

---

# Effets de la corrélation entre la cohésion et l'angle de frottement sur la capacité portante d'une semelle de fondation superficielle

S. Imanzadeh<sup>1</sup>, D. Breyse<sup>2</sup>, J. Baroth<sup>3</sup>, D. Dias<sup>3</sup>, N. Piegay<sup>2</sup>

<sup>1</sup>INSA de Rouen, LOFIMS, Avenue de l'Université, BP 08, 76801 Saint-Étienne-du-Rouvray, France

<sup>2</sup>Université de Bordeaux – CNRS, UMR 5295 -I2M- Département GCE, Av. des facultés, F-33405 Talence cedex, France

<sup>3</sup>Université Joseph Fourier, Grenoble I, Laboratoire Sols Solides Structures – Risques, CNRS UMR 5521, BP 53, 38041 Grenoble Cedex 9, France

saber.imanzadeh@insa-rouen.fr

---

**RÉSUMÉ.** *Le dimensionnement et la modélisation de la capacité portante d'une semelle filante de fondation superficielle sont l'un des problèmes classiques de la géotechnique. Ce travail propose d'étudier l'effet de la variabilité du sol sur la variabilité de la capacité portante et la sécurité d'une semelle de fondation. En particulier, on s'intéresse à la corrélation entre la cohésion et l'angle de frottement du sol qui n'est à ce jour pas prise en compte dans les approches semi-probabilistes proposées par l'Eurocode 7. On quantifie l'effet de cette corrélation et on étudie comment l'approche par les valeurs caractéristiques et de calcul pourrait être adaptée pour en tenir compte. La prise en compte de cette corrélation apporte une contribution positive aux faibles fractiles de capacité portante. Ne pas en tenir compte semble conservatif.*

**ABSTRACT.** *Designing and modeling the bearing capacity of a shallow strip foundation footing is a classic geotechnical problem. The effect of soil variability on the variability of the bearing capacity and the safety of the foundation is studied in this paper. Subsequently, the correlation between the mechanical parameters of soil is considered in order to study their influence on the safety of the footing. The obtained results show that the "Eurocode 7" semi-probabilistic approach, which does not take into account these correlations between different parameters, could be adapted to do so. Correct treatment of correlation also has a positive effect on the outlying fractiles for the bearing capacity. Not considering this correlation is a conservative approach, which may lead to unnecessary overcost.*

**MOTS-CLÉS:** *variabilité ; fondation superficielle ; capacité portante ; corrélation ; Eurocode 7*

**KEYWORDS:** *variability ; superficial foundation ; bearing capacity ; correlation ; Eurocode 7*

---

## 1. Introduction

Les propriétés physiques et mécaniques d'un sol présentent toutes une certaine variabilité naturelle dont l'origine vient de la complexité des processus géologiques naturels mis en jeu (érosion, transport, dépôt, compaction, transformation physico-chimique) qui mènent à la constitution d'un sol. A cette variabilité se rattache une incertitude sur chacun des paramètres usuellement utilisés pour quantifier la variabilité naturelle : moyenne, variance et fonction de covariance dans le cas d'une approche spatialisée de la variabilité naturelle [BRE 07]. D'une manière générale, les incertitudes peuvent être classées en deux grandes catégories : les incertitudes aléatoires ou actives et les incertitudes épistémiques ou passives [LAC 96, UZI 08]. Les incertitudes aléatoires englobent principalement la variabilité naturelle d'une propriété (variabilités spatiale et temporelle). Les incertitudes épistémiques sont constituées de trois incertitudes, à savoir l'incertitude de modèle, de mesure et de statistique, qui résultent toutes d'un manque d'information. Elles peuvent donc être, en théorie, réduites en se procurant des informations supplémentaires sur le processus à modéliser, la variable à mesurer ou en augmentant le nombre de données pour diminuer l'incertitude statistique. Ces incertitudes sont classiquement prises en compte en considérant chaque paramètre comme une variable aléatoire modélisée par une distribution de probabilité qui, introduite dans un calcul de dimensionnement d'ouvrages, permet d'obtenir l'incertitude attachée à ce dimensionnement.

La modélisation de la capacité portante d'une semelle filante de fondation superficielle est l'un des problèmes classiques de la géotechnique. L'objectif de cette étude est d'étudier l'effet de la variabilité du sol sur la variabilité de la capacité portante et la sécurité d'une semelle de fondation superficielle. Une étude probabiliste de la capacité portante [BRE 11] a déjà montré que les effets des erreurs de modèles sont négligeables devant ceux de la variabilité des propriétés mécaniques. Elle a mis en exergue la nécessité de quantifier finement la

variabilité des propriétés mécaniques de cohésion et d'angle de frottement. En effet, la prise en compte de la corrélation entre ces deux paramètres peut conduire à des conclusions discutables si elle n'est pas basée sur des données statistiques fiables, qui font hélas souvent défaut.

