# PROJET NATIONAL A.S.I.Ri.

## Tranche 4

Etude des mécanismes de report de charge dans les matelas granulaires des remblais sur sol compressible renforcé par inclusions rigides.

**Laboratoire 3S-R (Sols, Solides, Structures - Risques) de Grenoble**

B. CHEVALIER, G. COMBE, R. FANTINO, S. GRANGE & P. VILLARD.

Juillet 2010

## 1. Rappel de la proposition scientifique effectuée

Objectif : Etude des mécanismes de report de charge dans les matelas granulaires des remblais sur sol compressible renforcé par inclusions rigides.

Modélisations proposées : Modélisation tridimensionnelle par éléments discrets.

Contexte : Les phénomènes de voûte et de report de charge résultent d'une réorientation progressive des efforts verticaux appliqués au matelas granulaire vers les pieux suite à un mécanisme de contact grain/grain. Une modélisation discrète qui permet de discrétiser le milieu à étudier par un ensemble de particules qui interagissent entre elles au niveau de leurs points de contacts semble par conséquent bien adaptée (Fig.1). Le code de calcul proposé est un code de calcul tridimensionnel par éléments discrets développé localement sur Grenoble et basé sur l'approche dite « dynamique moléculaire ».

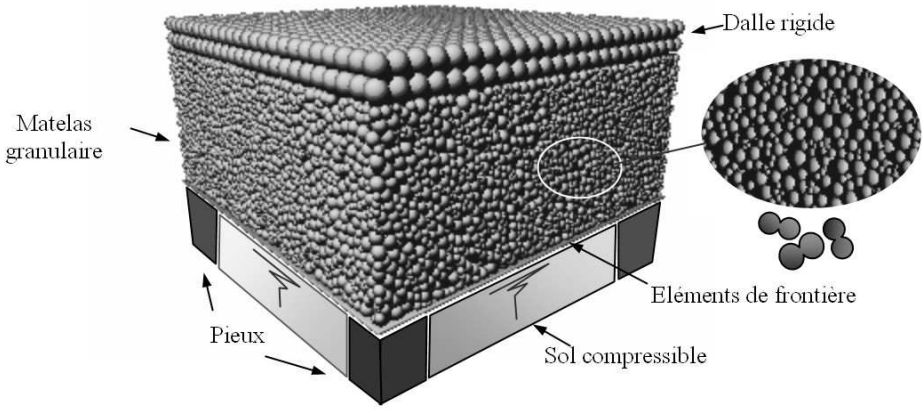



Fig.1 : Modèle numérique utilisé

Modélisations proposées : Les modélisations proposées ont pour objectif l'étude des mécanismes de report de charge dans le matelas granulaire. Ce dernier sera modélisé par un ensemble de particules interagissant entre elles au niveau de leurs points de contact. Les lois de contact définies entre les particules permettent de décrire le comportement des matériaux granulaires purement frottants. Le sol compressible sera pris en considération par l'intermédiaire d'une réaction d'appui verticale proportionnelle au tassement.

Les résultats attendus : Les résultats attendus sont : la répartition des charges sur les pieux et sur le sol compressible, les tassements et les mécanismes de report de charges dans le matelas granulaire.

## 2. Travaux réalisés dans le cadre de la tranche 4

Les travaux numériques réalisés dans le cadre des tranches précédentes ont permis de mettre en évidence certains mécanismes de transmission des efforts dans le matelas de transfert de charge dans les cas sous remblai et sous dallage. Des zones d'influence par lesquelles transitent les efforts vers les pieux ont ainsi été proposées. Pour une meilleure définition de ces zones d'influence et pour une meilleure compréhension des mécanismes de transfert de charge, des simulations numériques complémentaires ont été menées. Celles-ci ont été réalisées en partie dans le cadre du Master Pro de Raphael Fantino (Juin 2010) qui s'est

attaché à mettre en œuvre des procédures nouvelles de post traitement. Les simulations, menées dans des conditions similaires à celles de Bastien Chevalier pendant sa thèse (géométries et paramètres A.S.I.Ri), ont consisté à positionner des charges localisées dans ou en dehors des zones d'influence pour en vérifier la pertinence. Des simulations complémentaires ont été également menées pour déterminer l'influence de la cinématique de mise en charge de la couche granulaire sur les mécanismes de transfert de charge (chargement progressif du matelas de transfert de charge pour simuler la mise en place d'un remblai ou tassement progressif du sol support sous chargement constant pour simuler des tassements différés du sol compressible). Ces travaux sont intégrés et présentés ci-dessous dans une synthèse globale des principaux résultats obtenus dans le cadre du projet national A.S.I.Ri.
Pour plus de précisions, se reporter au rapport de la tranche 3 (Projet National A.S.I.Ri, Tranche 3, « Etude des mécanismes de report de charge dans les matelas granulaires des remblais sur sol compressible renforcés par inclusions rigides », Laboratoire Sols, Solides, Structures – Risques de Grenoble).

## 3. Synthèse des travaux menés dans le cadre du projet national A.S.I.Ri.

### 3.1 Rappel de la configuration de base

On considère ici un réseau carré d'inclusions rigides caractérisé par un entraxe entre inclusions de s = 2.50 m. Les inclusions sont de section carrée de côté a = 0.375 m. Le taux de recouvrement des inclusions est donc $\alpha$ = 2.22 % (valeur identique à celles de la première tranche des essais expérimentaux en vraie grandeur et des essais expérimentaux sur modèle réduit). En raison de conditions de symétrie, seule une cellule élémentaire de 2.50 x 2.50 m² a été modélisée (Fig.2). 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 dont les centres sont espacés d'une distance 0,95d. La granulométrie considérée est telle que le rapport $d_{max}$ / $d_{min}$ = 4. Au sein de cet intervalle, la distribution des diamètres des particules est équiprobable. 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.

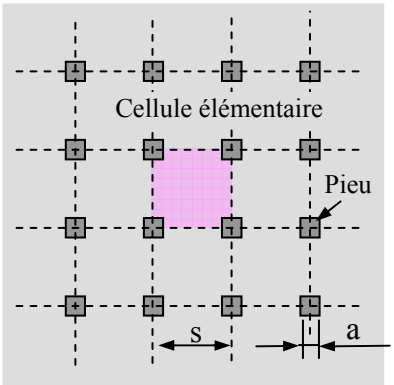



Fig. 2. Géométrie de base.

Les paramètres micro mécaniques des contacts du matelas granulaire (rigidités normale $K_n$=1.06 $10^9$ N/m² et tangentielle $K_t$=0.75 $K_n$ 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 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 $\varphi_p \approx 45°$ et l'angle de frottement résiduel de $\varphi_r \approx 30°$. La cohésion n'a pas été considérée dans cette étude. Le dallage est modélisé par un assemblage de deux lits de sphères collées comme présenté sur la figure 1. Un chargement uniformément réparti est appliqué sur l'ouvrage par paliers successifs. Dans le cas où un dallage est considéré, la surcharge est appliquée par augmentation de la masse des sphères le constituant. Dans le cas sans dallage, un ensemble de sphères sans liaisons entre elles vient appliquer la surcharge sur le matelas granulaire. Un état d'équilibre est alors recherché après chaque palier de chargement et avant l'application du palier suivant. Les paramètres étudiés sont : la répartition des charges sur les pieux et sur le sol compressible, les tassements et les mécanismes de report de charges dans le matelas granulaire. Ces derniers peuvent être quantifiés par un taux de report d'effort E (Eq. 1) (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) et la capacité G du matelas granulaire à reporter les éventuelles surcharges vers les pieux (Eq 2) (définie comme le rapport entre l'incrément de charge appliqué $\Delta F_P$ sur les pieux par rapport à l'incrément de surcharge appliqué $\Delta Q$).

$$E = \frac{F_p}{W + Q} \tag{1}$$

$$G = \frac{\Delta F_p}{\Delta Q} \tag{2}$$

### 3.2 <u>Influence de la cinématique sur les mécanismes de transfert de charge</u>

Les études paramétriques effectuées antérieurement pour plusieurs hauteurs de remblais et plusieurs rigidités du sol support dans le cadre de la tranche 3 du programme national A.S.I.Ri ont conduit à proposer des mécanismes de transfert de charge tels que ceux de la figure 3. La cinématique présentée sur cette figure est comparable à la description des mécanismes de transfert de charge que proposent Carlsson et Svanø. À partir de l'angle $\theta$ que fait la frontière entre les deux zones du matelas avec la direction verticale, on peut évaluer le report de charge vers les inclusions en considérant que la zone mobile transmet directement au sol support son propre poids et la charge qu'elle reçoit. La description du cône de diffusion proposée constitue une hypothèse forte, notamment par rapport à la forme du cône retenue qui est très simplifiée. Une comparaison entre nos résultats numériques et l'approche de Carlsson montre clairement que l'hypothèse d'un angle $\theta$ égal à 15° proposé par Carlsson n'est pas soutenable et qu'une valeur de $\theta$ corrélée aux propriétés mécaniques du matériau semble plus réaliste.

