

## EFFET DE L'HÉTÉROGÉNÉITÉ EN PROFONDEUR DES PROPRIÉTÉS DE SOL SUR LA STABILITÉ DYNAMIQUE DES MURS DE SOUTÈNEMENT POIDS

Nourredine Mezouar<sup>1</sup>, Mohamed Hadid<sup>2</sup>, Ahmed Boudani<sup>2</sup>

Réception : 06/11/2016

Acceptation : 09/09/2017

Publication: 31/01/2018

<sup>1</sup> Centre National de Recherche Appliquée en Génie Parasismique, CGS  
01 Rue Kaddour Rahim prolongée, BP 252, Hussein Dey, 16008, Alger, Algérie  
nmezouar@cgs-dz.org

<sup>2</sup> École Nationale Supérieure des Travaux Publics, ENSTP  
Rue Sidi Garidi, BP 32, Kouba, 16051, Alger, Algérie

**Résumé :** Le calcul des poussées des terres actives est une étape importante pour la conception de murs de soutènement poids. La méthode des tranches horizontales (MTH) est utilisée en considérant les propriétés de sol variables aléatoirement en profondeur. La MTH consiste à subdiviser le profil de sol en sous couches horizontales relativement minces et d'assigner à chacune ses caractéristiques géotechniques, notamment l'angle de frottement interne et la cohésion. Ces caractéristiques peuvent varier spatialement en profondeur.

Dans le présent travail, les propriétés du sol sont simulées en utilisant la méthode probabiliste de simulation indirecte de champs aléatoires non-gaussiens. Nous analyserons les effets de cette variabilité sur la poussée active dynamique et l'angle de rupture critique d'une part et sur et la stabilité externe des murs de soutènements vis à vis du glissement et du renversement d'autre part. Les résultats montrent que l'hétérogénéité est associée à une diminution des caractéristiques des sols. Elle induit un accroissement de la poussée dynamique et de l'angle de rupture critique et implique la réduction du facteur de sécurité vis à vis du glissement et renversement.

**Mots clés :** mur de soutènement, poussée dynamique, variabilité spatiale, MTH, stabilité.

**Abstract :** The knowledge of earth pressure is very important for design of gravity retaining walls. A model based on the horizontal slices method has been used, the geotechnical properties are assigned to each slice. The soil properties, especially internal friction angle and cohesion are variable in space (depth), and are simulated using the indirect method of non Gaussian random fields probabilistic simulation. The objective is to study the effect of spatial variability of soil properties on dynamic active pressure, critical angle of rupture and the external stability of gravity retaining walls against sliding and overturning. The results show that the soil heterogeneity is associated to a decrease of soil characteristics; it induces an increase of dynamic active pressure and critical angle of rupture and reduces the security factor against sliding and overturning of the retaining walls.

**Keywords:** retaining walls, dynamic pressure, spatial variability, horizontal slices method, stability.

## 1. Introduction

Les murs de soutènement sont des ouvrages servant à retenir le sol en milieu urbain notamment lorsque le terrain est escarpé. Ils peuvent également servir de butée pour des pentes naturelles instables. En zones sismiques, la réponse dynamique des ouvrages de soutènement révèle un intérêt particulier. L'analyse de la stabilité dynamique des murs de soutènement est l'un des problèmes les plus complexes auquel est confronté l'ingénieur. C'est un ouvrage qui est fortement lié à son environnement avec une interaction très prononcée. Sa stabilité est tributaire des poussées engendrées derrière, surtout que ces pressions seront amplifiées en situation sismique.

Les méthodes de calcul actuelles reposent toutes sur des hypothèses simplificatrices qui ignorent le caractère hétérogène des sols naturels ou des remblais. La variation d'un point à un autre des propriétés physiques et mécaniques du sol apporte une source d'incertitudes sur le comportement statique et dynamique des murs de soutènement. Plusieurs modèles numériques ont été développés pour simuler ces propriétés (Nour et al., 2002 et Nour 2003). Dans ce travail, on s'intéresse à la méthode probabiliste de simulation indirecte de champ aléatoire non-gaussien (Shinozuka, 1987 ; Yamazaki et Shinozuka, 1988). Ainsi, est associée à la variable aléatoire bornée (angle de frottement) la loi de distribution beta, et à la variable aléatoire non bornée (cohésion) la loi de distribution log-normale.

L'objectif de ce travail est de montrer l'effet de cette variabilité spatiale (hétérogénéité en profondeur) des propriétés des sols sur la poussée active dynamique et l'angle de rupture critique d'une part et sur la stabilité externe des murs de soutènement vis à vis du glissement et du renversement d'autre part.

Pour calculer la poussée active générée par le remblai et définir par la suite l'angle de rupture critique ( $\theta_c$ ), la méthode des tranches horizontales qui consiste à subdiviser le profil derrière le mur en sous-couches horizontales (Shahgholi et al., 2001, Nouri et al., 2008, Azad et al., 2008, Ghanbari et Ahmadabadi, 2010, et Boudani, 2014), puis d'assigner à chaque couche les caractéristiques physiques et mécaniques et ensuite d'appliquer les forces agissantes à chaque tranche, est utilisée.