De manière complémentaire aux précédents travaux sur l'effet de la corrélation spatiale [BRE 05, 09, 11], nous proposons ici d'étudier plus particulièrement une modélisation par variables aléatoires corrélées de la cohésion et de l'angle de frottement, et de décrire l'effet de corrélations différentes sur l'estimation de la capacité portante de la fondation. On s'attachera à distinguer deux approches de dimensionnement possibles pour déterminer des valeurs de calcul de la capacité, au sens de l'Eurocode.

### 3. Effets de la variabilité du sol sur la variabilité de la capacité portante et la sécurité de la semelle

La capacité portante d'une semelle filante de fondation superficielle ( $q$ ) peut s'exprimer à partir de l'angle de frottement ( $\phi'$ ) et de la cohésion ( $C'$ ) (caractéristiques mécaniques identifiées au laboratoire) par une formule générique que l'on écrit :

$$q = 0,5 \gamma B N_\gamma(\phi') + (q + \gamma D) N_q(\phi') + C' N_c(\phi') \quad [1]$$

où  $B$ ,  $D$  sont respectivement, la largeur et la profondeur d'une semelle filante,  $\gamma$  est le poids volumique du sol. On distingue les termes dits « de surface », « de profondeur » et « de cohésion ». Les coefficients  $N_\gamma$ ,  $N_q$  et  $N_c$  s'expriment tous en fonction de l'angle de frottement ( $\phi'$ ), mais les expressions de ces coefficients varient selon le modèle [BRI 60, MAG 04, TER 43, VES 73]. Celui retenu ici (Eurocode 7 [COL 96]) les définit ainsi :

$$- N_c = (N_q - 1) \cotan \phi' \quad [2]$$

$$- N_q = \exp(\pi \tan \phi') \cdot \tan^2(\phi'/4 + \phi'/2) \quad [\text{MEY 63}]$$

$$- N_\gamma = 2 (N_q - 1) \cdot \tan(\phi') \quad [\text{COL 96}]$$

Le problème analysé est celui d'une semelle filante (longueur infinie) de largeur  $B = 1$  m, fondée à  $D = 1$  m sous la surface, dans un terrain de poids volumique  $\gamma = 22$  kN/m<sup>3</sup>. Nous étudions le cas d'une semelle sur un sol cohérent et frottant en prenant en compte trois configurations : configuration A ( $\phi' = 10^\circ$ ,  $C' = 27$  kPa), configuration B ( $\phi' = 10^\circ$ ,  $C' = 13,5$  kPa) et configuration C ( $\phi' = 20^\circ$ ,  $C' = 13,5$  kPa).

Le cas d'une semelle sur un sol purement cohérent [ORR 08] et sur un sol purement frottant [BRE 11] ont été traités récemment et nous ne l'aborderons pas ici. Nous allons étudier plus en détail l'effet de la variabilité de l'angle de frottement et de la cohésion. Après avoir présenté la méthodologie employée, nous analyserons l'influence de la corrélation entre ces paramètres sur la capacité portante, puis nous présentons le dimensionnement semi-probabiliste de l'Eurocode 7, qui ignore cette corrélation. Nous proposerons pour terminer une approche semi-probabiliste, dérivée du formalisme Eurocode, qui puisse la prendre en compte.

#### 3.1. Méthodologie

La capacité portante est calculée en employant le modèle «Eurocode 7» de l'équation 1. Nous considérons le caractère aléatoire de la variation des propriétés, en supposant connue la loi de distribution de l'angle de frottement et de la cohésion, et en procédant à des simulations de Monte-Carlo. Nous effectuons 3000 tirages, dont l'on déduit les moyennes ( $\mu$ ), écart types ( $\sigma$ ) et coefficients de variation ( $CV$ ). L'angle de frottement  $\phi'$  est supposé suivre une distribution telle que  $\tan \phi'$  suit une loi normale, de moyenne  $\mu[\tan \phi']$  et d'écart type  $\sigma[\tan \phi']$ . La cohésion  $C'$  est supposée suivre une loi log-normale. On donne :  $\mu[\ln(C')]$ ,  $\sigma[\ln(C')]$ . Les valeurs fournies sont les suivantes :

Configuration A $\phi' = 10^\circ$ , $C' = 27$ kPa	Configuration B $\phi' = 10^\circ$ , $C' = 13,5$ kPa	Configuration C $\phi' = 20^\circ$ , $C' = 13,5$ kPa
$\mu[\tan \phi'] = 0,176$	$\mu[\tan \phi'] = 0,176$	$\mu[\tan \phi'] = 0,364$
$\sigma[\tan \phi'] = 0,026$	$\sigma[\tan \phi'] = 0,026$	$\sigma[\tan \phi'] = 0,052$
$\mu[\ln(C')] = 3,253$	$\mu[\ln(C')] = 2,56$	$\mu[\ln(C')] = 2,56$
$\sigma[\ln(C')] = 0,294$	$\sigma[\ln(C')] = 0,294$	$\sigma[\ln(C')] = 0,294$

**Tableau 1.** Propriétés statistiques des lois de distribution des paramètres aléatoires ( $CV_{\phi'} = 15\%$ ,  $CV_{C'} = 30\%$  sont respectivement les coefficients de variation de  $\phi'$  et  $C'$ ).

