

TRANSFERTS DE CHARGES DANS LES STRUCTURES GÉOTECHNIQUES RENFORCÉES PAR INCLUSIONS RIGIDES

INVESTIGATION OF LOAD TRANSFER MECHANISMS IN GEOTECHNICAL EARTH STRUCTURES REINFORCED BY RIGID INCLUSIONS

Bastien CHEVALIER¹, Pascal VILLARD¹, Gaël COMBE¹, Stéphane GRANGE¹
¹ *Grenoble Universités, Laboratoire 3SR, UJF/G-INP/CNRS, Grenoble, France*

RÉSUMÉ – Cet article est une contribution à l'élaboration de règles constructives au renforcement des sols compressibles par inclusions rigides via une étude par éléments discrets. Les mécanismes de transferts de charges agissant dans le matelas granulaire sont présentés et étudiés. La méthode de Carlsson est revisitée pour prédire les transferts de charges en fonction de la compressibilité du sol.

ABSTRACT – This article is a contribution to new constructive rules for geotechnical earth structures made of soft soils reinforced by rigid inclusions. Being dealt with the discrete element method, we studied the load transfer in the granular layer that overcomes inclusions and thus we revisited the Carlsson's method to predict the load transfer by taking better account of the compressibility of the reinforced soil.

1. Introduction

L'amélioration des sols par inclusions rigides est une technique employée dans de nombreux pays pour limiter le tassement de surface dans les zones fortement compressibles. Cette technique met en œuvre un réseau de pieux en béton armé (considérés comme rigides en raison de leur déformabilité faible comparativement à celle du sol compressible) surmonté d'un matelas granulaire de transferts de charges. L'expansion de cette technique se heurte au fait que la majorité des méthodes de prédiction analytiques existantes sont incapables de tenir compte des comportements complexes de ces structures (Briançon, 2002; Briançon et al., 2004). Certaines de ces méthodes font des hypothèses très simplificatrices concernant les mécanismes de transferts de charges se produisant dans la couche granulaire, d'autres ignorent tout simplement l'interaction avec le sol mou sous-jacent. Pour pallier ces manquements, des études expérimentales et numériques ont été engagées dans le cadre du projet national A.S.I.Ri (Amélioration des Sols par Inclusions Rigides). Dans ce cadre, nous avons mis en œuvre une modélisation par éléments discrets (Le Hello et Villard, 2009) afin d'étudier les mécanismes de transferts de charges agissant dans le matelas granulaire (Chevalier et al. 2010).

2. Description du modèle numérique

2.1. Méthode aux éléments discrets

L'analyse numérique des mécanismes de transferts de charges dans le matelas granulaire est réalisée en trois dimensions par la Méthode aux Éléments Discrets (MÉD). Le modèle numérique (Villard et al., 2009) est basé sur l'approche dite

« dynamique moléculaire ». Dans ce modèle, les particules, interagissent les unes par rapport aux autres via deux lois de contact élastique et élasto-plastique (incrémentale, Cundall et Strack, 1979), respectivement pour les forces normales f_n et tangentielles f_t . La force de contact tangentielle est limitée par un frottement de Coulomb μ , $f_t / f_n \leq \mu$. Les paramètres micro mécaniques du contact (rigidités normale $K_n=1.06 \cdot 10^9$ N/m² et tangentielle $K_t/K_n=0.75$ et coefficient de frottement $\mu=0.577$) ont été déterminés de telle sorte que les caractéristiques mécaniques (module d'élasticité et angle de frottement) d'un échantillon représentatif de 8000 particules sous sollicitation triaxiale soient semblables aux caractéristiques des matériaux granulaires présents dans l'étude expérimentale du projet national A.S.I.Ri (Briançon, 2007) : le module d'Young tangent initial de l'échantillon numérique est d'environ 250MPa, l'angle de frottement au pic de $\varphi_p \approx 45^\circ$ et l'angle de frottement résiduel de $\varphi_r \approx 30^\circ$.