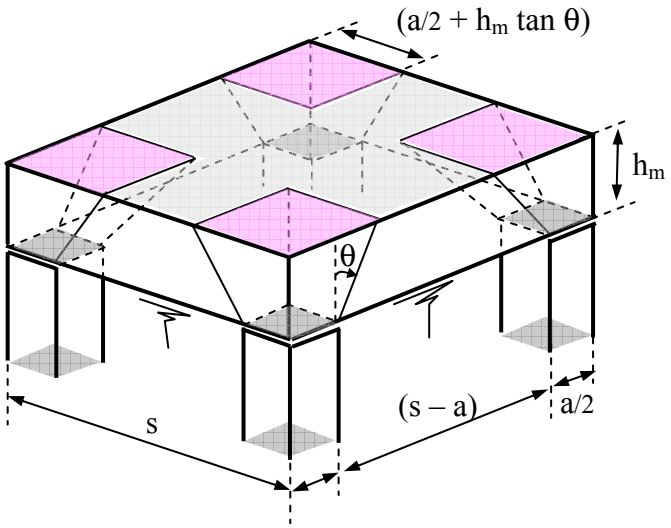



Fig. 3. Mécanisme de transfert de charge initialement proposé. Les cônes placés à la verticale de chaque pieu correspondent à des zones de faibles déplacements du matelas.

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

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

Ceci reste vrai tant que l'épaisseur de la couche granulaire est faible au regard de la distance entre les pieux. Au delà d'une certaine épaisseur les zones de transferts localisées au dessus des pieux finissent par se chevaucher en partie supérieure de la couche granulaire.

La part $Q_p$ de la surcharge q redirigée vers les pieux via la zone de transfert (fig.3) s'exerce sur une aire carrée et s'écrit :

$$Q_p = q(a + 2h_m \tan\theta)^2 \quad \text{pour } h_m \le h^* = \frac{s-a}{2\tan\theta} \tag{4}$$

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

$$E' = \frac{F_p}{W+Q} = \frac{W_p + Q_p}{s^2(\gamma h_m + q)} \tag{5}$$

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 et correspond au coefficient G' :

$$E'_\infty = G' = \frac{(a + 2h_m \tan\theta)^2}{s^2} \tag{6}$$

Pour valider les mécanismes proposés de nouvelles simulations numériques ont été réalisées et analysées pour deux hauteurs de remblais ($h_m$ = 0.5 m et $h_m$ = 1m). On a ainsi cherché à valider et préciser la forme des zones de diffusion localisées au dessus des pieux, d'une part en établissant des cartographies en déplacements dans différentes sections du matelas granulaire, et d'autre part, en montrant que les zones de diffusions au dessus des pieux sont effectivement des zones par lesquelles transitent majoritairement les forces de contact. On s'est demandé également si une charge localisée située en dehors des zones de diffusion était intégralement redirigée vers le sol support et si à l'inverse des charges localisées dans la zone de diffusion étaient redirigées majoritairement vers les pieux.

Parallèlement des simulations ont été également menées sur des remblais d'épaisseur $h_m$ = 1m pour déterminer l'influence de la cinématique de mise en charge de la couche granulaire sur les mécanismes de transfert de charge (chargement progressif du matelas de transfert de charge pour simuler la mise en place d'un remblai ou tassement progressif du sol support sous chargement constant pour simuler des tassements différés du sol compressible). Les résultats présentés ci-après montrent que, pour la géométrie testée, le mécanisme de transfert de charge est peu perturbé par les modes de sollicitations proposés. Ceci tente à prouver que les essais réalisés en laboratoire ou en centrifugeuse avec des plateaux mobiles positionnés sous le matelas granulaire conduisent à des mécanismes de transfert de charge voisins de ceux que l'on pourraient avoir lors de la montée en charge d'un remblai.

***Résultats obtenus par déplacement progressif du sol support :***

Les simulations numériques ont été menées à partir de la configuration de base ($h_m$ = 1 m) et en fonction du protocole suivant :

- Application de la gravité aux particules granulaires avec comme condition aux limites des déplacements verticaux nuls à la base du matelas.
- Application d'une surcharge verticale uniforme de 12.5 kN/m² sur la partie supérieure du matelas avec comme condition aux limites des déplacements verticaux nuls à la base du matelas.
- Déplacement progressif de l'horizon compressible sous le matelas par l'intermédiaire d'une plaque horizontale déplacée verticalement à vitesse constante. Plusieurs vitesses ont été testées pour vérifier que dans la gamme de vitesses retenues les effets dynamiques sont minimisés.

Les résultats obtenus sont synthétisés sur les figures suivantes : Efficacité du report de charge en fonction des déplacements ($\delta$) à la base du matelas granulaire (Fig.4), champ de déplacements (Fig.5) et représentation des forces de contact (Fig.6) pour différents niveaux de sollicitation. Les résultats en efficacité de la figure 4 montrent que les transferts de charge au sein du matelas granulaire se développent pour de très faibles déplacements (mécanismes de grain à grain qui permettent une réorientation immédiate des chaînes de force vers les pieux pour de très faibles réarrangements du squelette granulaire). L'efficacité maximale est atteinte très rapidement puis diminue progressivement suite à la désorganisation des particules du matelas granulaire. Cette chute d'efficacité peut être directement corrélée à une modification du comportement macroscopique du matériau qui évolue en fonction de sa compacité (une désorganisation des particules conduit à un état lâche qui permet une moins bonne résistance mécanique au cisaillement du matériau) et en fonction du taux de déformation atteint.

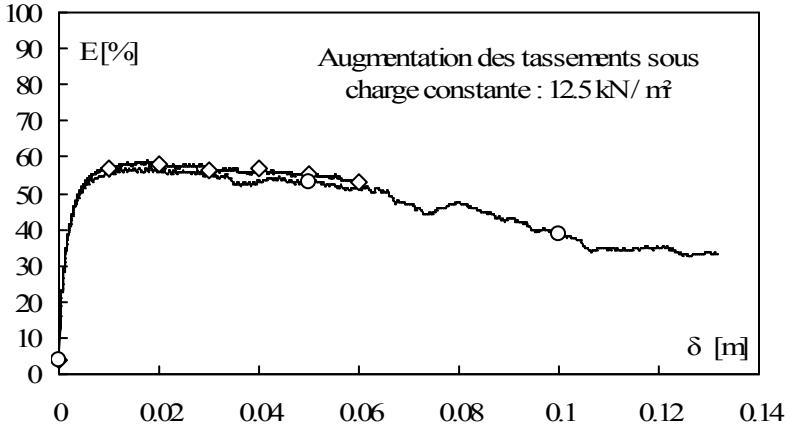



Fig. 4 : Courbe de l'efficacité en fonction du déplacement à la base du matelas granulaire.

Sur la figure 5 sont présentés les champs de déplacement obtenus pour différentes valeurs de δ et ce pour une coupe verticale située entre les pieux. La norme des déplacements de chaque sphère est calculée entre la position initiale (à la phase de mise en place des éléments et avant l'application de la gravité) et la position à chaque pas de chargement. L'intensité du déplacement est représentée par un dégradé de couleur proportionnel au déplacement maximal.

