



# **PROJET NATIONAL ASIRI**

## **Tranche 2**

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

**Laboratoire 3S-R (Sols, Solides, Structures et Risques) de Grenoble**  
(Anciennement : équipe Lirigm)

B. CHEVALIER, G. COMBE & P. VILLARD.

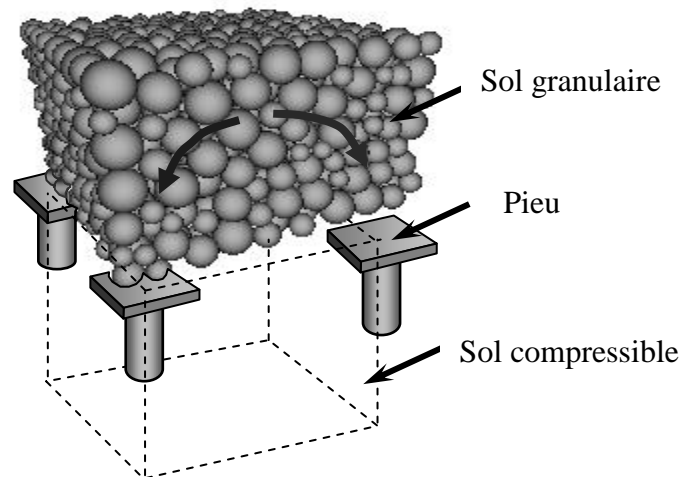
Juin /2007

## 1. Rappel de la proposition scientifique effectuée

Objectif : Etude des mécanismes de report de charge dans les matelas granulaires des remblais sur sol compressible renforcés 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 contact semble par conséquent bien adaptée. Le code de calcul proposé est un code de calcul tridimensionnel par éléments discrets développé localement sur Grenoble. Le code dans sa version actuelle permet de modéliser un sol par un ensemble de particules sphériques.



Modélisations proposées

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 sphériques ou par un ensemble de clusters (assemblages rigides de plusieurs particules sphériques, en cours de développement, représentant des granulats de forme complexe). Les lois de contact définies entre les particules permettent de décrire le comportement des matériaux granulaires purement frottants ou le comportement des matériaux frottants cohésifs. Le sol compressible sera pris en considération par l'intermédiaire d'une réaction d'appui verticale proportionnelle au tassement. La rigidité des inclusions peut être prise en considération.

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.

### Planning proposé :

2006/2007 : Mise en évidence des mécanismes de transfert de charge dans le matelas granulaire. Mise au point du modèle numérique et développements spécifiques. Obtention des résultats pour une géométrie de remblai donnée.

2007/2008 : Etude paramétrique. Influence de la hauteur du matelas granulaire. Influence de l'espacement entre les pieux et de la largeur de la tête de pieux. Influence de la rigidité du sol support. Influence de la structure du matelas granulaire (forme des grains, caractéristiques mécaniques).

2008/2009 : Confrontation et validation du modèle numérique avec les résultats des expérimentations en vraie grandeur. Réalisation d'abaque permettant de définir l'efficacité des pieux en fonction des caractéristiques géométriques et mécaniques des matériaux.

## **2. Budget attribué**

La subvention accordée au laboratoire 3S-R (anciennement Lirigm) par le programme national ASIRI pour le travail de modélisation numérique de la tranche 2 (2006/2007) est de **5000 euros HT**.

## **3. Synthèse du travail effectué**

*Aptitude de la modélisation par éléments discrets pour décrire le comportement des ouvrages en sol renforcés par inclusions rigides dans un cas réel (simulation réalisée pour le benchmark)*

Le but de cette partie est d'ébaucher les perspectives d'utilisation de méthodes numériques discrètes pour la simulation du comportement d'ouvrage de renforcement de sols par inclusions rigides. L'exemple illustré ici présente la modélisation numérique d'un tel ouvrage, constitué d'un substratum compressible renforcé par inclusions rigides (de type pieu) sur lequel est mis en place un matelas granulaire de transfert de charges surmonté d'un dallage (expérimentation de Saint-Ouen l'Aumône, plot 3D et 4D).