Les formules ci-dessous sont utilisées pour transformer les paramètres  $\mu_{\log}$  et  $\sigma_{\log}$  de la variable log-normale  $Y = \exp(G)$  pour obtenir ceux d'une loi Gaussienne associée  $G$ , notés  $\mu_G$  et  $\sigma_G$ .

$$\sigma_G = \sqrt{\ln(1 + CV_{\log}^2)} \quad (3)$$

$$\mu_G = \ln(\mu_{\log}) - 0,5 \sigma_G^2 \quad (4)$$

Ces trois configurations couvrent un domaine relativement large de sols "cohérents et frottants" usuels. Les observations que l'on pourra en déduire auront donc un certain degré de généralité. Un autre degré de liberté de la simulation est la possibilité de considérer que les deux propriétés (frottement et cohésion) sont indépendantes ou corrélées. La corrélation entre les deux grandeurs peut s'expliquer pour deux raisons totalement différentes [BRE 11] :

- une raison d'ordre statistique : à partir des résultats d'essais de cisaillement obtenus sur un sol donné, on cherche à identifier  $C'$  et  $\varnothing'$  en construisant l'enveloppe des cercles de Mohr de rupture. Une certaine incertitude résultant des incertitudes d'essais permet de tracer une infinité de droites. Ainsi, les incertitudes sur  $C'$  et sur  $\varnothing'$  sont liées : si l'on retient une valeur plus faible pour l'angle de frottement, cela conduit à une valeur plus forte pour la cohésion. Il en découle une corrélation négative entre ces deux propriétés.

- la deuxième raison est d'ordre physique. Si l'on considère un ensemble d'échantillons issus de prélèvements effectués *in situ* dans le sol et que l'on considère l'hétérogénéité du sol, cette hétérogénéité peut être liée à une fraction  $F$  de fines argileuses plus ou moins élevée. Quand  $F$  augmente, l'angle de frottement tend à diminuer et la cohésion tend à augmenter. Il en résulte, pour l'ensemble du sol hétérogène, une dispersion des deux propriétés, avec une corrélation négative.

Dans ce qui suit, nous supposons que la corrélation négative résulte de cette explication géotechnique. Nous ferons varier le degré de corrélation  $r(\varnothing', C')$  en considérant quatre variantes :

$$r = 0 \text{ (paramètres indépendants)} ; r = -0,25 ; r = -0,5 ; r = -0,75$$

### 3.2. Effet de la corrélation entre la cohésion et l'angle de frottement sur la capacité portante de la semelle

Les positions de nuages par rapport aux iso-valeurs de  $q$  diffèrent, du fait de différentes valeurs moyennes de cohésion et d'angle de frottement, comme l'illustre la Figure 1 sur laquelle on voit aussi les courbes d'iso-valeurs de  $q$ . La figure 2 montre quel rôle joue la corrélation pour les trois configurations, en comparant les nuages simulés pour les deux propriétés du matériau pour une corrélation faible ( $r = -0,25$ ) et forte ( $r = -0,75$ ) pour les trois configurations étudiées ici. Notre analyse étant focalisée sur la fiabilité et l'influence de la variabilité, c'est à cette aune que nous commenterons les figures, avant d'exploiter plus précisément les valeurs.

Du fait de la dispersion, des valeurs significativement plus faibles que la capacité portante moyenne peuvent être atteintes, ce que traduit l'étendue du nuage (les valeurs les plus critiques se situant dans la partie inférieure gauche du nuage). Comme le montre la figure 2, la dispersion des points autour de la courbe de régression est d'autant plus faible que la corrélation est négative. Cependant, l'écart entre les valeurs moyennes et les valeurs critiques de la capacité portante dépend en outre de la pente du nuage, qui n'est pas la même pour les trois configurations. La configuration la plus défavorable à cet effet est *a priori* celle où la « pente du nuage » est voisine de la pente des iso-valeurs dans la zone d'intérêt. Il y a donc interaction entre l'effet des valeurs moyennes (qui positionne le nuage dans le repère, donc la pente des iso-valeurs) et l'effet de la corrélation entre  $C'$  et  $\varnothing'$ , qui gouverne la pente du nuage.

Même une valeur de corrélation faible ( $r = -0,25$ ), peut influencer de manière significative la capacité portante.