2.2. Géométrie et mise en place du modèle numérique

Un réseau carré de pieux a été considéré dans notre étude. En raison de conditions de symétrie, seule une cellule élémentaire de 2.50 x 2.50 m² a été modélisée (fig.1). Les pieux ont une section carrée de 375 x 375 mm². Un angle de frottement de 30° a été pris en compte entre les têtes de pieux et les particules granulaires. Deux hauteurs h_m de la couche granulaire ont été testées : 0,5 m (16000 particules pour la couche granulaire) ou 1,0 m (32000 particules pour la couche granulaire). Les particules considérées sont constituées de deux sphères insécables de même diamètre d , partiellement imbriquées et espacées d'une distance 0,95d. Les conditions aux limites verticales pour la couche granulaire sont des parois verticales sans frottement. L'action du sol compressible sur la couche granulaire a été prise en compte par des ressorts verticaux de raideur K_c (exprimée en MPa/m) permettant le calcul de la contrainte appliquée sur le matelas granulaire en fonction du tassement du sol support (modèle linéaire de Winkler): différentes valeurs de K_c ont été prises en considération pour déterminer l'influence de la compressibilité du sol.

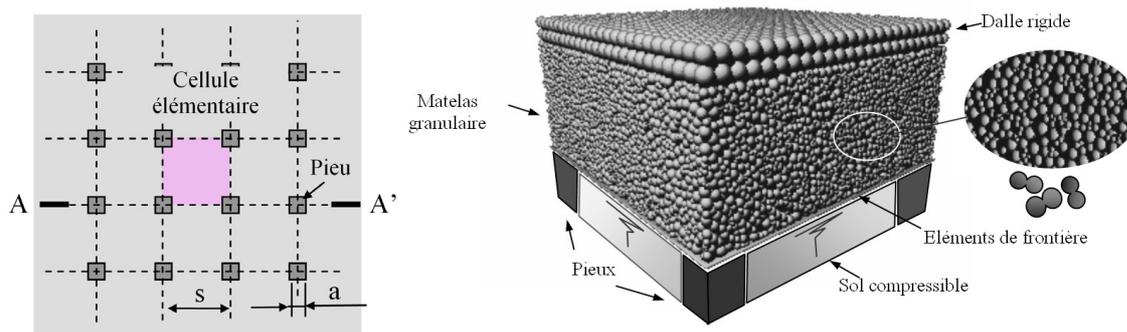


Figure 1 . Vue en plan d'un réseau d'inclusions (à gauche). Exemple d'un matelas granulaire de transferts de charges modélisé par la MÉD (à droite).

Dans un premier temps, la couche granulaire a été générée en l'absence de frottement inter-granulaire et en l'absence de gravité. Ensuite, la gravité est exercée sur chaque particule du matelas. Les ressorts modélisant le sol compressible sont libres de se comprimer (phase 0) puis une surcharge uniforme q est appliquée au sommet de la couche granulaire. Cette surcharge est graduellement augmentée en 4 étapes (phase 1 à 4 : 12,8 kPa, 25,5 kPa, 46,8 kPa et 68 kPa). La surcharge est

exercée sur le matelas granulaire avec ou sans dallage rigide intermédiaire. La contrainte totale q_t résultant du poids propre du matelas et de la surcharge appliquée q peut s'écrire :

$$q_t = \gamma h_m + q \tag{1}$$

3. Mécanismes de transferts de charges observés numériquement

3.1. Application aux renforcements sous remblais

3.1.1. Intensité des transferts de charges en fonction de la surcharge q appliquée

Les mécanismes de transferts de charges nécessitent un réarrangement des particules et des déplacements dans le matelas granulaire et sont donc intrinsèquement liés au tassement du sol compressible. Les transferts de charges sont quantifiés usuellement via un taux de report d'effort SRR, défini comme le rapport de la charge F_p agissant sur le pieu et la charge verticale totale appliquée sur la maille élémentaire $W+Q$, où W est le poids propre du matelas et Q la force équivalent à la surcharge appliquée.

$$SRR = \frac{F_p}{W + Q} \tag{2}$$

En l'absence de transferts de charges, le taux de report d'effort est équivalent, en pourcentage, à la zone couverte par les pieux, à savoir 2,19% de la surface totale de la maille élémentaire étudiée. La capacité G du matelas granulaire à reporter les éventuelles surcharges vers les pieux est définie par :

$$G = \frac{\Delta F_p}{\Delta Q} \tag{3}$$

où ΔF_p est la charge redirigée vers les inclusions suite à l'application de la surcharge ΔQ .