## 2. Calcul des poussées actives dynamiques des terres et vérification de stabilité

Le calcul des poussées en cas dynamique repose sur plusieurs approches. En raison de la complexité de l'interaction sol-mur durant le séisme, la théorie de la poussée est basée sur une solution entièrement plastique, à savoir la méthode pseudo-statique. La formulation de Ghosh et Sengupta, 2012, est présentée. Ils ont utilisé le concept Mononobe-Okabe afin de donner une formulation pour évaluer la poussée dynamique active d'un remblai de  $(c - \Phi)$  produite derrière un mur de soutènement incliné, en considérant que la force de l'adhérence mur-sol ( $c_a$ ) est différente de la force de cohésion ( $c$ ) du remblai.

Soit un mur de soutènement rigide (figure 1) d'une hauteur  $H$  incliné avec un angle  $\alpha$ , retenant un remblai de  $(c - \Phi)$ . Les différents paramètres du schéma sont le poids volumique  $\gamma$ , l'angle de frottement  $\Phi$ , la cohésion  $c$ , l'adhérence  $c_a$ , l'angle de frottement sol-mur  $\delta$ , le remblai étant surchargé par une charge uniformément répartie  $q$ .

Pendant l'état actif d'équilibre, la surface de rupture du coin (BD) génère un angle  $\theta$  avec la verticale. Les forces agissantes sur le système de la figure 1 sont :

- La poussée active dynamique  $P_a$  ;
- La réaction de la terre retenue sur le coin de rupture  $R$  ;
- La cohésion totale  $c = c(\overline{BD}) = \frac{cH}{\cos\theta}$  ;

- L'adhérence totale  $c_a = c_a(\overline{BD}) = \frac{c_a H}{\cos \alpha}$  ;
- Le poids du coin (prisme)  $W = \gamma H^2 (\tan \theta + \tan \alpha) / 2$  ;
- La charge répartie totale  $Q = qH (\tan \theta + \tan \alpha)$  ;
- La force d'inertie horizontale  $(W + Q)k_h$  ;
- La force d'inertie verticale  $(W + Q)k_v$  .

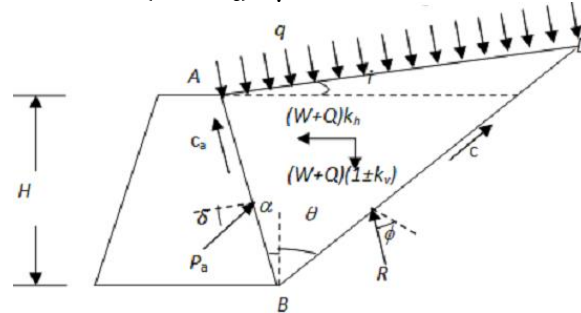


Figure 1. Forces agissant sur le mur de soutènement et coin de rupture durant l'état actif d'équilibre

Après application des conditions d'équilibre sur le prisme de rupture et quelques manipulations, l'expression de la poussée active dynamique est obtenue :

$$P_{ae} = \frac{\gamma_e H^2}{2} (1 \mp k_v) K_{ae}$$

avec :

$$K_{ae} = \frac{\sin(\alpha + \theta) \cos(\theta + \phi - \psi) - n_c \cos \alpha \cos \phi \cos \psi - m_c \cos \theta \cos \psi \cos(\theta + \phi + \alpha)}{\cos \theta \cos \alpha \cos \psi \sin(\theta + \phi + \delta + \alpha)}$$

$$\psi = \tan^{-1} \left( \frac{k_h}{1 \mp k_v} \right); \gamma_e = \gamma + \frac{2q}{H}; n_c = \frac{2c}{\gamma_e H (1 \mp k_v)} \text{ et } m_c = \frac{2c_a}{\gamma_e H (1 \mp k_v)}$$

Dans l'équation de  $K_{ae}$ , tous les termes sont constants sauf  $\theta$ . Lorsque  $\theta = \theta_c$  (angle critique de rupture), la poussée active sismique  $P_a$  est maximale, donc  $P_a = P_{ae}$  et  $K_a = K_{ae}$ . D'où, l'angle de rupture  $\theta_c$  est donné par :

$$\theta_c = \cos^{-1} \sqrt{\frac{(p + q)q + r^2 + r\sqrt{q^2 + r^2 - p^2}}{2(q^2 + r^2)}}$$

avec :

$$p = -\sin(\psi + \delta) - m_c \cos \psi \sin \delta$$

$$q = 2n_c \cos \alpha \cos \phi \cos \psi \cos(\alpha + \phi + \delta) + m_c \cos \psi \sin \delta + \sin(\phi - \psi) \cos(2\alpha + \phi + \delta) + \sin(\phi + \delta) \cos(\phi - \psi)$$

$$r = 2\cos \alpha \sin(\alpha + \phi + \delta) (\sin(\phi - \psi) - n_c \cos \phi \cos \psi)$$