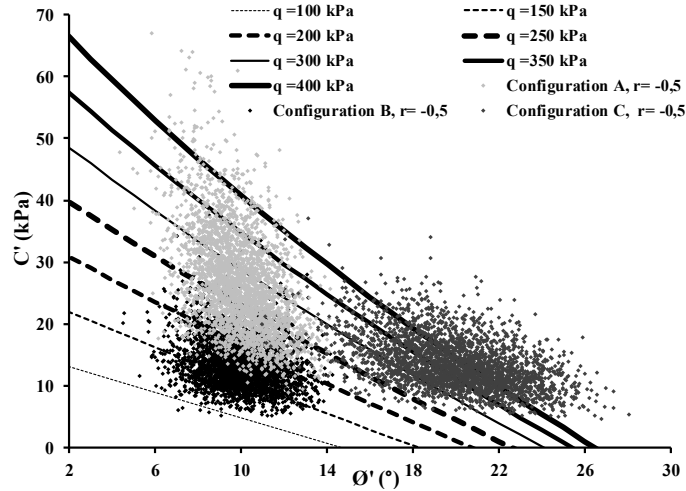
Dans la section suivante, nous travaillons en utilisant et en adaptant l'approche semi-probabiliste de l'Eurocode 7.

### 3.3. Approche semi-probabiliste sans prise en compte de la corrélation entre les variables (Eurocode 7)

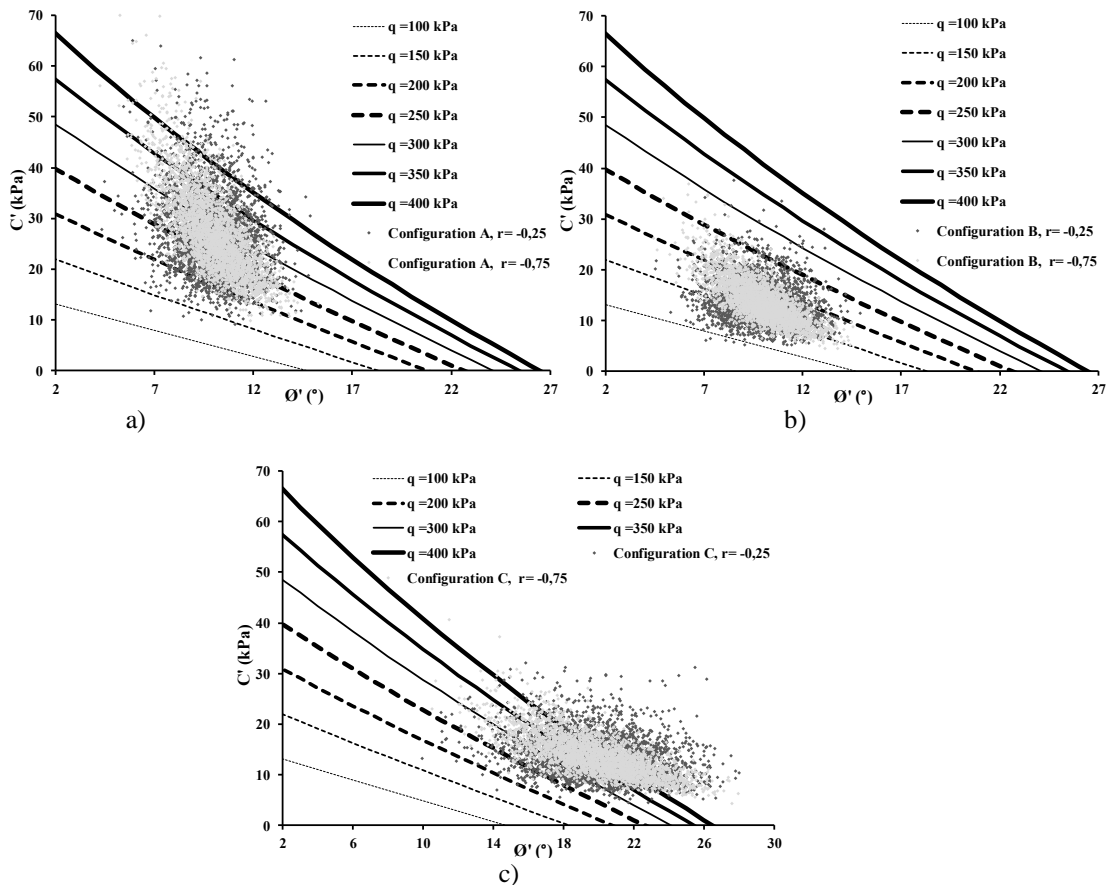
L'Eurocode 7 laisse au concepteur le choix entre plusieurs approches de modélisation. On distingue en particulier [BRE 09] :

- l'approche globale qui consiste à appliquer un coefficient partiel de sécurité (CPS, égal à 1,40) directement sur la valeur globale de la résistance issue du calcul, en prenant les valeurs représentatives des propriétés mécaniques et le modèle de résistance ;

- l'approche locale qui consiste à appliquer des coefficients partiels de sécurité aux propriétés du matériau puis à en déduire la valeur de calcul de la résistance globale, en introduisant ces valeurs dans le modèle mécanique.