Les résultats numériques obtenus pour SRR et G sont présentés sur la figure 2 pour les deux hauteurs de matelas granulaire étudiées et pour une compressibilité K_c du sol de 0,75MPa/m. Cette valeur est directement corrélée au rapport entre le module œdométrique et l'épaisseur de sol compressible considérée.

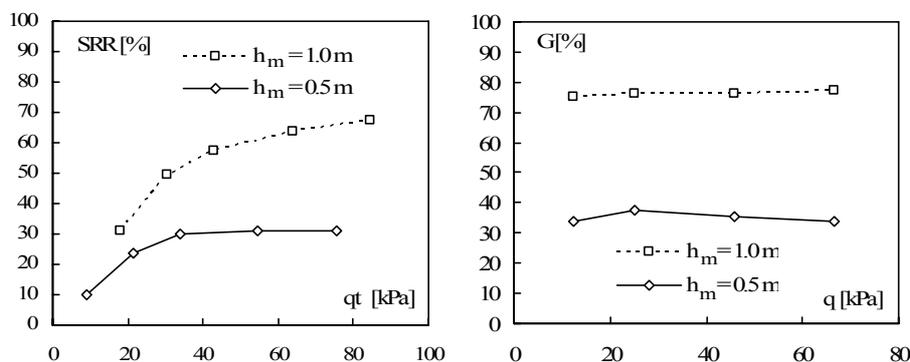


Figure 2 . SRR fonction de la charge totale appliquée pour deux hauteurs h_m de matelas granulaire (à gauche). G fonction de la surcharge appliquée (à droite).

On constate sur cette figure que SRR augmente avec la charge totale q_t pour atteindre un palier qui dépend de la hauteur de la couche granulaire, paliers bien

supérieurs au taux de recouvrement des pieux (2,19%). Parallèlement, on observe que la capacité G du matelas granulaire à reporter les efforts vers les pieux est à peu près constante pour une hauteur de matelas granulaire donnée (environ 75% et 35 % respectivement pour des hauteurs de remblai de 1,0 m et 0,5 m).

Afin de visualiser les mécanismes de transferts de charges, il est intéressant de représenter les déplacements des particules dans une section droite de pieu à pieu (ligne A-A' sur la figure 1).

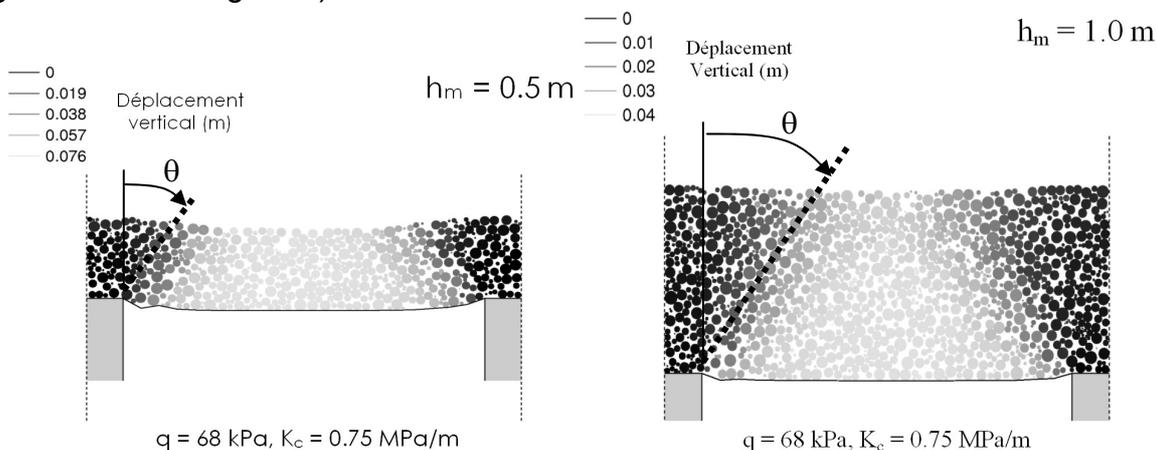


Figure 3 . Déplacements des particules du matelas granulaire dans la section A-A'.

