Influence des longueurs de corrélation

On s'intéresse dans cette partie à l'influence des longueurs de corrélation (transversale et longitudinale) sur le comportement géomécanique exprimé par les indices de fiabilité β pour les états limites ELU1 et ELU2. Pour cela une étude paramétrique est menée sur des intervalles de longueur de corrélation sur chaque direction (δ_V [0,5 – 10m] et δ_H [10 – 100m]) comme illustré sur la Figure 6 de la grille des longueurs de corrélation, et résumé dans le Tableau 3. i.e. chaque cas est constitué d'un couple de longueurs de corrélation, l'abréviation en lettre "C" est utilisé pour exprimer un "cas". Notons que dans cette partie les paramètres ne sont pas corrélés entre eux.

Tableau 3. Longueurs de corrélation.

	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9
δ_V [m]	0,5	0,5	0,5	5	5	5	10	10	10
δ_H [m]	10	10	10	50	50	50	10	10	10
							0	0	0

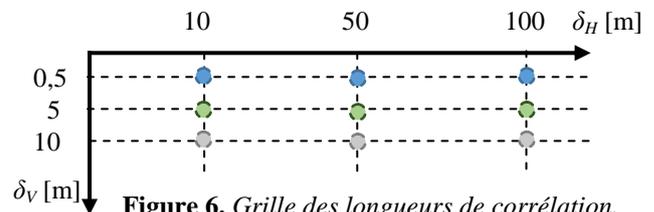


Figure 6. Grille des longueurs de corrélation.

Les résultats obtenus nous permettent de faire les constats suivants :

- Concernant l'influence de δ_V on peut dire que l'augmentation de ce paramètre statistique conduit à la diminution de β surtout sur l'intervalle de [0,5 – 5m] indépendamment de l'ELU évalué. Par exemple dans la Figure 7.d où $\delta_V=10m$ on passe de $\beta=9$ à $\beta=3,3$. La diminution sur l'intervalle [5 – 10m] est moins prononcée.
- Par ailleurs, l'influence de δ_H sur l'indice β est différente selon l'état limite évalué en plus de l'intervalle d'étude. En effet, pour l'ELU1 les mêmes constats faits pour δ_V restent valables, par contre pour l'ELU2 et particulièrement pour les courbes représentant $\delta_V=5m$ et $\delta_V=10m$ on s'aperçoit d'un comportement contraire à celui observé précédemment puisque l'augmentation δ_H se manifeste par l'augmentation de β .
- Les figures 7. (c et f) représentent les isovalues de l'influence combinée des paramètres δ_V et δ_H .