**Figure 1.** Illustration de la corrélation entre les paramètres  $\Phi'$  et  $C'$ , accompagné des iso-valeurs de  $q$  et pour une corrélation intermédiaire de  $r = -0,5$  pour les trois configurations étudiées



**Figure 2.** Illustration de la corrélation entre les paramètres  $\Phi'$  et  $C'$ , accompagnée des iso-valeurs de  $q$  et pour les deux corrélations de  $r = -0,25$  et  $-0,75$ , pour a) configuration A, b) configuration B et c) configuration C

Dans l'approche usuelle, ces approches n'intègrent pas la corrélation entre les paramètres de sol. Nous proposons d'utiliser les simulations numériques pour analyser cet effet et de proposer des approches semi-probabilistes alternatives (recourant aux coefficients partiels). Commençons par le cas où  $r = 0$  (paramètres géotechniques non corrélés).

Les simulations permettent d'identifier séparément les valeurs caractéristiques de la cohésion  $C'_k$ , de l'angle de frottement  $(\tan \theta')_k$  et de la capacité portante  $q_k$ .

Pour l'approche globale on peut extraire  $q_k$  du résultat des simulations, en relevant les fractiles à 5 % des distributions simulées (on ne peut utiliser la relation  $X_k = \mu(X) - 1,645\sigma(X)$ , qui suppose une distribution normale). On en déduit alors  $q_d = q_k / 1,4$ .

Pour l'approche locale, on identifie d'abord les valeurs caractéristiques des propriétés (soit analytiquement, puisque leur distribution est connue, soit numériquement, en relevant les fractiles correspondants). On en déduit les valeurs de calcul  $(C'_d, (\tan \theta')_d)$  en appliquant des coefficients partiels de sécurité directement aux valeurs caractéristiques (CPS, égal à 1,25). On en déduit finalement  $q_d$ .

Le tableau 2 présente les résultats obtenus pour les deux approches mentionnées ci-dessus et pour l'ensemble de configurations considérées. On a aussi porté les fréquences  $F_q$  quantifiant quelle est la probabilité, pour chaque jeu de valeurs simulées, que la capacité portante calculée soit inférieure aux différents seuils  $\mu(q)$ ,  $q_k$  et  $q_d$ . Ainsi, par exemple, pour l'approche globale, la fréquence correspondant à la valeur  $q_k$  est naturellement égale à 5 % (elle correspond au choix de ce fractile), et on en déduit celle pour la valeur de calcul  $q_d$ , ne dépassant pas 0,3 %. Pour l'approche locale, seule la probabilité pour  $q_d$  peut être calculée et elle ne dépasse pas de 0,05 %.

Approche (Eurocode 7)		Configuration A	$F_q$ (%)	Configuration B	$F_q$ (%)	Configuration C	$F_q$ (%)
Approche globale sans corrélation	$\mu(q)$ (kPa)	287	55	173	55	395	56
	$\sigma(q)$ (kPa)	72,6		37,9		113	
	$q_k$ (kPa)	188	5	120,8	5	241	5
	$q_d$ (kPa)	134	0	86,3	0	172	0,30
	$q_k / \mu(q)$	0,65		0,70		0,61	
	$q_d / \mu(q)$	0,47		0,50		0,44	
Approche locale sans corrélation	$\mu(q)$ (kPa)	285		173		384	
	$(\tan \theta')_k$	0,13		0,13		0,28	
	$(\tan \theta')_d$	0,106		0,106		0,22	
	$C'_k$ (kPa)	15,9		7,98		7,98	
	$C'_d$ (kPa)	12,8		6,38		6,38	
	$q_d$ (kPa)	127	0	83,5	0	141	0,05
	$q_d / \mu(q)$	0,45		0,48		0,37	

**Tableau 2.** Résultats obtenus pour les approches globale et locale sans corrélation (Eurocode 7,  $r=0$ ) pour les configurations A, B, C ( $\mu(q)$  et  $\sigma(q)$  sont respectivement la moyenne et l'écart type de  $q$ ,  $q_d$  et  $q_k$  sont respectivement les valeurs de caractéristique et de calcul de  $q$ ,  $F_q$  : valeur de la loi de la répartition de  $q$ )

La valeur de calcul de la capacité portante obtenu ( $q_d$ ) pour la configuration A en utilisant les deux approches sont proches ( $q_d = 134$  et  $127$  kPa respectivement pour les approches globale et locale). Cela est valable aussi pour la configuration B. Quelle que soit l'approche, le rapport entre  $q_d$  et  $\mu(q)$  pour ces deux configurations varie entre 0,45 et 0,5. En revanche, les résultats obtenus pour la configuration C en utilisant les deux approches sont différents ( $q_d = 172$  et  $140,9$  kPa respectivement pour les approches globale et locale). Cela met en évidence le rôle de valeurs plus élevées de la cohésion dans la configuration A ( $C'=27$  kPa) et de valeurs plus élevées de l'angle de frottement dans la configuration C ( $\theta'=20^\circ$  kPa). L'expression de la capacité portante (modèle de l'équation 1) est très non linéaire en  $\theta'$  et l'approche globale conduit à des valeurs de calcul significativement plus élevées si l'angle de frottement est fort. Les deux approches ne confèrent donc pas un degré de sécurité homogène sur l'ensemble des configurations possibles.