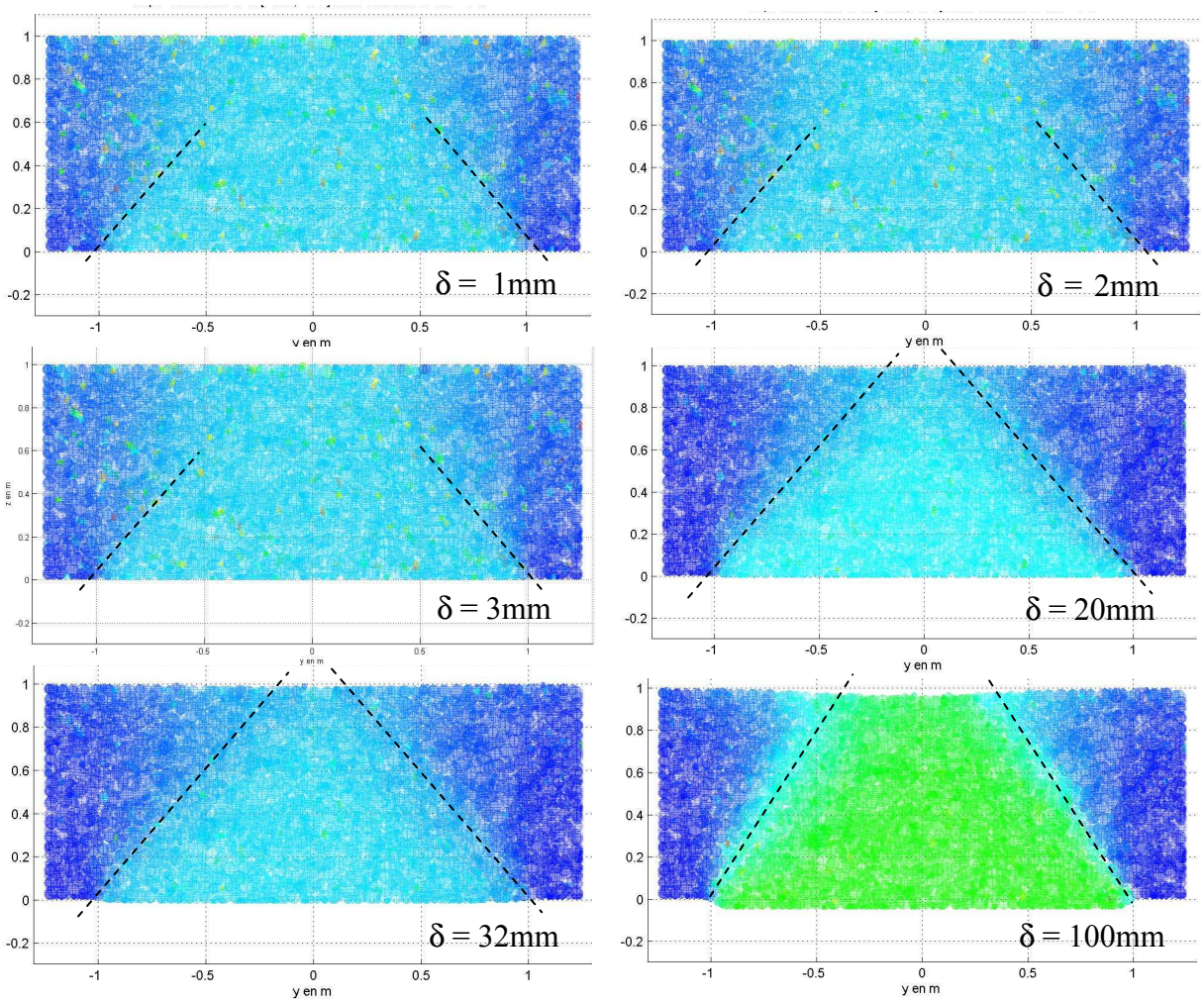



Fig. 5 : Champs de déplacements observés pour différentes valeurs de δ.
(Coupes verticales entre les pieux)

On constate sur la figure 5 qu'il est possible de distinguer, quel que soit le niveau de déplacement atteint, des zones mobiles qui se déplacent entre des zones stables de formes tronconiques. Excepté pour les forts déplacements où l'on constate un redressement des angles de diffusion de la zone tronconique, ses formes sont assez semblables.

Sur la figure 6 sont représentés les réseaux de chaînes de forces dans le matelas granulaire pour différentes valeurs de δ. Les efforts normaux de contact sont représentés par des cylindres reliant les centres des sphères en contact. Ils sont tracés uniquement lorsque leur intensité est supérieure à 10 % de la valeur de l'effort maximal mesuré dans le matelas granulaire. Ce cylindre a un rayon et un dégradé de couleur proportionnel à l'effort normal maximal. On constate sur la figure 6 que les mécanismes de diffusion des efforts se mettent très rapidement en place au dessus des pieux : des zones de diffusions tronconiques similaires à celles mises en évidence par les champs de déplacement sont clairement identifiables pour des déplacements faibles (δ = 1 mm et 2 mm). Pour des valeurs de δ plus importantes il faut intégrer à ces mécanismes les frottements de la zone mobile par rapport à la zone fixe qui, si l'on considère une inclinaison des cônes de diffusion corrélable avec l'angle de frottement du matériau, conduisent à des efforts d'interaction horizontaux. Il en résulte des réseaux de chaînes de forces dont l'analyse est moins immédiate.

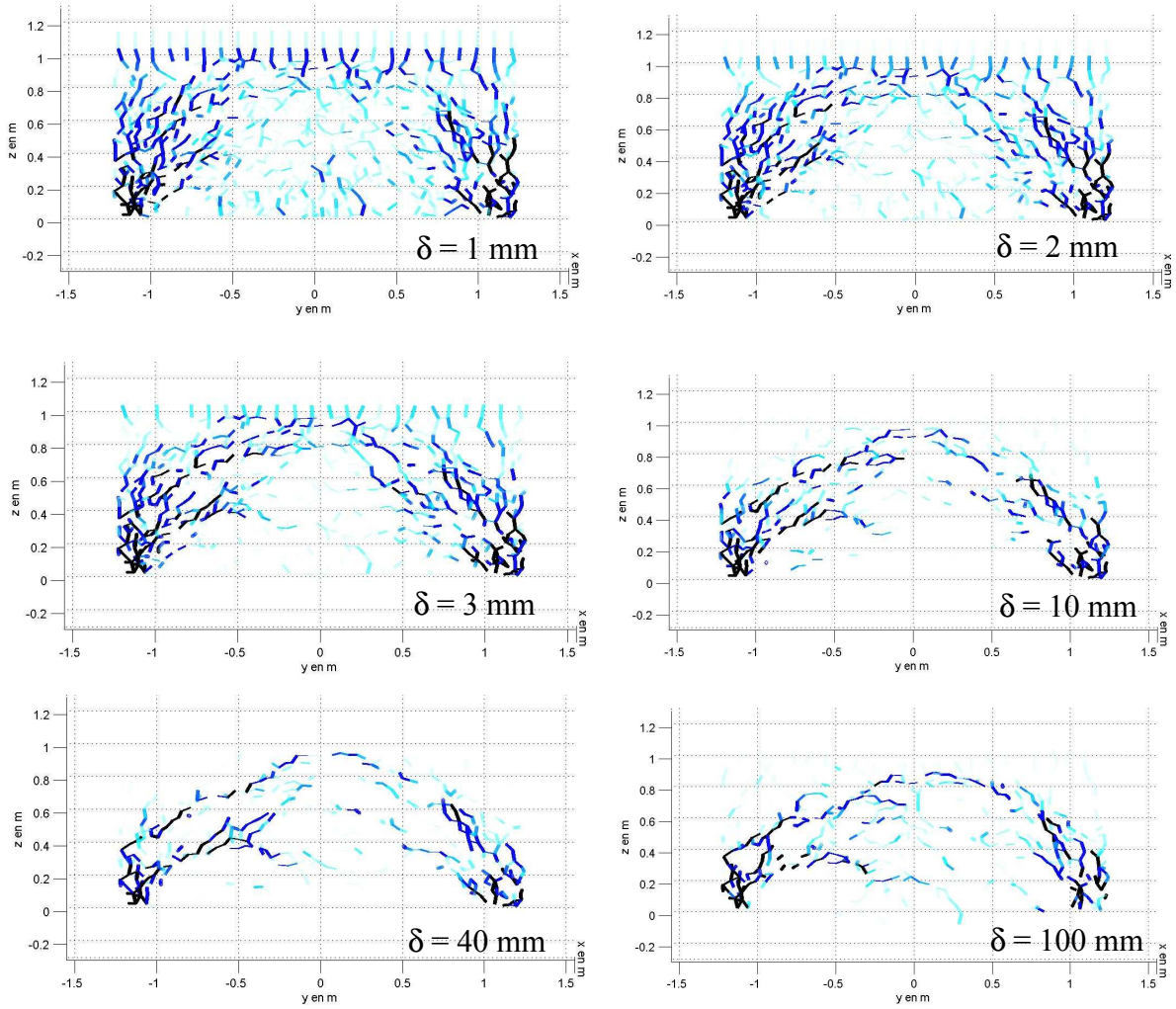



Fig. 6 : Chaînes de forces dans le matelas granulaire pour différentes valeurs de δ.
(Coupes verticales entre les pieux)

***Résultats obtenus par chargement progressif du matelas granulaire :***

A titre de comparaison des simulations numériques complémentaires ont été menées ($h_m$ =1m) pour simuler un chargement progressif du matelas granulaire (surcharge maximale appliquée de 66,7 kN/m²). Le protocole retenu est très légèrement différent de celui utilisé pour les travaux antérieurs (thèse de Bastien Chevalier) qui ont consisté à charger le matelas granulaire par 4 niveaux de surcharges successifs. Les résultats présentés diffèrent par le fait que les accroissements de charge appliqués à chaque incrément de calcul sont suffisamment faibles pour limiter les effets dynamiques. Les calculs ont été menés à partir de la configuration de base et en fonction du protocole suivant :

- Application de la gravité aux particules du matelas granulaire avec comme condition aux limites des déplacements verticaux nuls à la base du matelas.
- Déplacement lent et progressif des particules du matelas granulaire jusqu'à ce que celles-ci reposent sans effet dynamique sur le sol compressible (constitué de ressort)
- Applications de la surcharge par incréments successifs. Plusieurs vitesses de chargement ont été testées pour vérifier que dans la gamme de vitesses retenues les effets dynamiques sont minimisés.