Le gradient de déplacement observé (fig.3) met en évidence deux zones : au dessus des pieux où les déplacements sont très faibles et au dessus du sol compressible, où les déplacements sont comparables au tassement mesuré en surface. La transition entre ces deux zones est identifiée par la ligne oblique (fig.3). Ce faciès de déplacement est en concordance avec les propositions de Carlsson (Carlsson, 1987) pour qui la zone située au dessus des pieux est une zone de faible déplacement formant une pyramide inversée (fig.4). L'auteur préconise cependant $\theta=15^\circ$ quelles que soient les propriétés mécaniques à la rupture de la couche granulaire étudiée.

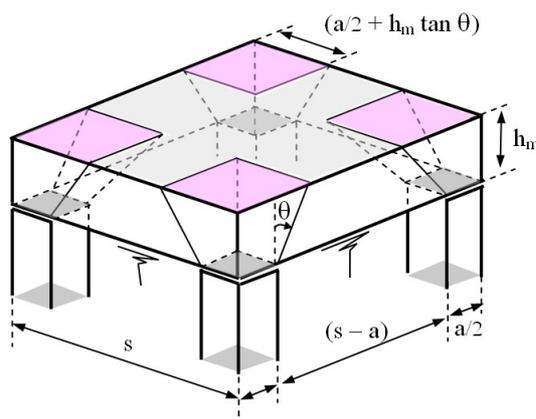


Figure 4 . Zones de transferts de charges selon Carlsson (Carlsson, 1987).

Sur la base de ces observations d'ordre cinématique, une formulation analytique du taux de report d'effort SRR peut être proposée. Le poids W_p de la couche granulaire transmis aux pieux par les zones de diffusion s'écrit :

$$W_p = \frac{\gamma}{6 \tan \theta} \left[(a + 2h_m \tan \theta)^3 - a^3 \right] \quad \text{pour } h_m \leq h^* = \frac{s-a}{2 \tan \theta} \quad (4)$$

Lorsque $h_m > h^*$, les zones de transferts localisées au dessus des pieux finissent par s'intersecter en partie supérieure de la couche granulaire. Ainsi, le matériau granulaire situé au dessus d'une hauteur h^* est considéré comme une surcharge.

La part Q_p de la surcharge q redirigée vers les pieux via la zone de transfert (fig.4) s'exerce sur une aire carrée et s'écrit :

$$Q_p = q(a + 2h_m \tan \theta)^2 \text{ pour } h_m \leq h^* = \frac{s - a}{2 \tan \theta} \tag{5}$$

Ainsi, on peut définir un taux de réduction d'effort théorique SRR' :

$$SRR' = \frac{W_p + Q_p}{s^2(\gamma h_m + q)} \tag{6}$$

Dans le cas où la surcharge q est prépondérante au regard du poids de la couche granulaire, le taux de réduction d'effort théorique ne dépend alors que de θ :

$$SRR'_\infty = \frac{(a + 2h_m \tan \theta)^2}{s^2} \tag{7}$$

Une comparaison entre nos résultats numériques et l'approche de Carlsson montre clairement que l'hypothèse d'un angle θ unique et égal à 15° n'est pas soutenable. Au contraire, si l'on considère (fig.5) que cet angle est naturellement corrélé aux propriétés mécaniques à la rupture, à savoir l'angle de frottement interne du matelas granulaire φ_p , les taux de report d'efforts calculés par la méthode des éléments discrets et par la formule analytique (6) donnent des résultats comparables. Afin de mettre en évidence l'influence de θ sur le taux de réduction de contrainte, une variation de 3 degrés autour de φ_p est proposée.

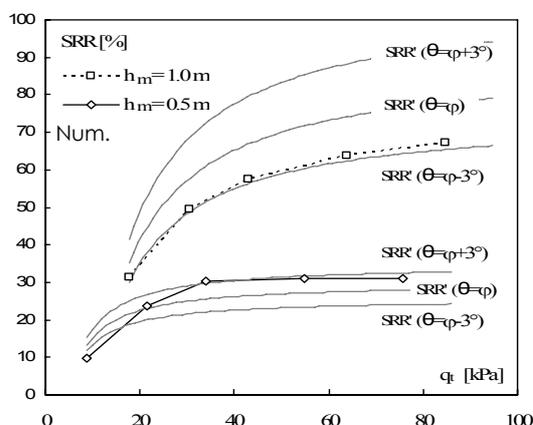


Figure 5 . Comparaison entre le taux de réduction des efforts obtenu par simulation numérique discrète et le taux SRR' calculé analytiquement par la relation (6).