### 3.1. Modélisation de l'ouvrage

L'ouvrage peut être représenté de la manière suivante (Fig1) : (le maillage des inclusions est un maillage carré de côté 2.50m)

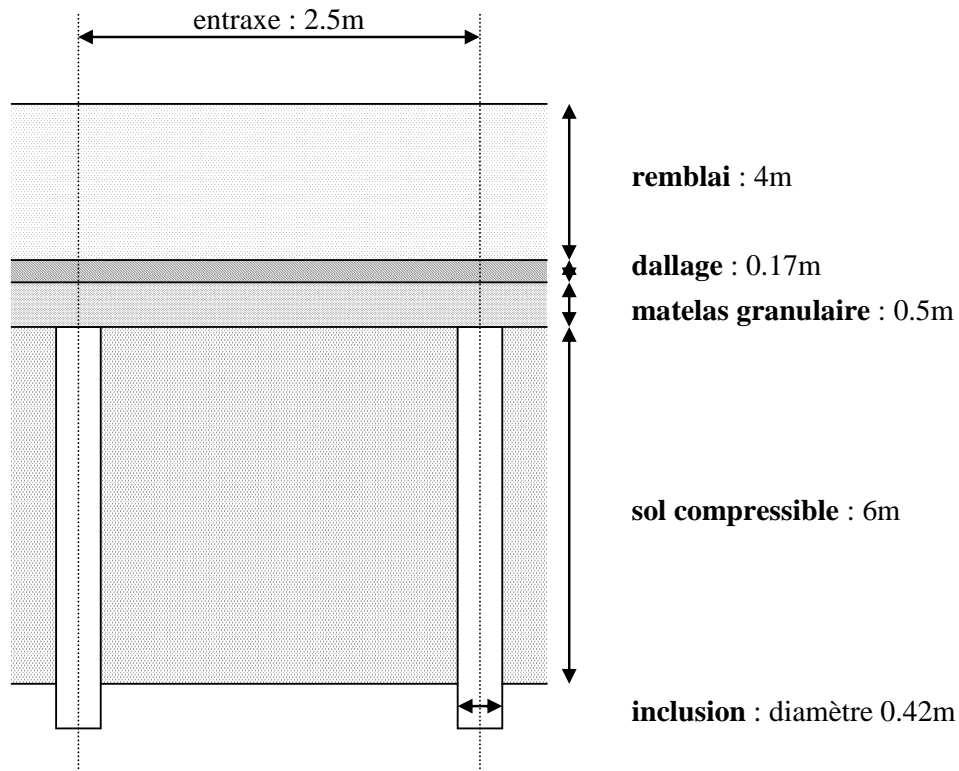


Fig1 – Profil de l'ouvrage en coupe verticale

Les inclusions sont supposées ancrées dans un substratum rigide situé sous la couche de sol compressible à renforcer. Cependant, il est possible de prendre en compte dans la simulation des inclusions dites « flottantes ».

L'intérêt premier de la simulation numérique discrète est de pouvoir appréhender le comportement des matériaux granulaires à plusieurs échelles (macro-, méso- et micro-). C'est pourquoi l'essentiel des développements présentés ici s'attachent à la description des mécanismes de transferts de charges se produisant dans le matelas granulaire.

- le matelas granulaire est modélisé par un ensemble de grains numériques appelés particules. Chaque particule est constituée d'un assemblage parfaitement rigide de deux sphères,
- la couche de sol compressible et les inclusions sont représentées par un ensemble de ressorts indépendants (modèle dit de « Winkler »).
- le dallage est modélisé par un ensemble de sphères ordonnées dont les caractéristiques mécaniques permettent de reproduire le comportement d'une dalle en flexion.
- une surcharge uniforme est appliquée sur le dallage.