Les résultats obtenus sont synthétisés sur les figures suivantes : Efficacité du report de charge en fonction des déplacements δ obtenus à la base du matelas granulaire pour les incréments de charge considérés (Fig.7), champ de déplacements (Fig.8) et réseaux des forces de contact pour différents niveaux de sollicitation (Fig.9).

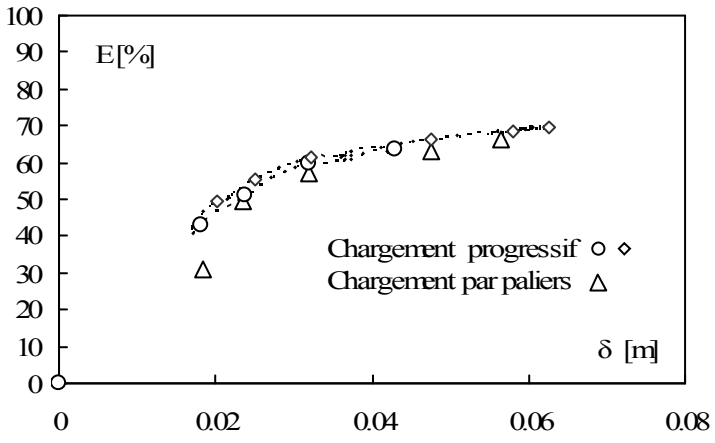



Fig. 7 : Courbe de l'efficacité en fonction du déplacement à la base du matelas granulaire.

On constate sur la figure 7 que les résultats menés avec différentes vitesses de chargement sont peu différents et qu'ils sont proches de ceux obtenus dans les travaux antérieurs par B. Chevalier. On note cependant un effet dynamique lors de la mise en place du matelas granulaire sous gravité. Les champs de déplacements (Fig.8) et les réseaux de chaînes de force (Fig.9) entre particules sont similaires à ceux et à celles obtenues avec la cinématique précédente impliquant des déplacements progressifs du sol support.

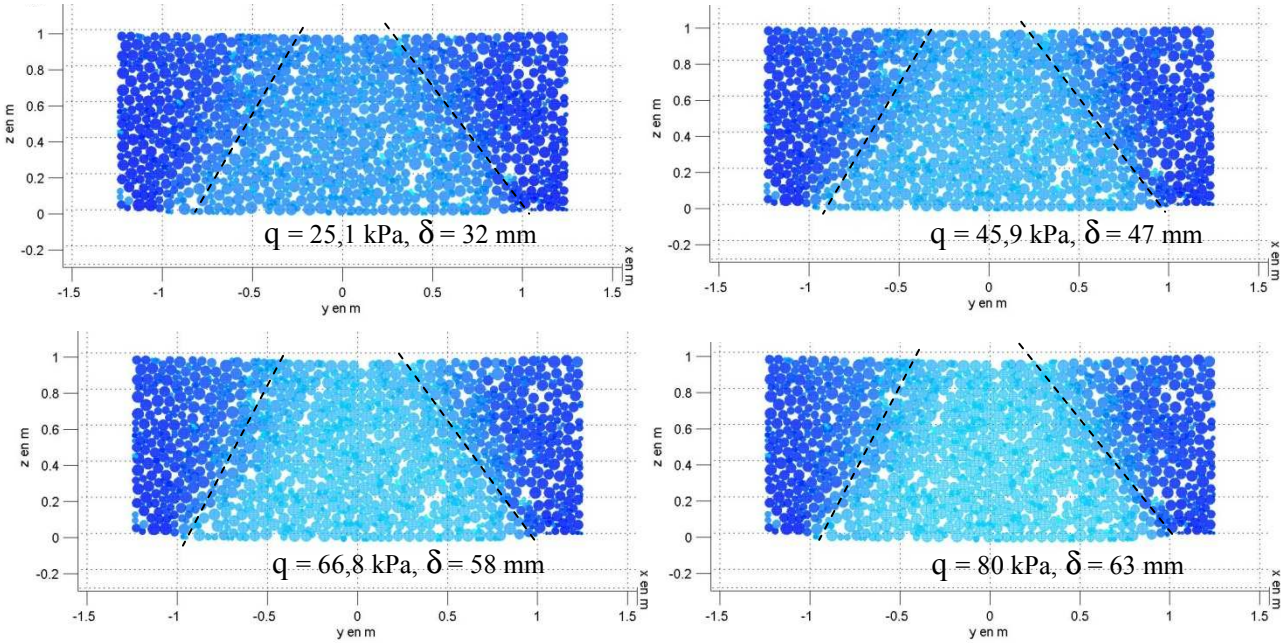



Fig. 8 : Champs de déplacements observés pour différentes valeurs de q.
(Coupes verticales entre les pieux)

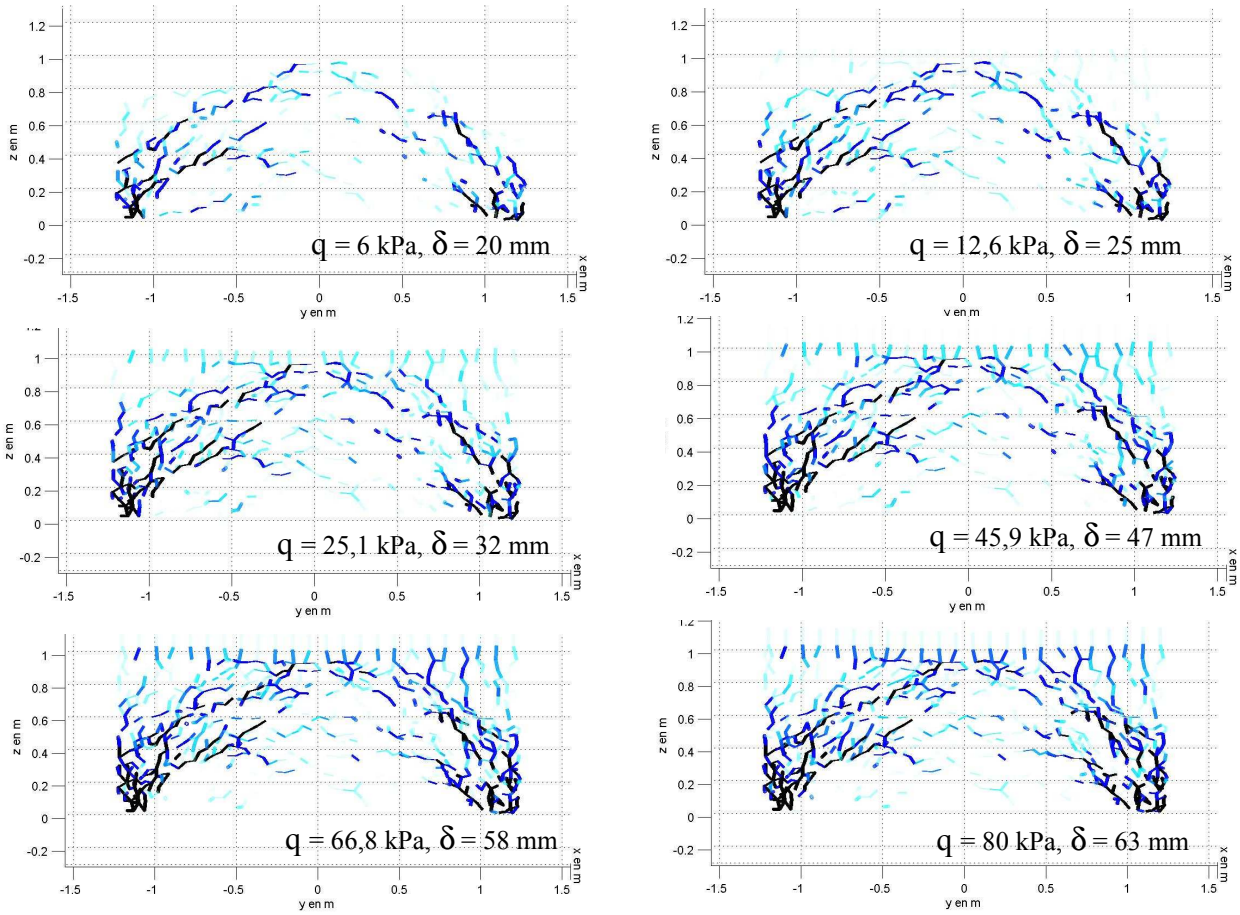



Fig. 9 : Chaînes de forces dans le matelas granulaire pour différentes valeurs de q.
(Coupes verticales entre les pieux)

L'ensemble des résultats obtenus lors des travaux antérieurs (Fig.9) pour deux hauteurs de remblai et une rigidité du sol support de $K_c$ = 0,75MPa/m montre que l'efficacité E 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 (2,22%). 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).