3.1.2. Influence de la compliance du sol compressible

Afin d'estimer l'influence de la rigidité du sol compressible sur les mécanismes de transferts de charges, nous avons fait varier K_c de 0,25 MPa/m à 1,00 MPa/m. Nous concentrons ici nos observations sur G qui représente la capacité du matelas granulaire à reporter la surcharge q vers les pieux. Il est ici intéressant de noter (fig.6) que la variation de G en fonction du déplacement maximal de la couche granulaire δ est indépendante de la rigidité du sol utilisé (ou du modèle de sol). L'influence de K_c sur la variation de G en fonction de la surcharge q résulte principalement des forts tassements que l'on obtient lorsque la compressibilité du sol support devient très grande.

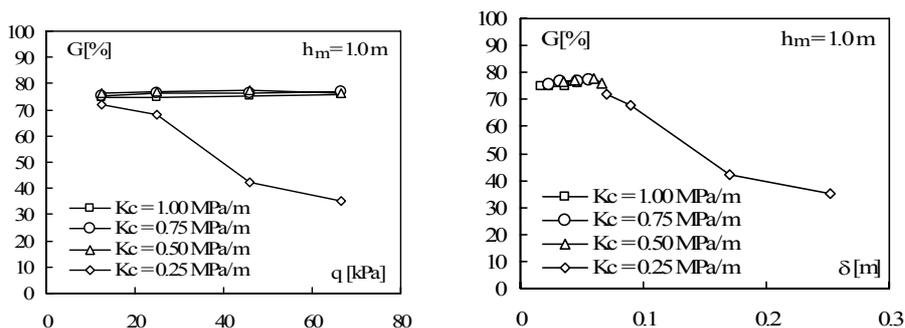


Figure 6 . Influence de la compressibilité du sol support sur les reports de charge G , en fonction de la surcharge (à gauche), en fonction du déplacement maximal de la couche granulaire (à droite).

3.2. Application aux renforcements sous un dallage rigide

On s'intéresse ici au cas où la surcharge exercée sur le matelas est transmise à la couche granulaire par le biais d'un dallage. Dans notre étude, le dallage est grossièrement modélisé par un assemblage de sphères collées (fig.1). Les paramètres micromécaniques numériques utilisés assurent au dallage un comportement identique à une coque. La surcharge q est appliquée au dallage.

Dans ce cas, les taux de réduction de transferts de charges SRR et la capacité du matelas granulaire à transmettre la surcharge aux pieux sont présentés sur les figures 7 et 8.

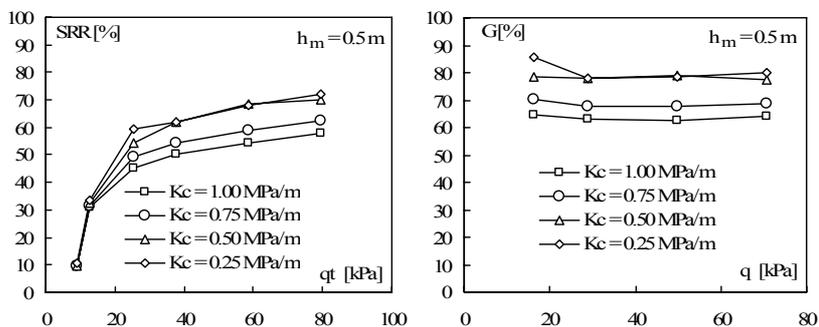


Figure 7 . Taux de réduction des efforts (à gauche) et capacité du matelas granulaire à transmettre la surcharge aux pieux (à droite).