Seule une maille élémentaire de 2.50m x 2.50m a été modélisée ici. Les plans verticaux délimitant cette maille élémentaire sont considérés comme plan de symétrie. Le contact entre ces plans et les éléments du matelas granulaire se fait sans frottement.

La vue des éléments modélisés est donnée figure 2.

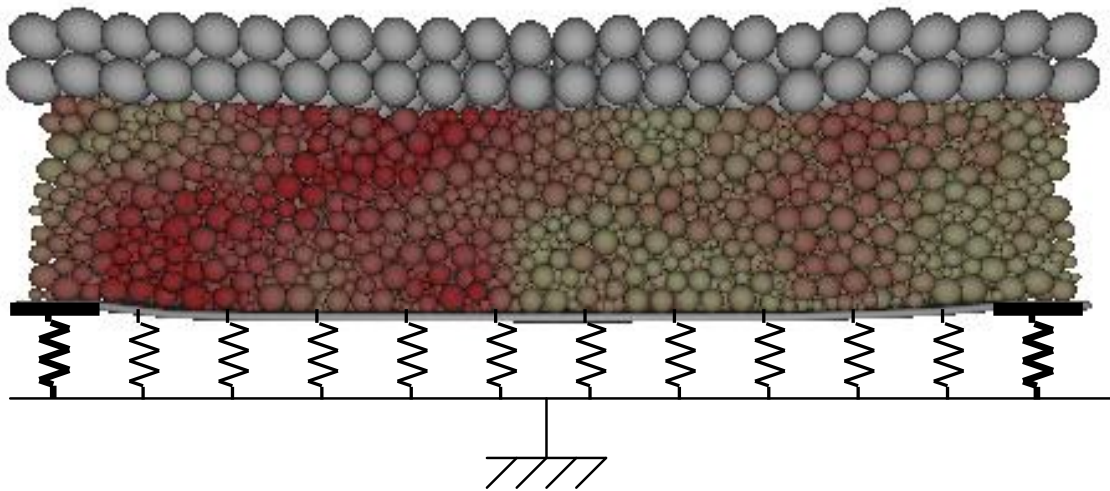


Fig. 2 – Vue d'ensemble des éléments constitutifs de la modélisation par éléments discrets

### 3.2. Détermination des propriétés mécaniques des éléments :

#### *Matelas granulaire*

La détermination des caractéristiques micromécaniques des particules constituant le matelas granulaire a été effectuée par calage sur les courbes d'essais triaxiaux sur matériaux réels. Les facteurs granulométrie et porosité ont été choisis a priori.

Le matériau réel présente des caractéristiques mécaniques très fortes :

- module d'Young tangent initial  $E$  variant entre 230 MPa et 320 MPa selon le confinement considéré,
- pour une densité de 95% OPM<sup>1</sup> :  $c = 50\text{kPa}$  et  $\phi_{\text{pic}} = 47^\circ$ ,
- pour une densité de 85% OPM :  $c = 9.5\text{kPa}$  et  $\phi_{\text{pic}} = 47^\circ$ ,

Il présente également un caractère fortement dilatant.

La compacité de mise en place des du matelas granulaire a été choisie proche de la compacité maximale.

Les caractéristiques micromécaniques choisies sont données dans le Tableau 1 :

rigidité normale $\langle kn \rangle$	$14.5 \cdot 10^6 \text{ N/m}$
rapport rigidité tangentielle/ normale $ks/kn$	0.75
coefficient de frottement $\mu$	$\tan(30^\circ) = 0.577$
résistance à la traction du contact	400Pa
résistance au cisaillement du contact	10Pa

Tab. 1 : Caractéristiques micromécaniques des éléments constituant le matelas granulaire