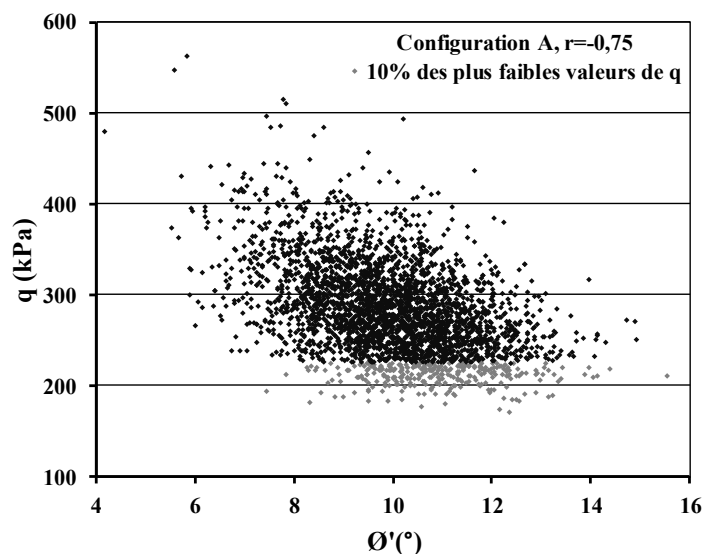
Nous allons maintenant exploiter les résultats des simulations avec les différents degrés de corrélation, pour voir : (a) si ces considérations peuvent être généralisées en présence de corrélation, (b) si l'on peut adapter l'approche aux coefficients partiels pour intégrer l'effet de cette corrélation.

### 3.4. Approches globale et locale avec corrélation

Le principe des simulations numériques est identique à celles que nous avons déjà introduites dans le paragraphe (3.1) en considérant la corrélation entre les paramètres mécaniques du sol ( $C'$ ,  $\tan \theta'$ ). Les simulations fournissent, pour chaque configuration et chaque valeur de  $r$ , des résultats qui sont analysés pour mettre en œuvre les approches globale et locale. Le tableau 3 synthétise l'essentiel des informations exploitées.

Concernant l'approche globale, la démarche est exactement identique à celle décrite ci-dessus. Il suffit d'extraire  $q_k$  du résultat des simulations (faites avec ou sans corrélation), en relevant les fractiles à 5 % des distributions simulées. On en déduit alors simplement  $q_d = q_k / 1,4$ .

Pour l'approche locale, la difficulté consiste à identifier des valeurs caractéristiques pertinentes pour la cohésion et l'angle de frottement, puisque ces deux paramètres sont corrélés. L'idée retenue consiste à s'appuyer sur les résultats des simulations en considérant que, conformément aux Eurocodes, les valeurs caractéristiques sont celles des paramètres qui « gouvernent l'occurrence de l'état limite ». On choisit de distinguer les 10 % de valeurs correspondant aux capacités portantes les plus faibles (figure 3), et on qualifie de valeurs caractéristiques pour la cohésion et l'angle de frottement les valeurs moyennes prises par ces deux paramètres sur le sous-ensemble retenu : on obtient ainsi le barycentre de nuage dans la zone d'intérêt. Après avoir appliqué le coefficient partiel de sécurité recommandé par l'Eurocode (CPS, égal à 1,25) pour calculer  $(C'_d, (\tan\theta')_d)$ , on en déduit alors  $q_d$ .



**Figure 3.** Relation entre la capacité portante et l'angle de frottement interne pour la configuration A,  $r=-0,75$  (illustration de 10 % de valeurs correspondant aux capacités portantes les plus faibles)

La figure 4a illustre l'effet de la corrélation entre paramètres sur l'approche globale. On voit clairement que, pour les trois configurations, la prise en compte de la corrélation négative entre cohésion et angle de frottement a pour effet d'augmenter la capacité portante de calcul. Avec une corrélation  $r = -0,5$ , cette augmentation est de 7 % pour les configurations A et B et de 11 % pour la configuration C. La non prise en compte par l'Eurocode de cet effet est conservatrice. Une manière simple de l'intégrer serait de modifier le coefficient de sécurité global, en le réduisant par exemple à 1,30 au lieu de 1,40.