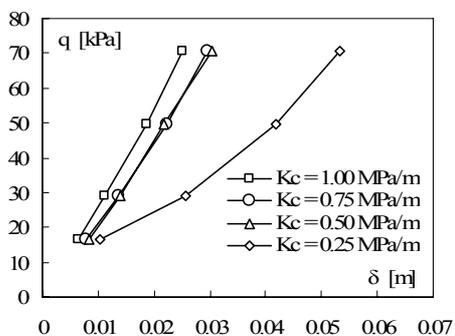


Figure 8 . Influence de la compressibilité K_c du sol support sur les tassements du dallage en fonction de la surcharge q .

Ces résultats montrent clairement que lorsque la surcharge est exercée sur le matelas granulaire par le biais d'un dallage, le taux de réduction des efforts SRR et la capacité G à retransmettre les efforts sont plus importants que dans le cas précédent où la surcharge est transmise via un remblai :

- SRR = 32% et G = 38 % avec un chargement par un remblai,
- SRR = 72% et G = 80 % avec un chargement via un dallage.

Pour le cas sous dallage, lorsque la compressibilité du sol support augmente, le mécanisme de transferts de charges est plus efficace (à l'inverse du cas d'un remblai où la surcharge peut être qualifiée de souple). Une analyse cinématique comparative le long de la coupe A-A' entre le cas avec remblai et le cas avec dallage est présentée sur la figure 9. Lorsque qu'un dallage est utilisé, on identifie clairement des colonnes granulaires situées au dessus des pieux dans lesquelles les grains se déplacent très peu. Dans ce cas, le tassement du dallage est intimement lié à la déformation de cette colonne de sol et à son taux de sollicitation. L'analyse des tassements du dallage comme illustré sur la figure 8 montre clairement qu'ils deviennent très importants dès que la compliance du sol compressible est trop importante. Ceci peut simplement s'expliquer par une analyse des contraintes verticale σ_1 et horizontale σ_3 au sein des colonnes granulaires situées sur les têtes des pieux.

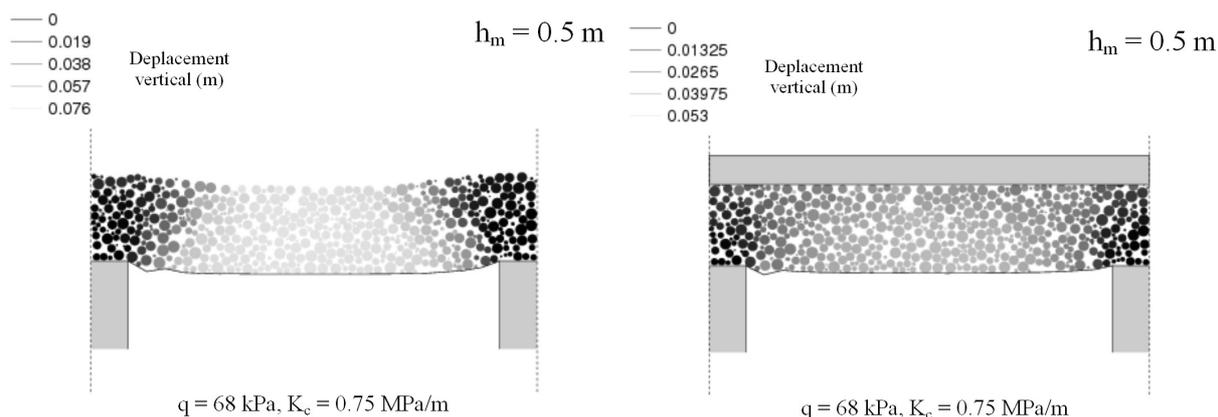


Figure 9 . Déplacement vertical du matelas granulaire dans le cas d'une surcharge transmise par un remblai (à gauche), via un dallage rigide (à droite).