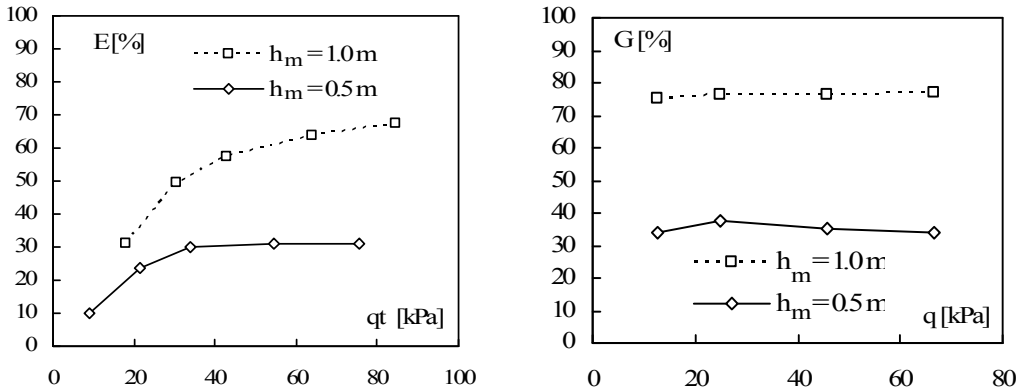



Fig. 10 : Efficacité E fonction de la charge appliquée pour deux hauteurs $h_m$ de matelas granulaire (à gauche). G fonction de la surcharge appliquée (à droite).

Notons également sur la figure 11 que la courbe donnant la capacité G du matelas granulaire à reporter les efforts vers les pieux en fonction du tassement du sol support est peu dépendante de la rigidité du sol compressible (pour des raideurs supérieures ou égales à 0.50Mpa/m). On en conclut que se sont les déformations de la couche granulaire qui pilotent les mécanismes de transfert de charge.

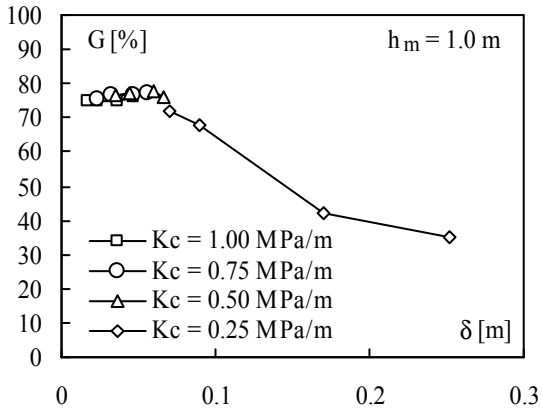



Fig. 11 : Capacité du matelas granulaire à reporter les efforts en fonction du déplacement pour différentes rigidités.

***Comparaison des mécanismes :***

Si l'on compare les deux approches cinématiques précédentes pour une même charge (12.5 kN/m²) et pour un même déplacement (25 mm), on constate (Fig. 12) que les efficacités trouvées sont très proches. Ceci s'explique par des mécanismes très similaires pour les deux cinématiques (que ce soit pour les déplacements ou pour les géométries des réseaux des chaînes d'efforts), par des conditions aux limites identiques (charge appliquée en surface de 12.5 kN/m² et déplacement uniforme à la base du remblai de 25 mm) et par une géométrie particulière (taux de recouvrement et épaisseur de remblai faible). Pour la géométrie testée et

le mode de chargement étudié on peut clairement établir que les procédures de sollicitations étudiées conduisent à des mécanismes assez semblables.

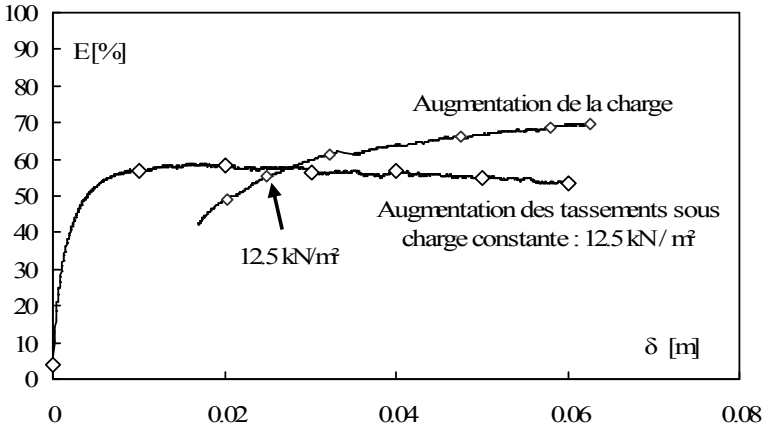



Fig.12 : Comparaison de l'efficacité du matelas granulaire pour les cinématiques étudiées.

### 3.3 Mécanisme de transfert de charge proposé

Afin de mieux visualiser et appréhender les mécanismes de transfert de charge (notamment la forme de la zone de diffusion) des simulations complémentaires et des analyses graphiques ont été menées. La déformation de la couche granulaire a été obtenue par chargement progressif du matelas granulaire jusqu'à une surcharge uniforme q de 66.8 kN/m². Deux hauteurs du matelas granulaire ont été testées ($h_m$ =0.5 m et $h_m$ =1m). Compte tenu que la zone de diffusion peut être définie comme une zone de faibles déplacements par laquelle transitent majoritairement les chaînes de forces (redirection des efforts vers les têtes de pieux) nous nous sommes intéressés aux champs de déplacements et aux réseaux des chaînes de forces dans différentes sections du matelas granulaire (Fig.13 à Fig.15).

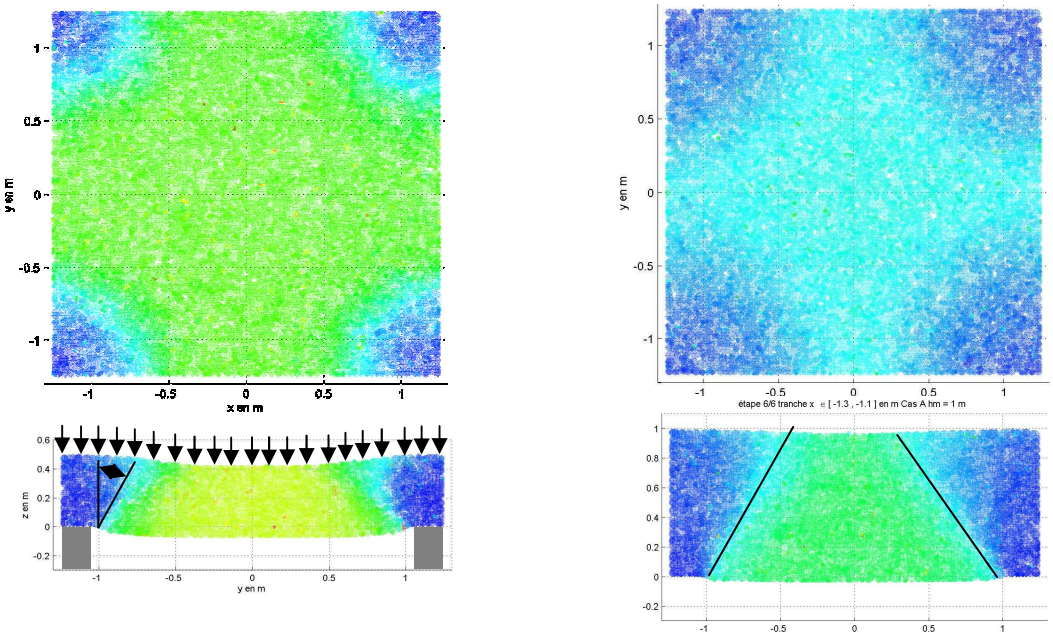
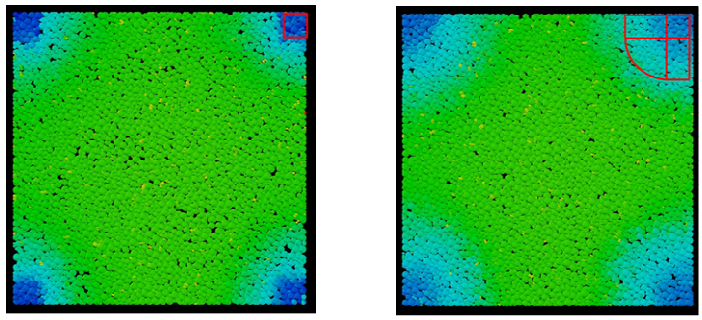
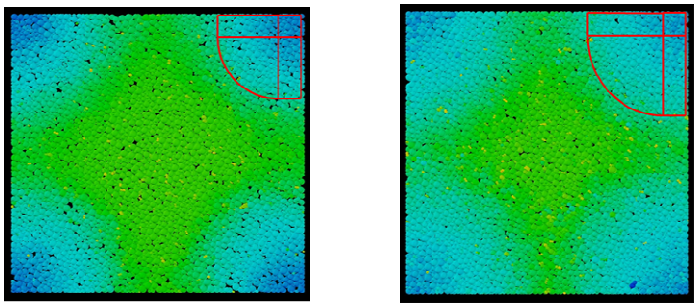