<sup>1</sup> selon données fournies dans le cadre du benchmark

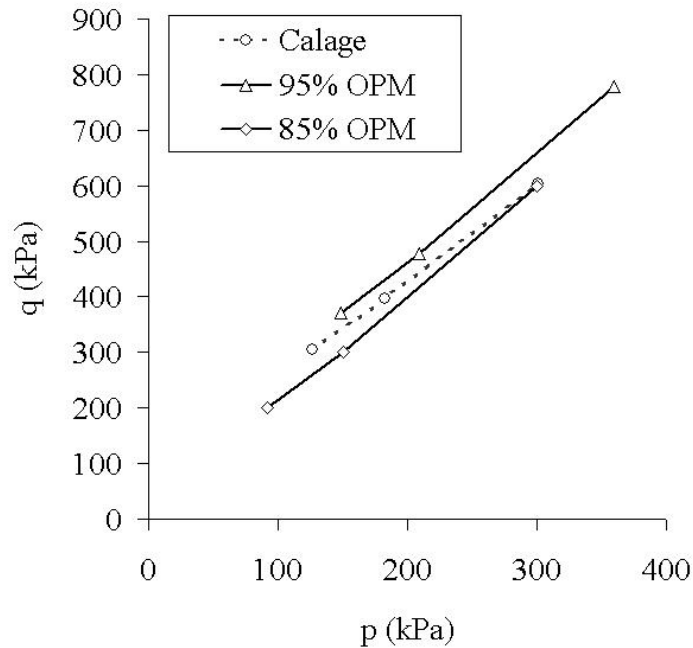


Fig. 3 – Courbes intrinsèques du matériau réel pour des densités de 85% OPM et 95% OPM (courbe en traits pleins) et pour le matériau modélisé (trait pointillé).

Le calage entre expérimentation et modélisation, présenté sur la Fig. 3, montre une bonne corrélation entre les courbes intrinsèques pour des pressions de confinement identiques à celles mises en œuvre dans le cadre des essais expérimentaux. Les caractéristiques macromécaniques obtenues par simulation numérique d'essais triaxiaux sont présentées dans le tableau. 2 :

	85% OPM	95% OPM	modèle granulaire
module d'Young tangent initial	100-300MPa	230-320MPa	265-274MPa
angle de frottement au pic	47°	46.9°	42°
cohésion	9.5kPa	50kPa	45kPa
angle de dilatance (25kPa-50kPa-100kPa)	33°-18°-13°	49°-44°-31°	35°-42°-47°

Tab. 2 : Comparaison des caractéristiques mécaniques déterminées par essai triaxial pour le matériau réel et pour le matériau modèle

### *Sol compressible*

Un profil géotechnique a été réalisé à partir des différents résultats de sondages fournis. Ce profil considère une couche de sol compressible de 6.0 mètres de haut recouvrant le substratum considéré horizontal. Le découpage de ces 6.0 mètres de sol compressibles selon les différents horizons rencontrés (tourbe, argile...) est donné dans le tableau 3.

0.0-2.0m	Remblai
2.0-3.0m	Sable argileux
3.0-3.2m	Argile verte
3.2-4.5m	Argile grise limoneuse
4.5-6.0m	Tourbe noire
>6.0m	Sable compact

Tab. 3 : Profil géotechnique retenu

La couche critique de cet ensemble est la couche de tourbe. Son épaisseur a été prise ici égale à 1.5 mètres. La variabilité des tassements obtenue en fonction de l'épaisseur de cette couche est très grande.

Un calcul de tassement par la méthode œdométrique, sans inclusions a été réalisé afin d'estimer la rigidité des ressorts du modèle de Winkler à prendre en compte. Ce calcul a été mené en prenant en compte la consolidation (primaire) de ces couches dans le temps. On a tenu compte du phasage de réalisation du remblai de surcharge (en deux couches de 1.50 mètres à  $t=t_0$  puis 2.50m à  $t=t_0+60j$ ). Pour le profil retenu, et à partir des résultats d'essais de caractérisation réalisés sur les matériaux de ce profil, les résultats des calculs de tassements sont récapitulés dans le tableau 4.