La vérification de la stabilité dynamique externe d'un mur de soutènement concerne les vérifications au glissement, au renversement et au poinçonnement. La stabilité externe vis-à-vis du glissement et du renversement est déterminée à travers les coefficients de sécurité au glissement donné par :

$$F_{Sg} = \frac{(W + P_{aeV}) \tan(\frac{2}{3}\phi_f) + B \cdot c_f}{P_{aeH}}$$

et au renversement donné par :

$$F_{Sr} = \frac{W \cdot a + P_{aeV} \cdot d}{P_{aeH} \cdot H/3}$$

avec :  $P_{aeV} = P_{ae} \cdot \sin(\delta + \alpha)$  et  $P_{aeH} = P_{ae} \cdot \cos(\delta + \alpha)$

$P_{ae}$  est la poussée active dynamique donnée précédemment.

### 3. Application

Nous étudierons l'effet de la variation spatiale de différentes propriétés du sol (angle de frottement, poids volumique et cohésion) sur la stabilité dynamique externe d'un mur de soutènement poids retenant un remblai stratifié cohérent de type  $(c - \phi)$  sec exerçant une poussée active. Le modèle probabiliste proposé par Nour et al., (2002) et Nour (2003) est utilisé. Les propriétés de sol variables sont modélisées par des champs aléatoires. La variation de ces propriétés est considérée uniquement en profondeur (direction  $z$ ).

La détermination de la poussée dynamique exercée sur le mur est basée sur la méthode des tranches horizontales exposée précédemment. L'étude paramétrique porte sur l'influence de la variabilité spatiale en profondeur des propriétés de sol sur la poussée active dynamique, l'angle de rupture et les coefficients de sécurité de la stabilité externe.

*Les données du problème sont pour le sol :*

Valeur moyenne de l'angle de frottement  $\phi_0 = 30^\circ$  et extrêmes  $\phi_{min} = 15^\circ$  et  $\phi_{max} = 45^\circ$

Valeur moyenne du poids volumique  $\gamma_0 = 18KN/m^3$  et extrêmes  $\gamma_{min} = 13KN/m^3$  et  $\gamma_{max} = 23KN/m^3$

Valeur moyenne de la cohésion  $c_0 = 10KN/m^2$

L'adhérence  $c_a = 8KN/m^2$

L'angle de frottement mur/sol  $\delta = 2/3 \phi$

Longueur de corrélation  $\alpha = 1.5$

Coefficients de variation de l'angle de frottement = 0.0; 0.05; 0.1; 0.2; et 0.3

Coefficients de variation du poids volumique = 0.0 ; 0.02 ; 0.05 ; 0.1; et 0.15

Coefficients de variation de la cohésion = 0.0 ; 0.1 ; 0.2 ; 0.5; et 1.0

*Pour le mur*

La hauteur du parement  $H = 6m$

L'angle d'inclinaison du mur  $\alpha = 8^\circ$

Épaisseur du mur  $E = 0.3m$

Largeur de la base du mur  $B = 2m$

Poids volumique béton  $\gamma_{béton} = 24KN/m^3$

*Pour la fondation*

L'angle de frottement semelle-sol de fondation  $\phi_f = 30^\circ$

La cohésion du sol de fondation  $c_f = 10KN/m^2$ .

#### 3.1 Effet de la variabilité des propriétés de sol sur la poussée dynamique active et l'angle de rupture critique

A travers cette étude paramétrique, nous examinons l'influence de la variabilité de l'angle de frottement, le poids volumique et la cohésion sur les moyennes, en considérant 1000 échantillons, de la poussée sismique active et l'angle de rupture critique d'un remblai cohérent stratifié.

### 3.1.1 Influence de la variabilité de l'angle de frottement

La figure 2 présente la variation de la poussée dynamique et de l'angle de rupture critique en fonction de la variabilité de l'angle de frottement. Nous remarquons que pour la poussée active, plus la variabilité de l'angle de frottement augmente, plus la poussée active dynamique moyenne générée augmente. L'augmentation de  $CV_\theta$  favorise l'hétérogénéité en rendant le sol moins frottant. Pour l'angle de rupture critique (figure 2b), on remarque que l'augmentation de  $CV_\theta$  induit une augmentation dans de l'angle de rupture critique relativement faible pour des niveaux d'accélération faibles et plus importante à partir de 0.25g. L'augmentation de  $CV_\theta$  rend la masse du coin de rupture plus grande.