Pour l'approche locale, on ne peut comparer les valeurs de  $q_k$ . Les comparaisons portent donc soit sur les valeurs de calcul des paramètres géotechniques, soit sur  $q_d$ . On peut noter que la valeur de  $C_d$  reste sensiblement constante et égale à la valeur obtenue sans corrélation, de l'ordre de 13 kPa pour la configuration A et de 7 à 11 kPa pour les deux autres configurations. Cette remarque n'est pas valable pour l'angle de frottement, dont la valeur caractéristique (c'est à dire celle qui est représentative du groupe de valeurs qui contrôle l'état limite) tend à augmenter quand la corrélation devient plus négative. En effet, dans ce cas, une réduction de l'angle de frottement s'accompagne d'une augmentation de la cohésion et l'effet sur la capacité portante peut être positif. Les valeurs de  $q_d$  sont très sensibles à la corrélation : avec une corrélation  $r = -0,5$ , l'augmentation par rapport au cas non corrélé est de 19% pour les configurations A et B et de 29 % pour la configuration C. Les valeurs de calcul ainsi déterminées correspondent toutes à une fréquence de défaillance inférieure à 1%. Contrairement au cas où la corrélation entre les variables est négligée, l'approche locale conduit à des valeurs de calcul de la capacité portante supérieures à l'approche globale. La figure 4b synthétise les résultats en comparant les valeurs de capacité portante de calcul pour les trois configurations, les deux approches et les deux situations ( $r = 0$ ,  $r = -0,5$ ), le cas non corrélé/approche locale étant considéré comme une référence. Les résultats illustrent clairement que la capacité portante est plus élevée si l'on intègre la corrélation entre les variables.

$r$		Simulation		Configuration A	$F_q$ (%)	Configuration B	$F_q$ (%)	Configuration C	$F_q$ (%)
-0,25	Approche locale	3000	$\mu'(q)$ (kPa)	285	56	173,2	55	392	55
			$\sigma(q)$ (kPa)	67,5		33,9		97,8	
		300	$(\tan \phi)_k$	0,17		0,16		0,29	
			$(\tan \phi)_d$	0,13		0,128		0,23	
			$C'_k$ (kPa)	16,7		8,52		10,9	
			$C'_d$ (kPa)	13,3		6,81		8,68	
	$\mu(q)$ (kPa)		191	4,3	123	4,33	247	4	
	médiane ( $q$ ) (kPa)		194	5,0	125	5,00	255	5	
	$q_d$ (kPa)		144	0,9	94,6	0	168	0,1	
	$q_d / \mu'(q)$		0,50		0,55		0,43		
	Approche globale	300	$q_k$ (kPa)	190,6	4,2	122	3,93	246	3,9
			$q_d$ (kPa)	136	0	87,4	0	176	0,1
			$q_k / \mu'(q)$	0,67		0,71		0,63	
			$q_d / \mu'(q)$	0,48		0,50		0,45	
-0,5	Approche locale	3000	$\mu'(q)$ (kPa)	285	56	172,3	55	389	54
			$\sigma(q)$ (kPa)	57,9		29,6		79,9	
	300	$(\tan \phi)_k$	0,178		0,169		0,299		
		$(\tan \phi)_d$	0,142		0,135		0,239		
		$C'_k$ (kPa)	16,8		8,73		11,7		
		$C'_d$ (kPa)	13,4		6,98		9,36		
		$\mu(q)$ (kPa)	201	4,2	128,6	4,00	267,6	4	
		médiane ( $q$ ) (kPa)	204	5	130,6	5	273	5	
		$q_d$ (kPa)	151	0,05	98,7	0,05	182	0,04	
		$q_d / \mu'(q)$	0,53		0,57		0,47		
	Approche globale	300	$q_k$ (kPa)	202	4,6	129	4,20	267	3,9
			$q_d$ (kPa)	144	0	92	0	190	0,1
			$q_k / \mu'(q)$	0,71		0,75		0,69	
			$q_d / \mu'(q)$	0,51		0,53		0,49	
-0,75	Approche locale	3000	$\mu'(q)$ (kPa)	283	55	172,2	56	389	54
			$\sigma(q)$ (kPa)	49,9		23,7		62,1	
	300	$(\tan \phi)_k$	0,193		0,181		0,301		
		$(\tan \phi)_d$	0,154		0,145		0,24		
		$C'_k$ (kPa)	16,5		8,94		13,8		
		$C'_d$ (kPa)	13,2		7,15		11,0		
		$\mu(q)$ (kPa)	210	3,9	138	4,53	294	4	
		médiane ( $q$ ) (kPa)	213	5	139	5	298	5	
		$q_d$ (kPa)	155	0	104	0	199	0	
		$q_d / \mu'(q)$	0,55		0,61		0,51		
	Approche globale	300	$q_k$ (kPa)	211	4,3	137	3,83	294	4,1
			$q_d$ (kPa)	150	0	98,2	0	210	0,04
			$q_k / \mu'(q)$	0,74		0,80		0,76	
			$q_d / \mu'(q)$	0,53		0,57		0,54	

Tableau 3. Valeurs caractéristiques et de calcul de cohésion, angle de frottement et capacité portante, pour les approches globale et locale avec corrélation pour les configurations A, B, C