Chaque ressort du modèle de Winkler est associé à une surface S de l'interface entre le sol compressible et le matelas granulaire. Le module donné dans le tableau représente la contrainte  $\sigma$  qu'il faut appliquer sur cet élément de surface pour que le ressort associé se déforme de  $\Delta u$  :

$$\sigma = K\Delta u$$

Ce module représente donc la rigidité du ressort, rapporté à la surface qu'il reprend. La dernière colonne du tableau 4 contient les valeurs de module équivalent du sol compressible pour chaque phase.

	Phase	Surcharge réellement appliquée (kPa)	Tassement (mm)	Module résultant (Mpa/m)
1	Matelas granulaire + dallage	13.2kPa	9.6	1.37
2	1 <sup>ère</sup> couche de remblai à $t=t_0+1j$	25.0kPa	11.3	14.9
3	1 <sup>ère</sup> couche de remblai à $t=t_0+60j$		31.5	1.23
4	2 <sup>ème</sup> couche de remblai à $t=t_0+61j$	41.7kPa	42.5	3.81
5	2 <sup>ème</sup> couche de remblai à $t=t_0+120j$		136.7	0.44

Tab. 4 : Calculs de tassement par la méthode œdométrique pour les

Seules deux valeurs ont été choisies :

- une valeur de module dite « à court terme » (déduite des phases 1, 2 et 4) : 5.0 MPa/m,
- une valeur de module dite « à long terme » (déduite des phases 3 et 5) : 0.6 MPa/m.

### *Inclusions*

Les inclusions ont été modélisées par des ressorts. L'effort résultant sur les inclusions est traduit par un déplacement vertical (uniforme pour les quatre  $\frac{1}{4}$  d'inclusions) par le biais d'un module. Ce module a été calculé à partir du module élastique mesuré sur le béton constituant les inclusions, en considérant une déformation homogène sur toute la longueur de l'inclusion.  
 $E_{inclusions} = 3000 \text{ MN/m}$

### *Dallage*

Le dallage a été modélisé par deux couches de sphères, chaque couche est composée de 24x24 sphères. La rigidité du contact entre ces sphères est telle que le module d'Young mesurable en flexion sur le dallage est égal au module d'Young mesuré en compression sur éprouvette  $E_{dalle} = 38730 \text{ MPa}$ . L'épaisseur de la dalle est de 0,17 mètres et sa masse volumique de 2320  $\text{kg/m}^3$  (produit  $EI = 15,6 \text{ MN.m}^2$ )

### 3.3. Résultat des modélisations :

Les résultats pouvant être extraits du modèle discret sont nombreux :