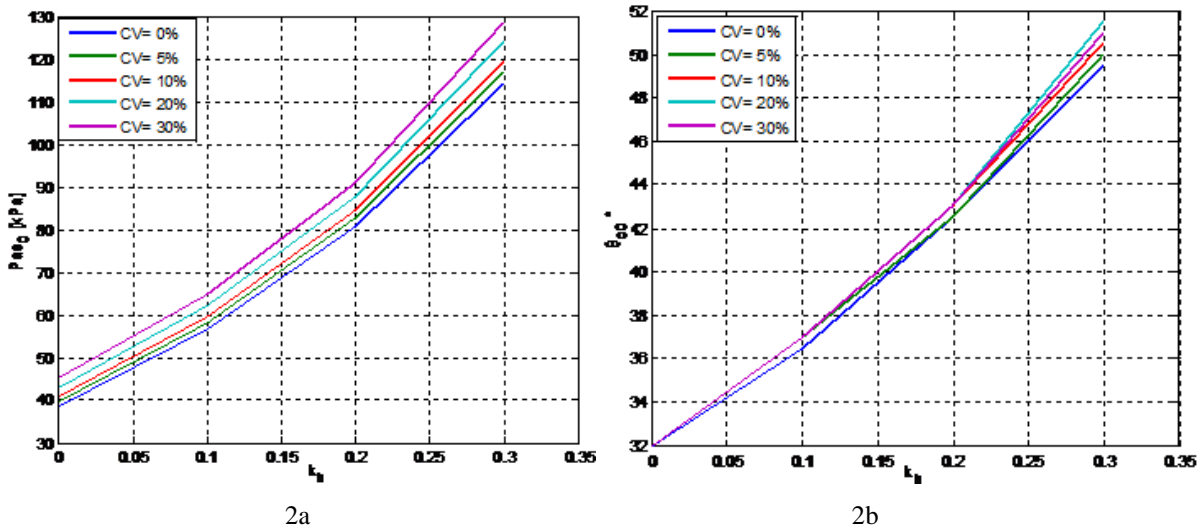


Figure 2: Influence de la variabilité en profondeur de l'angle de frottement interne sur la poussée active (gauche) et l'angle de rupture critique (droite)

### 3.1.2 Influence de la variabilité spatiale du poids volumique

La variabilité en profondeur du poids volumique traduite par différents coefficients de variation  $CV_\gamma$  présente une légère influence sur la poussée active dynamique (figure 3a) et pratiquement aucune influence sur le l'angle de rupture critique. L'augmentation de  $CV_\gamma$  favorise l'hétérogénéité en augmentant le poids volumique ( $\gamma$ ). Cette augmentation induit une augmentation dans la poussée dynamique.

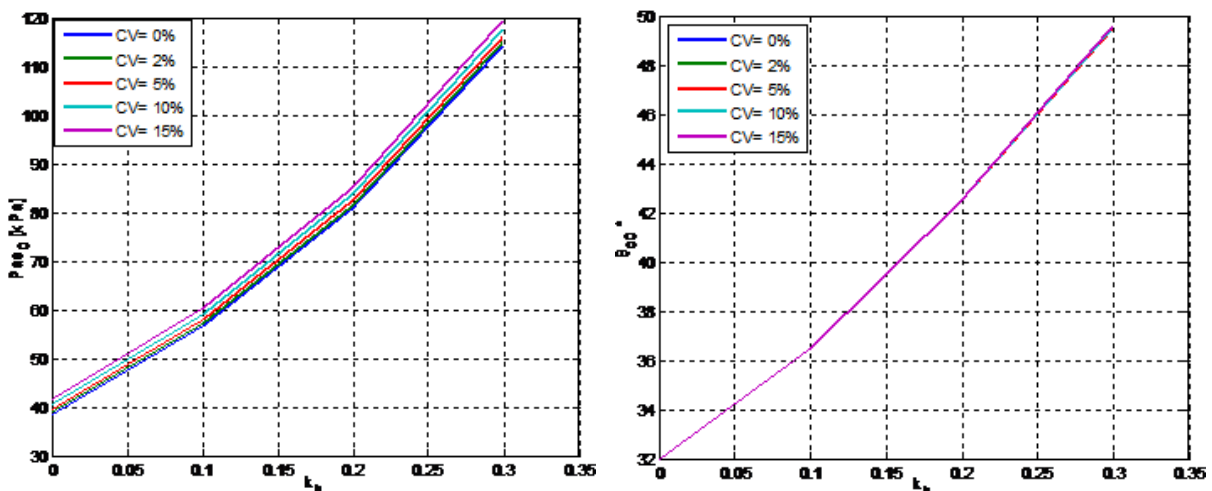


Figure 3: Influence de la variabilité en profondeur du poids volumique sur la poussée active (gauche) et l'angle de rupture critique (droite)

### 3.1.3 Influence de la variabilité de la cohésion

La figure 4 montre les statistiques de la poussée active en fonction du coefficient sismique pour différent niveau de variabilité de la cohésion traduit par différentes valeurs du coefficient de variation ( $CV_c$ ). Pour des variations de  $CV_c < 20\%$ , l'hétérogénéité de la cohésion n'a pas d'influence sur la poussée active dynamique. Au delà de 50%, les effets de la variabilité deviennent important sur la poussée active. en d'autres termes, un  $CV_c$  compris entre 50 et 100% favorise l'hétérogénéité à tel niveau que le type de sol peut changer (de sol cohérent à sol non cohérent).