Fig. 13 : Champs de déplacements (vue de dessus et coupe verticale entre les pieux) pour différentes hauteurs de matelas granulaires ($h_m$ =0.5 m à gauche) et ($h_m$ =1m à droite).



a) Altitude : z =0.1 m

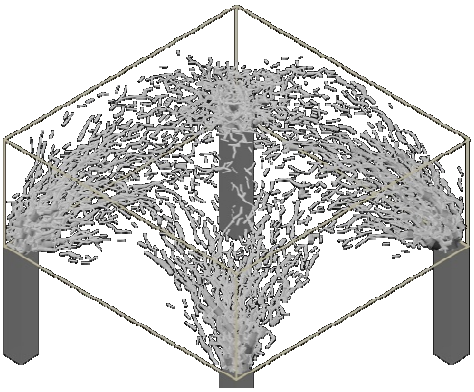
b) Altitude : z =0.35 m



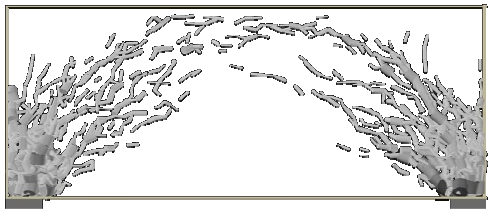
c) Altitude : z =0.6 m

d) Altitude : z =0.85 m

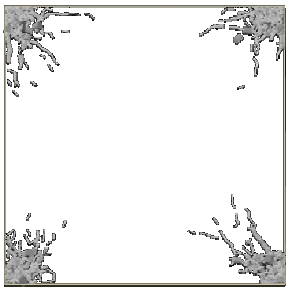
Fig. 14 : Champs de déplacements dans le plan horizontal pour différentes altitudes du matelas granulaire ($h_m$ =1m et q = 66.8 kN/m²).



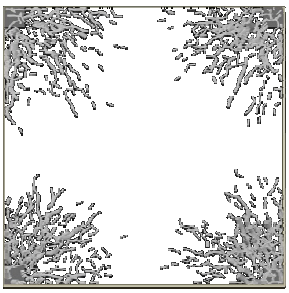
a) Vue 3D



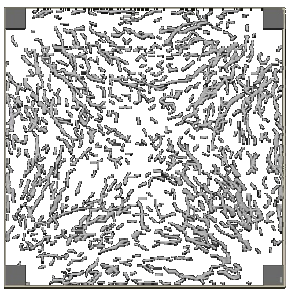
b) Coupe transversale



c) Altitude : z =0.1 m



d) Altitude : z =0.5 m



e) Altitude : z =0.85 m

Fig. 15: Chaînes de forces fortes dans le matelas granulaire ($h_m$ =1m et q = 66.8 kN/m²).

Sur la base des résultats obtenus en déplacements il apparaît opportun de modifier le mécanisme proposé initialement en prenant en considération des arrondis au niveau des zones de diffusion comme précisé sur la figure 16. Dans ces conditions, l'angle θ que fait la zone de diffusion avec la verticale est toujours constant, ce qui n'était pas le cas précédemment. Pour des hauteurs de matelas granulaires plus importantes l'enchevêtrement des zones de diffusion est cependant plus complexe.

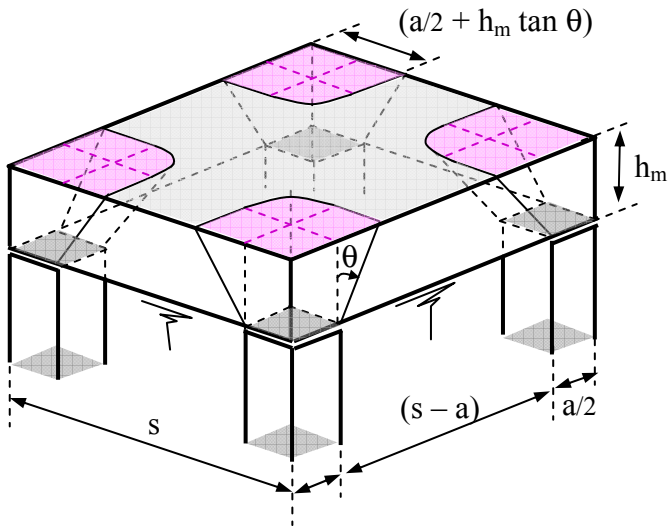



Fig. 16. Mécanisme de transfert de charge proposé.

Comme précédemment il est possible de proposer une formule analytique du taux de report d'effort E. Le poids $W_p$ de la couche granulaire transmis aux pieux par les zones de diffusion s'écrit :

$$W_p = \gamma \left[ a^2 h_m + 2 a h_m^2 \tan\theta + \frac{\pi}{3} h_m^3 \tan^2\theta \right] \quad \text{pour } h_m \le h^* = \frac{s-a}{2\tan\theta} \tag{7}$$

La part $Q_p$ de la surcharge q redirigée vers les pieux via la zone de transfert s'écrit :

$$Q_p = q \left( a^2 + 4 a h_m \tan\theta + \pi h_m^2 \tan^2\theta \right) \quad \text{pour } h_m \le h^* = \frac{s-a}{2\tan\theta} \tag{8}$$

D'où le taux de réduction d'effort théorique E' et la capacité G' du matelas granulaire à reporter les surcharges vers les pieux :

$$E' = \frac{W_p + Q_p}{s^2 (\gamma h_m + q)} \qquad \text{et} \qquad G' = \frac{\left( a^2 + 4 a h_m \tan\theta + \pi h_m^2 \tan^2\theta \right)}{s^2} \tag{9}$$

Pour des pieux de section circulaire (absence de dallette) on obtient :

$$W_p = \frac{\gamma \pi h_m}{3} \left[ (a/2)^2 + (a/2 + h_m \tan\theta)^2 + a\,(a/2 + h_m \tan\theta)/2 \right] \tag{10}$$

$$Q_p = q\pi\left(a/2 + h_m \tan\theta\right)^2 \quad \text{pour } h_m \le h^* = \frac{s-a}{2\tan\theta} \tag{11}$$

$$E' = \frac{W_p + Q_p}{s^2\left(\gamma\, h_m + q\right)} \qquad \text{et} \qquad G' = \frac{\pi\left(a/2 + h_m \tan\theta\right)^2}{s^2} \tag{12}$$

Pour comparer les résultats numériques à ceux des formules analytiques, l'angle $\theta$ a été pris égal à l'angle de frottement au pic du matériau $\varphi_p$ pour évaluer l'efficacité maximale qui peut être mobilisée pour un chargement donné. La figure 17 montre l'évolution de l'efficacité estimée E en fonction du chargement total $q_t = \gamma\, h + q$ et la figure 18 montre l'évolution de la capacité G du matelas granulaire à reporter les charges sur les pieux en fonction de la surcharge appliquée et ce pour les deux épaisseurs de remblais modélisés. Les paramètres de calcul sont : s = 2.5 m, a = 0.375 m, $\gamma$ =17.7 kN/m$^3$ et $\theta = \varphi_p = 44.8°$.

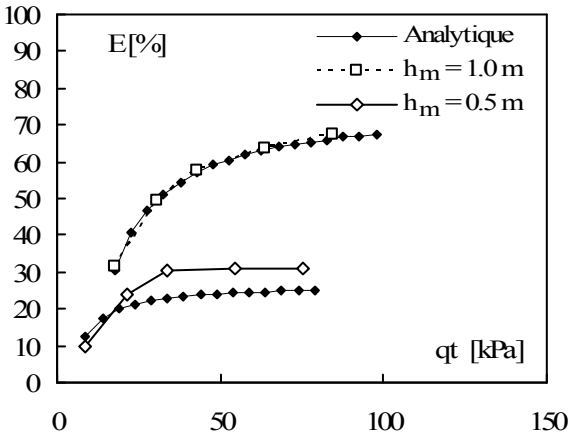



Fig. 17. Comparaison entre les taux de report d'efforts E obtenus par simulations numériques discrètes et calculés analytiquement par la relation (9).