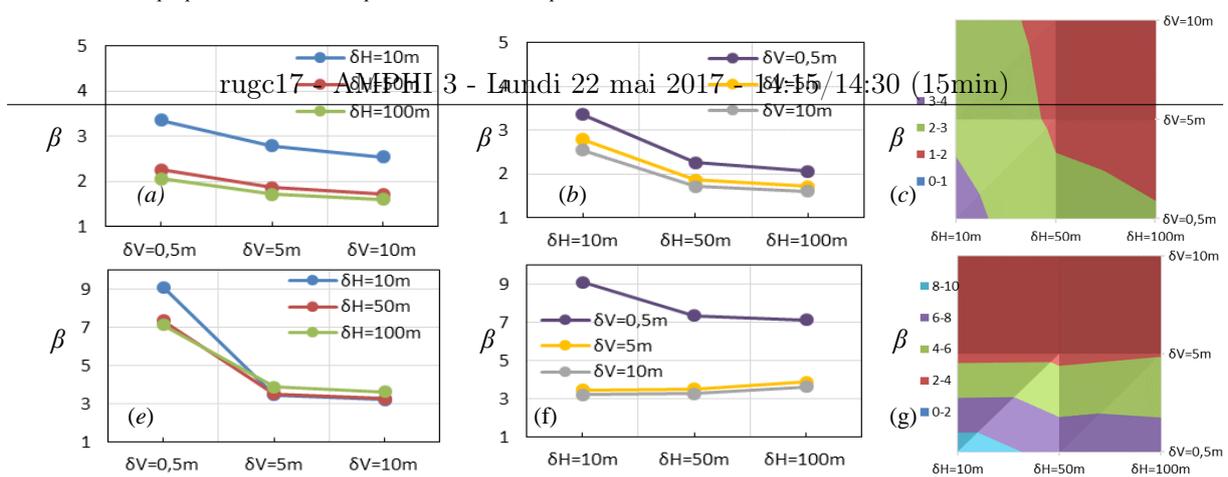


Figure 7. Influence des longueurs de corrélations a) influence de δ_V sur l'ELU1, b) influence de δ_H sur l'ELU1, c) influence de δ_V et δ_H sur l'ELU1, d) influence de δ_V sur l'ELU2, e) influence de δ_H sur l'ELU2, f) influence de δ_V et δ_H sur l'ELU2 ;

4.4. Influence de la corrélation croisée entre paramètres géotechniques

On s'intéresse dans cette partie à l'influence de la corrélation croisée entre paramètres géotechniques (i.e. champs aléatoires). Pour cela, une étude paramétrique est menée, celle-ci est basée sur un plan d'expérience pour deux paramètres $\rho_{c-\phi}$ et $\rho_{\phi-E_p}$, avec trois valeurs possibles pour chaque paramètre (deux valeurs extrêmes -0,5 et 0,5 et d'une valeur intermédiaire 0). Ceci conduit au final à 9 combinaisons de corrélation « C.R » possibles.

Tableau 4. Combinaisons de corrélations étudiées.

	C.R.1	C.R.2	C.R.3	C.R.4	C.R.5	C.R.6	C.R.7	C.R.8	C.R.9
$\rho_{c-\phi}$	0	0	0	-0.5	-0.5	-0.5	0.5	0.5	0.5
$\rho_{\phi-E_p}$	-0.5	0	0.5	-0.5	0	0.5	-0.5	0	0.5

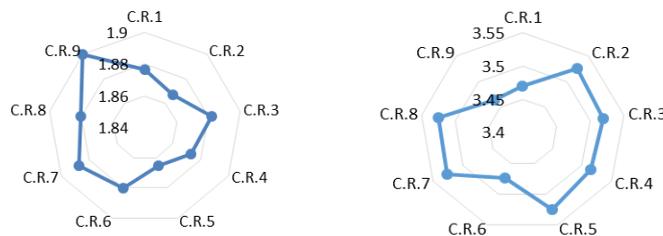


Figure 8. Influence de la corrélation croisée sur l'indice de fiabilité β a) pour l'ELU1, b) pour l'ELU2.

Les résultats obtenus dans cette partie montrent une sensibilité du comportement vis-à-vis à la corrélation croisée. Cette différence reste cependant peu importante contrairement au sol à caractère argileux [MOK 17]. Ceci peut s'expliquer par les points suivants :

- Pour ce qui est de la corrélation entre c et ϕ elle a peu d'influence pour deux raisons : d'une part par ce que l'argilosité de la couche supérieure exprimée par la cohésion est faible $c=7,5\text{kpa}$. D'autre part, par ce que sa dimension est moins importante que la couche sableuse se trouvant au-dessous. Ce qui conduit d'ailleurs à une absence de corrélation dans la couche de sable (absence de cohésion).
- Pour ce qui est de la corrélation entre ϕ et E_p celle-ci est aussi faible, ce qui confirme que pour les sols sableux c'est plutôt l'angle de frottement qui a le plus d'impact [YAN 17] par rapport au module pressiométrique.

4.5. Défaillance du système

On s'intéresse dans cette partie à la défaillance du système. Les résultats sont exprimés en termes de probabilité de défaillance pour chaque état limite (ELU1 et ELU2 respectivement β_1 et β_2) et pour le système (β_{sys}).