Les résultats en termes d'effets de la variabilité de la cohésion sur l'angle de rupture critique en fonction d'accélération ont la même tendance que ceux obtenus pour la pression dynamique active. C'est à partir d'une variation de plus de 50% dans la cohésion qu'une augmentation de l'angle de rupture critique apparaît.

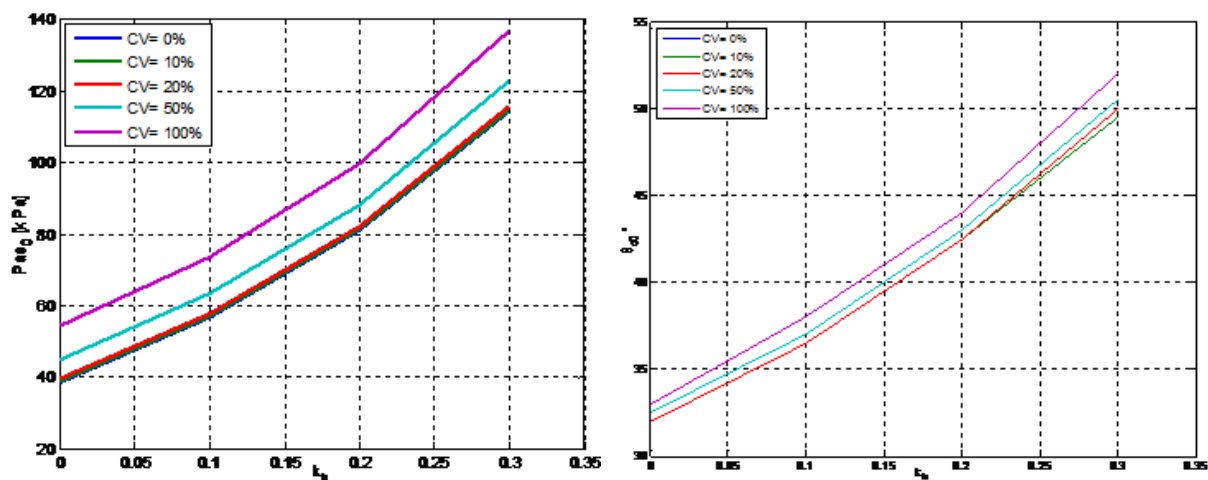


Figure 4: Influence de la variabilité en profondeur de la cohésion sur la poussée active (gauche) et l'angle de rupture critique (droite)

## 4. Effets de la variabilité des propriétés de sol sur la stabilité dynamique des murs de soutènement poids

La poussée active et l'angle de rupture jouent un rôle très important dans l'étude de la stabilité des murs de soutènement poids soutenant un remblai stratifié cohérent de type ( $c - \phi$ ). Nous allons nous intéresser à l'influence de la variabilité en profondeur de l'angle de frottement et la cohésion sur les facteurs de sécurité vis à vis de la stabilité au glissement et au renversement de mur de soutènement.

### 4.1 Influence de la variabilité de l'angle de frottement

La figure 5 présente la variation des facteurs de sécurité vis à vis du glissement et du renversement en considérant la variabilité de l'angle de frottement via différents coefficients de variation  $CV_\phi$  en fonction du coefficient d'accélération. En général, plus le coefficient d'accélération sismique ( $k_h$ ) augmente, plus le coefficient de stabilité moyen au glissement et renversement diminue et plus l'écart entre les valeurs du coefficient de sécurité entre sol homogène et sol hétérogène diminue. Nous remarquons que pour la stabilité vis à vis du glissement, plus la variabilité de l'angle de frottement augmente, plus le facteur de sécurité diminue. L'augmentation de  $CV_\phi$  favorise l'hétérogénéité en rendant le sol moins frottant. Pour la stabilité vis à vis du renversement, on remarque que l'augmentation de  $CV_\phi$  induit une diminution sensible du facteur de sécurité.