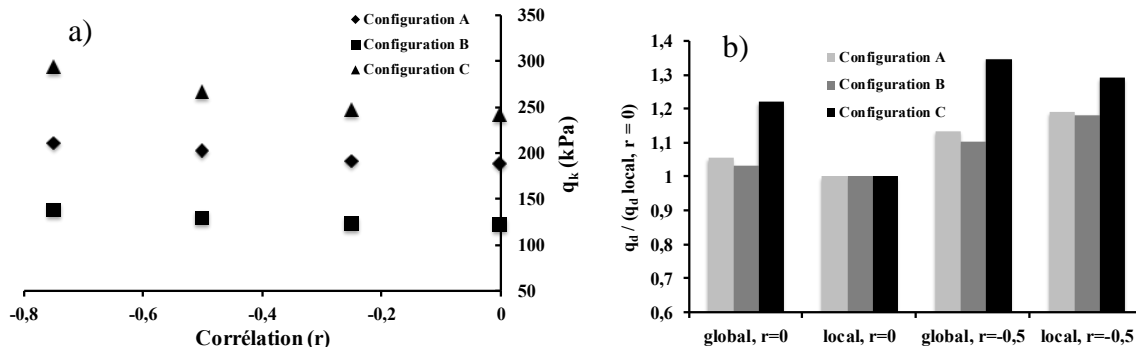


Figure 4. a) Effet de la corrélation sur la valeur caractéristique de la capacité portante (approche globale), b) Effet du type d'approche et de la corrélation sur la valeur de calcul de la capacité portante.

## 5. Conclusions

L'analyse du problème de la capacité portante d'une semelle superficielle conduit à une conclusion majeure : si la réglementation (de type Eurocode) semble en général suffisante pour traiter, même avec de nombreuses simplifications, des cas courants, elle peut conduire à des dimensionnements plus sécuritaires que souhaité si elle ne prend pas en compte la corrélation entre la cohésion et l'angle de frottement. Nous avons quantifié l'effet de la corrélation entre paramètres de cohésion et d'angle de frottement et montré qu'il serait assez facilement possible d'enrichir l'approche Eurocode, tout en conservant le schéma semi-probabiliste, pour mieux tenir compte de la corrélation négative entre ces paramètres. On pourrait conserver les deux types d'approches, locale et globale, en modifiant les valeurs des coefficients partiels de sécurité adoptés.

Ce travail sera prochainement élargi en couvrant l'ensemble de l'espace usuel de variation des paramètres cohésion et angle de frottement et en analysant plus précisément l'impact de tels choix sur les probabilités de défaillance.

## 6. Bibliographie

- [BRE 05] BREYSSE D., Niandou H., Elachachi S.M., Houy L., «Generic approach of soil-structure interaction considering the effects of soil heterogeneity », Symposium in print "Risk and variability in geotechnical engineering", Geotechnique, Vol LV, n. 2., pp. 143-150, 2005
- [BRE 07] BREYSSE D., LA BORDERIE C., ELACHACHI S.M., NIANDOU H., «Spatial variations in soil properties and their consequences on structural reliability», Civil Engineering and Environmental Systems, Vol. 4, n.2, 6/2007, pp. 73-83.
- [BRE 09] BREYSSE D., Maîtrise des risques et construction, Vol. 3 : Sécurité et réglementation, Hermès, 2009.
- [BRE 11] BREYSSE D., Fiabilité d'une semelle de fondation superficielle, in BAROTH, J., SCHOEFS F., BREYSSE D., Fiabilité des ouvrages, Hermès, 2011.
- [BRI 70] BRINCH HANSEN J., A revised and extended formula for bearing capacity. Danish Geotechnical Institute Bulletin, n° 28, pages 5-11, 1970.
- [COL 96] COLLECTIF, Eurocode 7, Norme XP 1997-1: Calcul géotechnique. Déc. 1996, AFNOR.
- [LAC 96] LACASSE, S., and NADIM, F., «Uncertainties in characterizing soil properties», In Proceedings of Uncertainty '96. Geotechnical Special Publication, 1996, 58, Vol. 1, pp. 49-75.
- [MAG 04] MAGNAN J.P., «Modèles de calcul des fondations superficielles : synthèse des méthodes », Actes des conférences géotechniques (Param 2002 - Fondsup 2004 - ASEP-GI 2004), Presses ENPC, 2004.
- [MEY 63] MEYERHOF, G. G., «Some recent research on the bearing capacity of foundations. », Can. Geotech. J., 1, 16-26, 1963.
- [ORR 11] ORR T.L., BREYSSE D., Eurocode 7 and reliability based design, Chapter 8 (pp. 298-343) in Reliability based design in geotechnical engineering: computations and applications, ed. Ko-Kwang Phoon, Taylor & Francis, ISBN 978-0-415-39630-1, 2008.
- [TER 43] TERZAGHI K.V., *Theoretical soil mechanics*, 2nd edition, Wiley , 1943, pp.423-427
- [UZI 08] UZIELLI, M., NADIM, F., Lacasse, S., Kaynia, A.M., «A conceptual framework for quantitative estimation of physical vulnerability to landslides» Engineering Geology, 2008, 102, pp. 251-256.
- [VES 73] VESIC, A.S., «Analysis of ultimate loads of shallow foundations, Journal of Soil Mechanics and Foundations Division», 1973, ASCE, vol. 99, no. SM1, pp. 113-125.