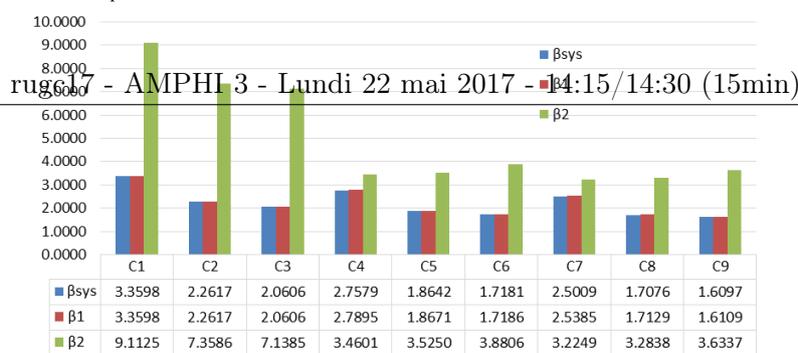


Figure 9. Fiabilité de défaillance du système sol-palplanche.

Les résultats obtenus pour cette étude montrent l'influence considérable de l'ELU1 (géotechnique) sur la défaillance du système. En effet, les histogrammes représentant β_{sys} et ceux de β_1 (ELU1) sont très proches ce qui montre la dominance de cet ELU sur comportement du système. Pour rappel, le calcul de β_{sys} peut être assimilé au cumul des probabilités des différents états limites voir équation [7], donc l'ELU le plus influant donne la fiabilité la plus proche de β_{sys} (§3.2.2).

5. Conclusion

L'objectif de cette thèse était d'évaluer l'impact de la variabilité spatiale du sol sur le comportement des écrans de soutènement flexibles. Pour cela une démarche mécano-fiabiliste a été développée, celle-ci est basée d'une part sur le modèle mécanique simplifié proposé dans le cadre de cette thèse MISS-CR-PLQ. Ce modèle permet d'avoir un compromis entre des résultats suffisamment précis et un temps de calcul réduit et reste donc plus efficace que les méthodes tridimensionnelles classiques (en éléments finis ou différences finies). 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 pour le cas d'étude traité ici montrent l'influence de la variabilité spatiale sur le comportement des écrans de soutènement. Ce type de démarche peut être également valorisé dans une optique d'optimisation, puisqu'en plus de l'aspect sécuritaire qui est primordial pour la tenue de l'ouvrage, l'aspect économique pourrait être intégré plus en amont.

6. 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.
- [YAN 17] Yanez-Godoy H., Mokeddem A., Elachachi S. M. « Influence of spatial variability of soil friction angle on sheet pile walls' structural behaviour ». *Georisk: Assessment And Management Of Risk For Engineered Systems And Geohazards*. Published online DOI 10.1080/17499518.2017.1297465, 2017.
- [PAP 12] Papaioannou I., and D. Straub. 2012. « Reliability Updating in Geotechnical Engineering Including Spatial Variability of Soil ». *Computers and Geotechnics* 42: 44–51.
- [MEN 64] Menard L., Bourdon G., Houy A. « Etude expérimental de l'encastrement d'un rideau en fonction des caractéristiques pressiométrique du sol de fondation ». *Sols-Soils*, n°9, 1964, p 11-27., 1964.
- [COU 76] Coulomb C.A. *Essai sur application des regles de maximis et minimis a quelques problèmes de statique, relatifs à l'architecture*, Mem. Roy. des sciences, Paris, Vol. 3, 1776.
- [DAN 12] Dang X. H. Identification de la variabilité spatiale des champs de contraintes dans les agrégats polycristallins et application à l'approche locale de la rupture. Thèse de doctorat, Université Blaise Pascal-Clermont-Ferrand II, 2012.
- [FEN 08] Fenton G. and Griffiths D. V. (2008). « Risk Assessment in Geotechnical Engineering ». John Wiley & Sons, ISBN: 978-0-470-17820.
- [MOK 17] Mokeddem A., Elachachi S. M., Yanez-Godoy H. « Modélisation tridimensionnelle de rideaux de palplanches tenant compte de la variabilité spatiale du sol ». *AUGC 2017*, Nantes, (article soumis), 2017.