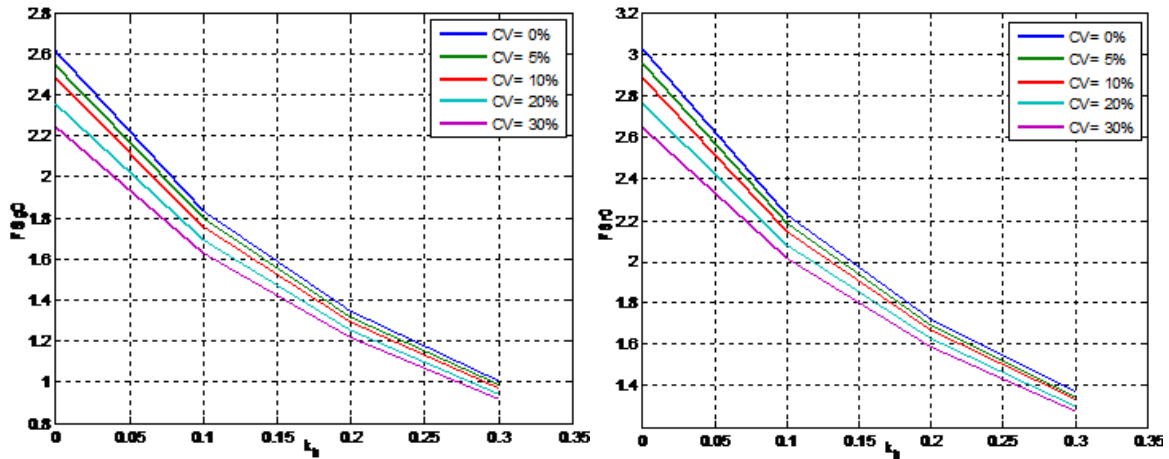


Figure 5: Influence de la variabilité en profondeur de l'angle de frottement sur la stabilité au glissement (gauche) et au renversement (droite)

#### 4.2 Influence de la variabilité de la cohésion

La figure 6 montre les statistiques des facteurs de sécurité vis à vis de glissement et du renversement en considérant la variabilité de la cohésion via différents coefficients de variation  $CV_c$  en fonction du coefficient d'accélération.

Pour des variations de  $CV_c < 20\%$ , l'hétérogénéité de la cohésion n'a pas d'influence sur la poussée active dynamique et au delà de 50%, les effets de la variabilité deviennent importants sur la poussée active. Par conséquent, ces effets sont directement applicables aux coefficients de sécurité vis à vis du glissement et du renversement. En d'autres termes, un  $CV_c$  compris entre 50 et 100% favorise l'hétérogénéité et réduit la stabilité externe du mur.

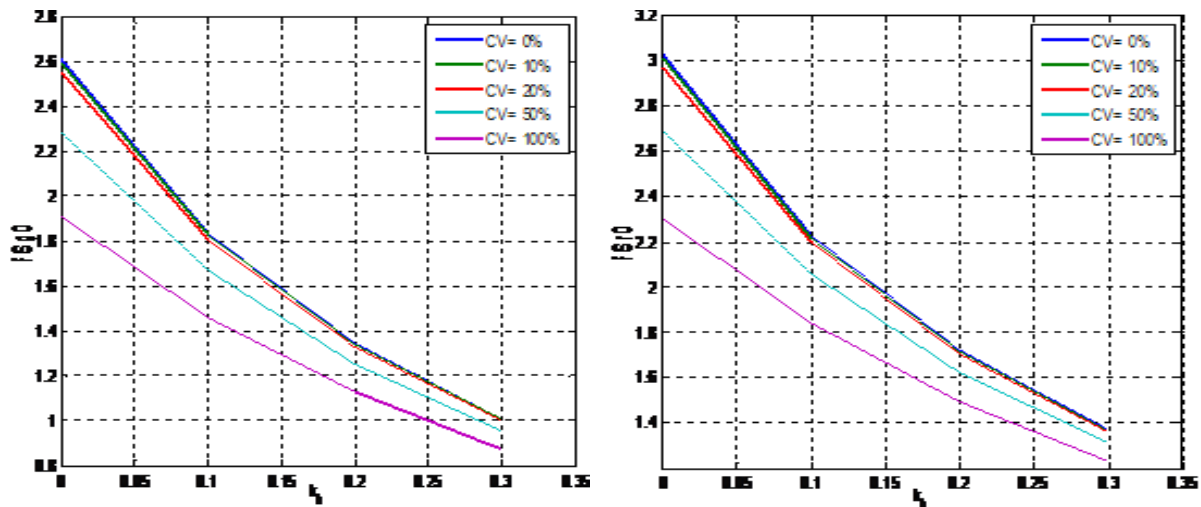


Figure 6 : Influence de la variabilité en profondeur de la cohésion sur la stabilité au glissement (gauche) et au renversement (droite)

#### 5. Discussion

Suite à l'étude paramétrique, nous avons constaté que les paramètres les plus influençant la stabilité des murs de soutènement poids en cas dynamique sont l'angle de frottement et la cohésion. Pour bien montrer les effets de l'hétérogénéité de ces deux propriétés sur la stabilité externe (glissement et renversement) en fonction du coefficient d'accélération sismique ( $k_h$ ), une étude comparative est faite entre un sol homogène et deux sols hétérogènes : le premier présente une variation de l'angle de frottement de  $CV_{\phi} = 30\%$  et les deux autres une variation de la cohésion de  $CV_c = 100\%$ .