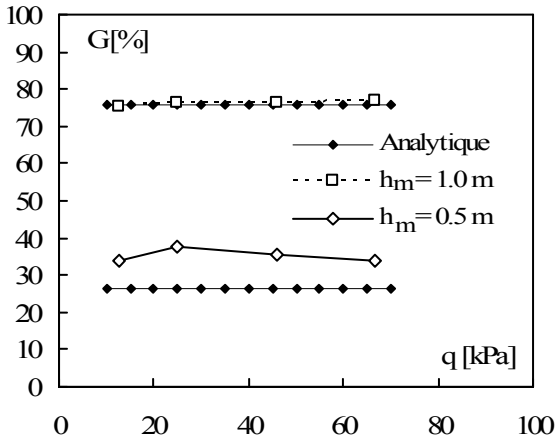



Fig. 18 Comparaison entre les capacités G du matelas granulaire à reporter les charges sur les pieux obtenus par simulations numériques discrètes et calculés analytiquement par la relation (9).

On constate sur les figures précédentes que globalement les nouvelles formulations analytiques proposées permettent d'approcher de façon très satisfaisante les mécanismes de transferts de charges. Pour des déplacements faibles de la couche granulaire (de l'ordre de 5 cm pour la géométrie testée) l'angle de frottement à considérer dans les formulations analytiques est très fortement corrélé à l'angle de frottement au pic des matériaux granulaires mis en place. Pour des déformations plus importantes on peut penser que la désorganisation des particules et les taux de déformations importantes requièrent des angles de frottement plus faibles en correspondance avec l'état lâche et le taux de déformation obtenus.

Notons que l'efficacité du système de renforcement augmente avec la hauteur du matelas granulaire du fait d'un accroissement des mécanismes de transfert de charge vers les pieux. Ceci reste vrai tant que le sol au dessus du pieu est capable de résister aux efforts qui lui sont appliqués. Dans le cas contraire il s'en suit un poinçonnement du matelas qui entraîne une chute de l'efficacité du système de renforcement, un accroissement des efforts sur le sol compressible et une augmentation des tassements de surface. Les mécanismes de transfert de charge sont donc bornés par la résistance au poinçonnement du matelas granulaire. Une forte épaisseur de matelas granulaire qui permettrait d'augmenter le transfert des charges vers les pieux est donc inutile si le sol au dessus des pieux est incapable de résister aux sollicitations qui lui seraient appliquées. Un optimum entre diamètre des pieux, espacement des pieux et hauteur du matelas de transfert de charge doit être recherché.

Les mécanismes de poinçonnement du matelas granulaire n'ont pas fait l'objet de calcul spécifique dans le cadre de ce travail. Néanmoins les observations faites numériquement dans les cas sous dallage montrent que le poinçonnement du matelas granulaire est fonction des caractéristiques mécaniques du matelas granulaire et du support compressible (rigidité ou capacité portante).

### 3.4 Cas d'une surcharge localisée

Pour vérifier la pertinence des mécanismes de transfert de charge proposés nous avons mené des simulations qui ont consistées à positionner des surcharges localisées dans ou en dehors des zones d'influence. On s'est demandé si une surcharge localisée située en dehors des zones de diffusion était redirigée vers le sol support et si à l'inverse des surcharges localisées situées dans la zone de diffusion étaient redirigées majoritairement vers les pieux. Les paramètres de calcul des simulations effectuées correspondent à ceux de la configuration de base ($K_c$ = 0,75MPa/m) et ce pour deux hauteurs de remblai ($h_m$=0.5 m et $h_m$ =1m). La surcharge appliquée, équivalente à une charge uniforme localisée, a été positionnée par incréments successifs.

***Résultats obtenus lorsque la surcharge localisée est appliquée au centre de la maille :***

Présentés sur les figures suivantes, les résultats obtenus sont : les efficacités E et G du report de charge en fonction de la surcharge appliquée, les champs de déplacements résultant de l'application de la charge localisée et les réseaux de chaînes de forces pour différentes sections du matelas granulaire. Les résultats de la figure 19 montrent que les efforts appliqués au centre de la maille sont redirigés majoritairement vers le sol support. Aucun mécanisme de voûte qui aurait permis un report total des efforts vers les pieux n'a pu être constaté et ce pour les deux hauteurs de matelas granulaires testées.

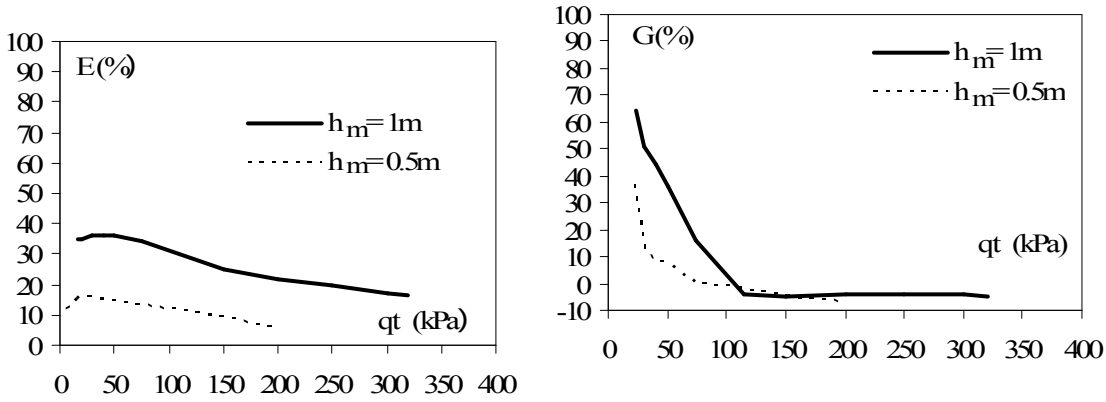



Fig. 19 : Efficacités E et G en fonction de la charge appliquée.
(Charge localisée appliquée au centre de la maille).

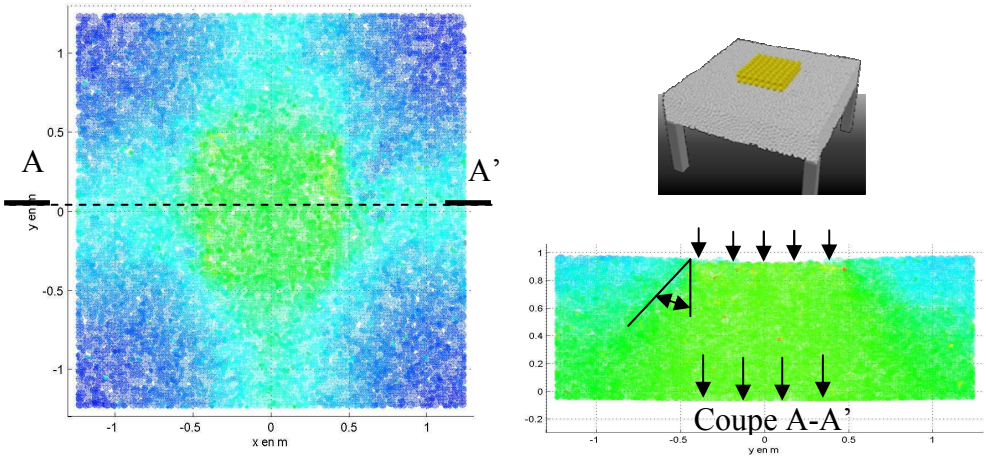
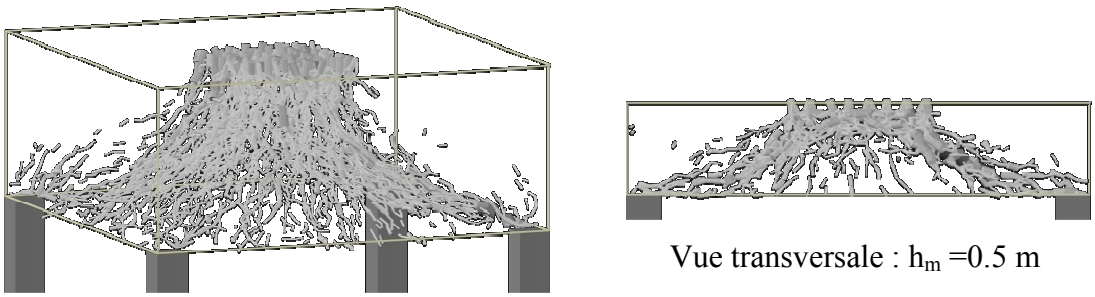