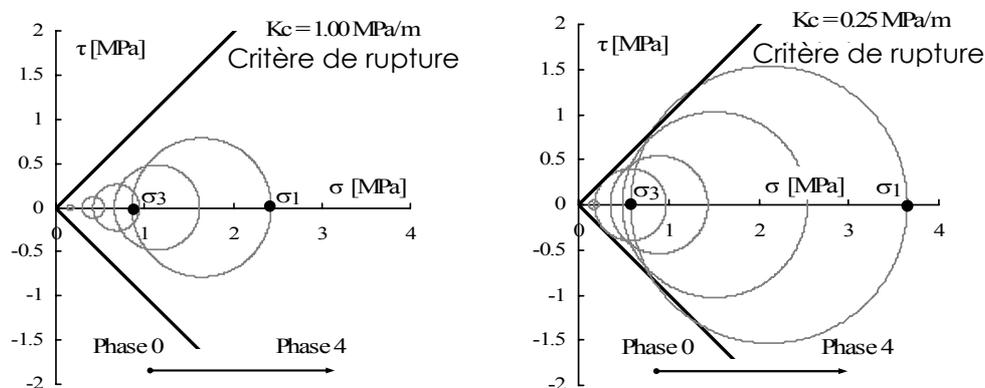


Figure 10 . Influence de la compliance du sol compressible K_c sur l'état de contrainte de la colonne de sol granulaire situé à la verticale des têtes des pieux.

À partir des contraintes principales définies dans le plan de Mohr, on montre sur la figure 10 que lorsque le sol est très compressible, les colonnes granulaires situées sur les têtes des pieux sont mécaniquement à la rupture, principalement dû au fait que le fort tassement du sol compressible conduit à des contraintes de confinement latérale σ_3 trop faibles. Ceci n'est plus le cas lorsque le tassement du sol compressible est faible.

4. Conclusions

Une approche par éléments discrets a été utilisée pour modéliser les transferts de charges dans les matelas granulaires mis en œuvre dans les cas de renforcement des sols compressibles par inclusions rigides.

Lorsque la surcharge est transmise via un remblai, la capacité du matelas granulaire à rediriger la surcharge vers les pieux dépend essentiellement de la hauteur et des propriétés mécaniques à la rupture de ce dernier. La description cinématique des phénomènes est dans l'ensemble en bon accord avec les observations de Carlsson avec quelques différences qui ont permis de proposer un modèle analytique de prédiction des reports de charge qui tient désormais compte des propriétés mécaniques à la rupture du matériau granulaire. Ce nouveau modèle atteint ses limites pour les sols très compressibles où les reports de charges vers les pieux diminuent.

Dans le cas où la surcharge est transmise au matelas granulaire par le biais d'un dallage rigide, on constate, contrairement au cas précédent, que les transferts de charges vers les pieux augmentent avec la compressibilité du sol. Par ailleurs, on a observé que les tassements verticaux du dallage sont liés à la compressibilité de la colonne de sol située à la verticale de la tête des pieux. Néanmoins, un lien direct entre la compliance du sol compressible et le tassement a pu être mis en évidence par une interprétation simple basée sur la mécanique à la rupture.

5. Références bibliographiques

- Briançon L. (2002) Renforcement des sols par inclusions rigides, Etat de l'Art en France et à l'étranger. *IREX, Paris*.
- Briançon L., Kastner R., Simon B., Dias D. (2004) Etat des connaissances - Amélioration des sols par inclusions rigides. Proceedings International Symposium on Ground Improvement (ASEP-GI 2004), Paris, France, 15-43.
- Briançon L. (2007) A.S.I.R.I. - Tranche 1 - Thème 1: Rapport Final. Rapport technique 1-07-1-02. Conservatoire National des Arts et Métiers, Paris, France.
- Carlsson B. (1987) Armerad jord beräkningsprinciper för vertikala väggar, branta slänter, bankar på lös undergrund, bankar på pälår. Terrateam AB.
- Chevalier B., Villard P., Combe G. (2010) Investigation of load transfer mechanisms in geotechnical earth structures reinforced.. ASCE, Journal of Geotechnical Engineering, accepted,.
- Cundall P.A., Strack O.D.L. (1979) A discrete numerical model for granular assemblies. *Geotechnique*, 29(1), 47-65.
- Le Hello B., Villard P. (2009) Embankments reinforced by piles and geosynthetics – Numerical and experimental studies dealing with the transfer of load on the soil embankment.. *Engineering Geology*, 106 (1-2) pp. 78-91.
- Villard P., Chevalier B., Le Hello B., Combe G. (2009) Coupling between finite and discrete element methods for the modelling of earth structures reinforced by geosynthetic. *Computers and Geotechnics*, 36(5), 709-717.