Les résultats montrent que le risque d'instabilité se traduisant par la réduction des coefficients de sécurité ( $FS_g$  et  $FS_r$ ) augmente en fonction de l'accélération pour les sols hétérogènes dans l'angle de frottement comme dans le cas homogène (figure 7). A titre d'exemple, pour  $k_h = 0.2$  dans le cas de la stabilité au glissement, le mur retenant un sol homogène est stable mais pour le sol hétérogène ayant un coefficient de variation de 30% ( $CV_\phi = 0.3$ ) ce mur risque de perdre sa stabilité, en comparaison avec la valeur définie dans le RPA2003 ( $FS_{gRPA} = 1.2$ ).

Dans le cas de l'hétérogénéité dans la cohésion ( $CV_c = 100\%$ ), les coefficients de sécurité (figure 8) présentent des valeurs relativement inférieures au cas de l'hétérogénéité dans l'angle de frottement. Les tendances en fonction de  $k_h$  restent les mêmes, i.e. le risque d'instabilité augmente en fonction de l'accélération pour les sols hétérogènes dans la cohésion augmente comme dans le cas homogène.

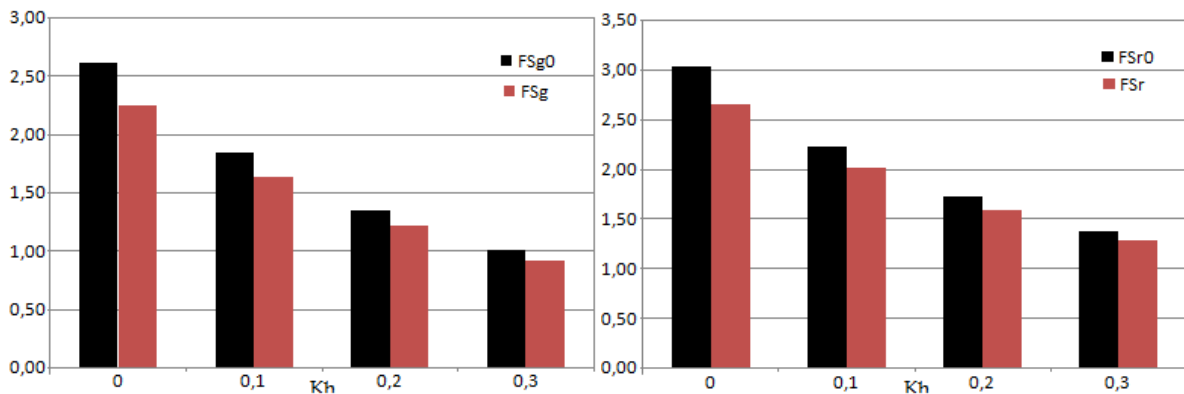


Figure 7: Effets de la variabilité en profondeur de l'angle de frottement ( $CV_\phi = 0.3$ ) sur la stabilité au glissement (gauche) et au renversement (droite)

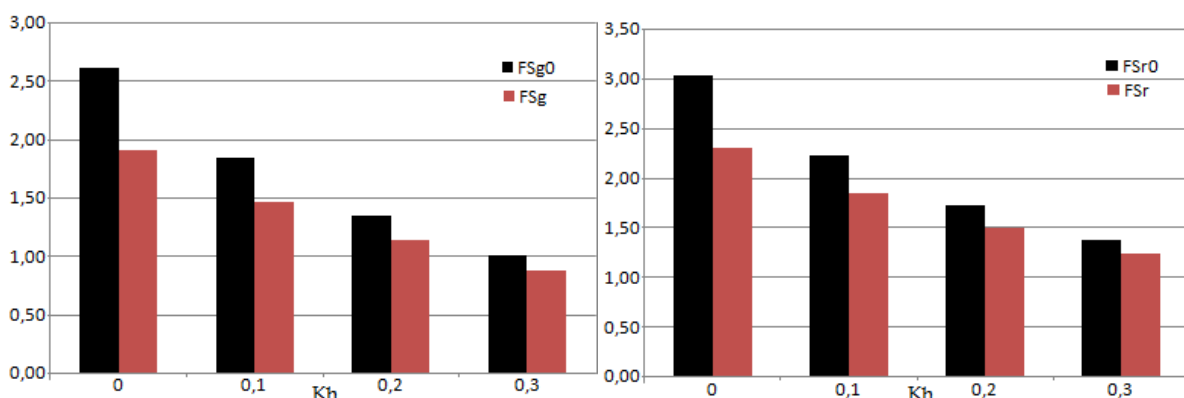


Figure 8: Effets de la variabilité en profondeur de la cohésion ( $CV_c = 100\%$ ) sur la stabilité au glissement (gauche) et au renversement (droite)



## 6. Conclusion

Dans le présent travail, nous nous sommes intéressés à la détermination de la poussée dynamique active et la stabilité dynamique externe (glissement et renversement) d'un mur de soutènement poids retenant un remblai stratifié de  $(c - \phi)$  en tenant compte de la variabilité spatiale en profondeur des propriétés du sol. La méthode probabiliste de simulation indirecte des champs aléatoires non-gaussiens a été utilisée pour la simulation de la variabilité spatiale en profondeur des propriétés du sol. A la variable aléatoire bornée (l'angle de frottement, poids volumique) est associée la loi de distribution beta, et à la variable aléatoire non bornée (cohésion), la loi de distribution log-normale. Pour la détermination de la poussée active dynamique du sol, nous avons utilisé la méthode des tranches horizontales qui consiste en la décomposition du profil de sol en plusieurs couches horizontales qui facilite l'affectation des caractéristiques physiques et mécaniques de chaque couche.