Fig. 20 : Champs de déplacements en vue de dessus et coupe verticale entre les pieux
(Charge localisée appliquée au centre de la maille, $h_m$=1m)



Vue transversale : $h_m$ =0.5 m

Vue 3D : $h_m$ = 1 m

Fig. 21. Réseaux de chaînes des forces dans le matelas granulaire.
(Charge localisée appliquée au centre de la maille)

Sur la figure 19 on constate que E l'efficacité et G la capacité de la couche granulaire à rediriger les efforts vers les pieux diminuent en fonction de la charge appliquée. On note également que G diminue jusqu'à atteindre des valeurs négatives ce qui signifie que les mécanismes de transferts de charges initiés sous poids propre sont annihilés (l'application d'un accroissement d'effort au centre de la maille entraîne une augmentation plus importante des accroissements d'efforts supportés par le sol support). Sur les figures 20 et 21, les champs de déplacements et les réseaux de chaînes de forces montrent que les efforts sont principalement redirigés vers le sol support. Sous la zone chargée, un mécanisme similaire mais inversé à celui observé au dessus des pieux est obtenu.

***Résultats obtenus lorsque la charge localisée est appliquée à la verticale des pieux :***

Comme précédemment des simulations numériques ont étés menées mais en sollicitant la couche granulaire par des charges localisées positionnées au dessus des pieux. Les résultats obtenus, présentés sur les figures suivantes, sont : les efficacités E et G du report de charge en fonction de la surcharge appliquée et les réseaux de chaînes de forces pour différentes géométrie du matelas granulaire.

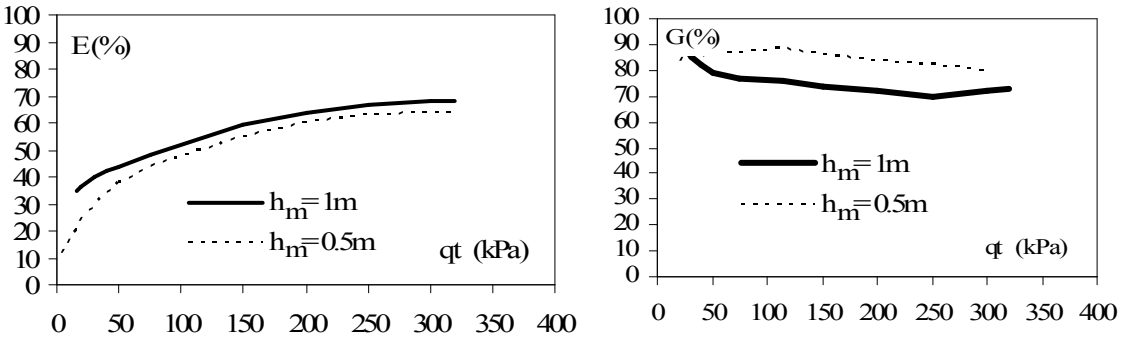



Fig. 22 : Efficacités E et G en fonction de la charge appliquée.
(Charge localisée appliquée à la verticale des pieux).

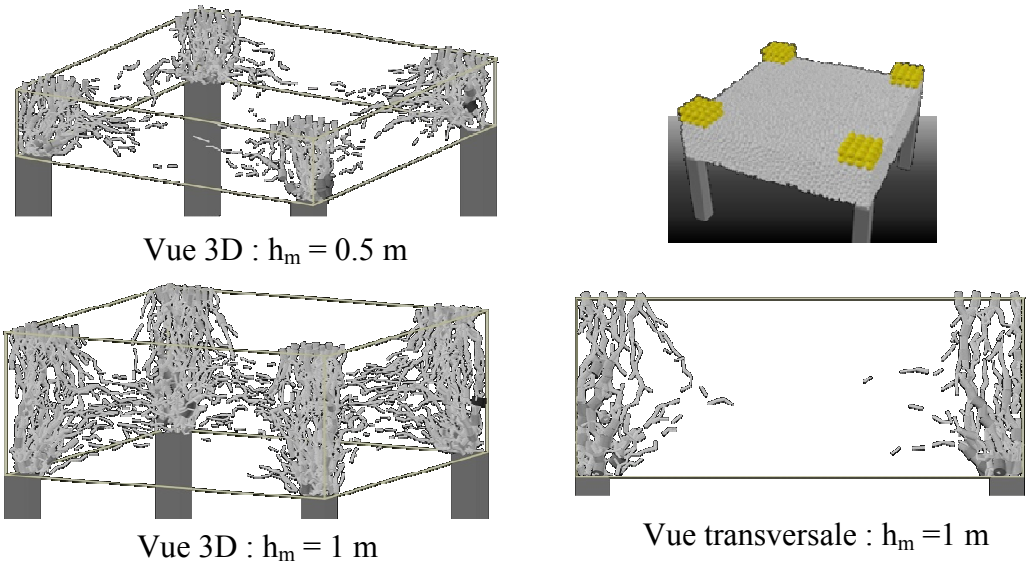



Fig. 23. Réseaux des chaînes des forces dans le matelas granulaire.
(Charge localisée appliquée à la verticale des pieux)

L'ensemble des résultats obtenus montrent que les efforts appliqués sont en majorité redirigés vers les pieux. Selon la hauteur du matelas granulaire, environ 80 à 90 % de la charge est redirigée vers les pieux soit 10 à 20 % qui transite par le sol compressible. Si l'on considère les réseaux de chaînes de forces on constate qu'effectivement la majorité des efforts transite par la colonne de sol située au dessus des pieux. Un double mécanisme de diffusion au dessus des pieux et sous la charge localisée fait qu'une partie des efforts est malgré tout redirigée vers le sol compressible.

## 4. Conclusion

Les développements numériques qui ont été réalisés montrent que les mécanismes de transfert de charge proposés sont compatibles avec l'ensemble des résultats présentés. Pour les géométries testées (épaisseur de matelas faible au regard des espacements de pieux) des zones de diffusion situées au dessus des pieux par lesquelles transitent en majorité les réseaux de chaînes d'efforts ont pu être identifiées. Ces zones de diffusions sont assez bien retranscrites par les formules analytiques des équations 9 sur la base des caractéristiques géométriques et physiques du problème étudie. Pour des caractéristiques et géométries proches de celles définies dans le cadre du projet national A.S.I.Ri. l'angle de diffusion des zones de transfert de charge est assez bien corrélé à l'angle de frottement macroscopique du matériau mis en œuvre. Toujours pour les géométries testées, la cinématique de mise en charge de la couche granulaire a peu d'influence sur les mécanismes de transfert de charge (chargement progressif du matelas de transfert de charge pour simuler la mise en place d'un remblai ou tassement progressif du sol support sous chargement constant pour simuler des tassements différés du sol compressible). Dans le cas d'une charge localisée positionnée au centre de la maille, on a montré qu'aucun mécanisme de voûte ne se développait dans le matelas granulaire puisque les efforts sont majoritairement redirigée vers le sol compressible. A contrario, une charge localisée au dessus des pieux est bien retransmise majoritairement vers les pieux.

Publications effectuées


Chevalier B., Villard P., Combe G. (2010) Investigation of load transfer mechanisms in geotechnical earth structures reinforced by rigid inclusions. ASCE, Journal of Geotechnical Engineering, accepted 2010.

Briançon L., Delmas Ph. And Villard P. (2010) : " Study of the load transfer mechanisms in reinforced pile–supported embankments". 9th International Conference on Geosynthetics, 9ICG, Guaruja, Brazil, 23-27 May 2010, pp. 1917-1920.

Chevalier B., Briançon L., Villard P. and Combe G. (2010) : "Prediction of Load Transfers in Granular Layers Used in Rigid Inclusions Technique – Experimental and Discrete Element Method Analysis". GeoFlorida 2010: Advances In Analysis, Modelling & Design, GSP 199, ASCE, Geo Institute, West Palm Beach, Florida, USA, 20 -24 February 2010, pp. 1718 -1726.

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.

Chevalier B., Combe G. and Villard P. (2009) : "Experimental And Numerical Study Of the Response Of Granular Layer In the Trap-door Problem". Powders & Grains (PG2009), Colorado School of Mines, Golden, Colorado, USA, 13-17 July 2009, pp. 649-652.

Chevalier B., Combe G. and Villard P. (2008) : "Experimental and Numerical studies of load transfers and arching effect". Proceedings of the 12th International Conference of IACMAG (International Association for Computer Methods and Advances in Geomechanics), Goa, India, 1-6 October 2008, pp. 273-280.