L'étude paramétrique menée a confirmé les tendances prévisibles, à savoir que la poussée active dynamique, dans le cas déterministe, diminue avec l'augmentation de l'angle de frottement et la cohésion et croît avec l'augmentation du poids volumique. Dans le cas de sols hétérogènes :

- L'augmentation du coefficient de variation de l'angle de frottement ( $CV_\phi$ ) induit une augmentation sensible dans la poussée dynamique active. Cet accroissement de  $CV_\phi$  favorise l'hétérogénéité se traduisant par une réduction de l'angle de frottement, rendant ainsi le sol moins frottant et donc moins stable comparé au sol homogène ( $CV_\phi = 0$ ).
- L'augmentation de la variabilité du poids volumique ( $CV_\gamma$ ) présente une légère influence sur la poussée dynamique active et la stabilité externe des murs. Pratiquement son influence sur la stabilité des murs de soutènement poids peut être négligée.
- L'hétérogénéité dans la cohésion n'a d'influence sur la poussée active dynamique et l'angle de rupture critique que pour des variations de coefficient de variation supérieures à 20% ( $CV_c > 0.2$ ). Aussi, son influence est remarquable sur la stabilité pour des variations au delà de 50%.

Les poussées actives ainsi que la stabilité externe des murs de soutènement poids sont plus influencées par l'hétérogénéité dans la cohésion que par l'hétérogénéité dans l'angle de frottement.

Ces résultats mettent en évidence la nécessité de prendre en considération l'effet de la variabilité spatiale en profondeur des propriétés des sols (angle de frottement et cohésion) dans une conception parasismique des murs de soutènement.

## Bibliographie

Ang AHS., Tang WH., *Probability concepts in engineering planning and design*, John Wiley & Sons, 1975.

Azad A., Yasrobi S., Pak A., « Seismic active earth pressure distribution behind rigid retaining walls », *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol. 28, n° 5, 2008, p 365-375.

Boudani A., Effet de la variabilité spatiale des propriétés du sol en profondeur sur la stabilité dynamique des murs de soutènement poids, Thèse de Magister, ENSTP, 2014

- Fenton GA., Simulation and analysis of random fields, Ph.D. thesis, Princeton University, 1990.
- Fenton GA., Vanmarcke EH., « Spatial variation in liquefaction risk », *Géotechnique*, Vol. 48, n° 6, 1998, p 819-831.
- Ghanbari A., Ahmadabadi M., « Pseudo-Dynamic Active Earth Pressure Analysis of Inclined Retaining Walls Using Horizontal Slices Method », *Transaction A: Civil Engineering*, Vol. 17, n° 2, 2010, p 118-130.
- Ghosh S., Sengupta S., « Extension of Mononobe-Okabe theory to evaluate seismic active earth pressure supporting  $c - \phi$  Backfill » *EJGE*, vol. 17, 2012, Bund. D, p 495-504.
- Nour A., « Investigation stochastique sur les milieux hétérogènes par la méthode des éléments finis », Thèse de Doctorat, Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumedienne, Algérie, 2004.
- Nour A., Slimani A., Laouami N., « Foundation settlement statistics via finite element analysis », *Computers and Geotechnics*, Vol. 29, n° 8, 2002, p 641-672.
- Nour A., Slimani A., Laouami N., Afra H., « Finite element model for the probabilistic seismic response of heterogeneous soil profile », *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol. 23, n°5, 2003, p 331-348.
- Nouri H., Fakher A., Jones C., « Evaluating the effects of the magnitude and amplification of pseudo-static acceleration on reinforced soil slopes and walls using the limit equilibrium horizontal slices method », *Geotextiles and Geomembranes*, Vol. 26, n°3, 2008, p 263–278.
- Shahgholi M., Fakher A., Jones C., « Horizontal slice method of analysis », *Geotechnique*, Vol. 51, n°10, 2001, p 881-885.
- Shinozuka M. (1987). « Stochastic fields and their digital simulation ». In: *Schueller GI and Shinozuka M, Editors. Stochastic methods in structural dynamics*, Martinus Nijhoff Publishers, Boston, Mass., p 93-133.
- Yamazaki F., Shinozuka M., « Digital generation of non-Gaussian stochastic field », *Journal of Engineering Mechanics ASCE*, Vol. 114, n°7, 1988, p 1183-1197.