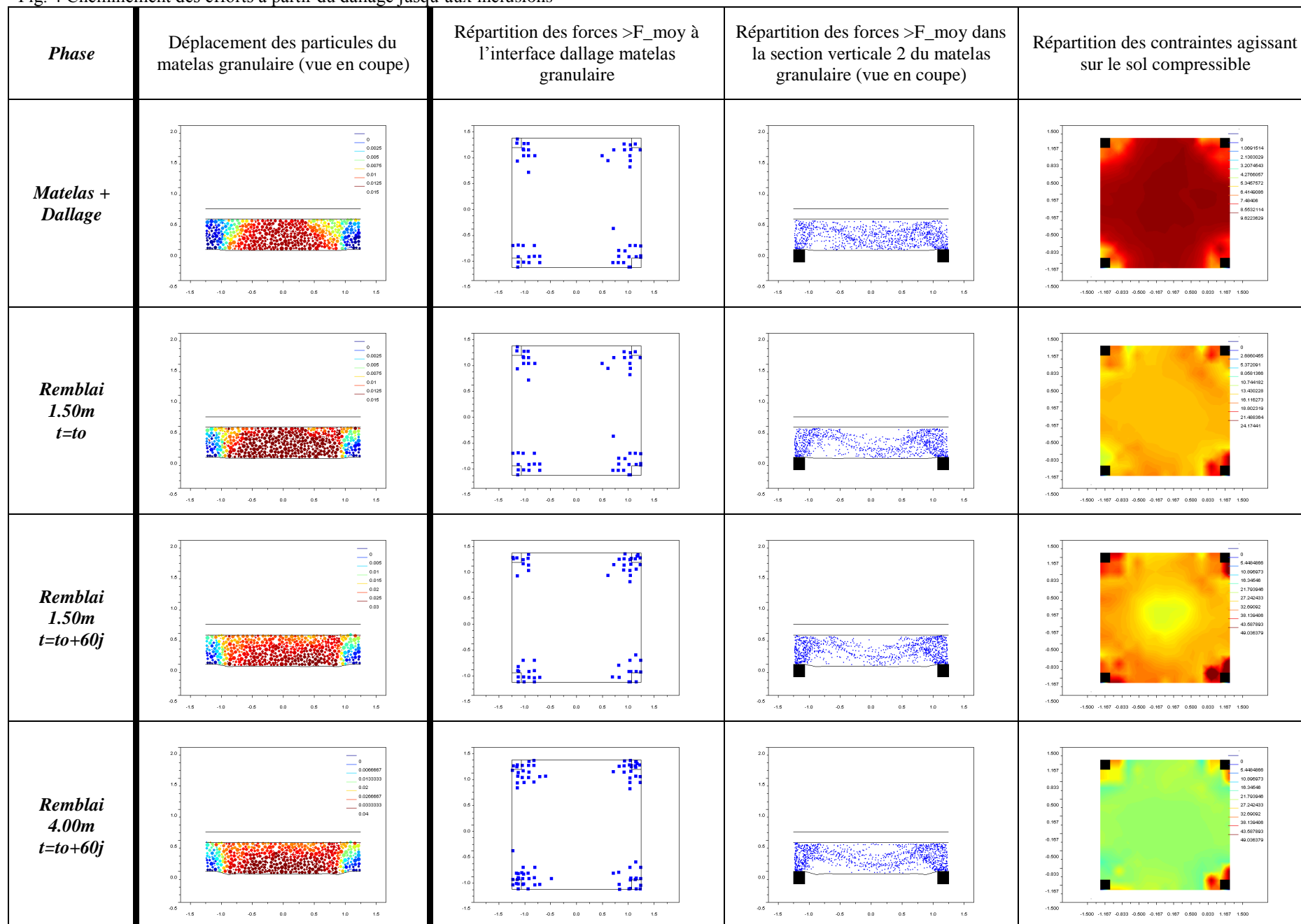
- répartition des efforts appliqués entre les inclusions et le sol compressible,
- cartographie des déplacements de particules du matelas granulaire,
- répartition globale des efforts et orientations des contacts dans l'ouvrage,
- répartition des contraintes ou efforts entre le dallage et le matelas granulaire,
- état de contrainte dans des zones localisées du matelas granulaire
- etc.

Sur la page suivante (Fig. 4 à 8) sont présentées plusieurs représentations visuelles permettant de visualiser le cheminement des efforts dans le matelas granulaire.

- **1<sup>ère</sup> colonne** : une carte de déplacement des particules (vue en coupe),
- **2<sup>ème</sup> colonne** : répartition, en plan, des efforts dits « forts » (supérieurs à l'effort moyen), entre le dallage et le matelas granulaires,
- **3<sup>ème</sup> colonne** : en coupe cette fois, la répartition des efforts dits forts au sein entre particules constitutives du matelas granulaire,
- **4<sup>ème</sup> colonne** : répartition en plan de la contrainte exercée par le matelas granulaire sur le sol compressible.



Fig. 4 Cheminement des efforts à partir du dallage jusqu'aux inclusions



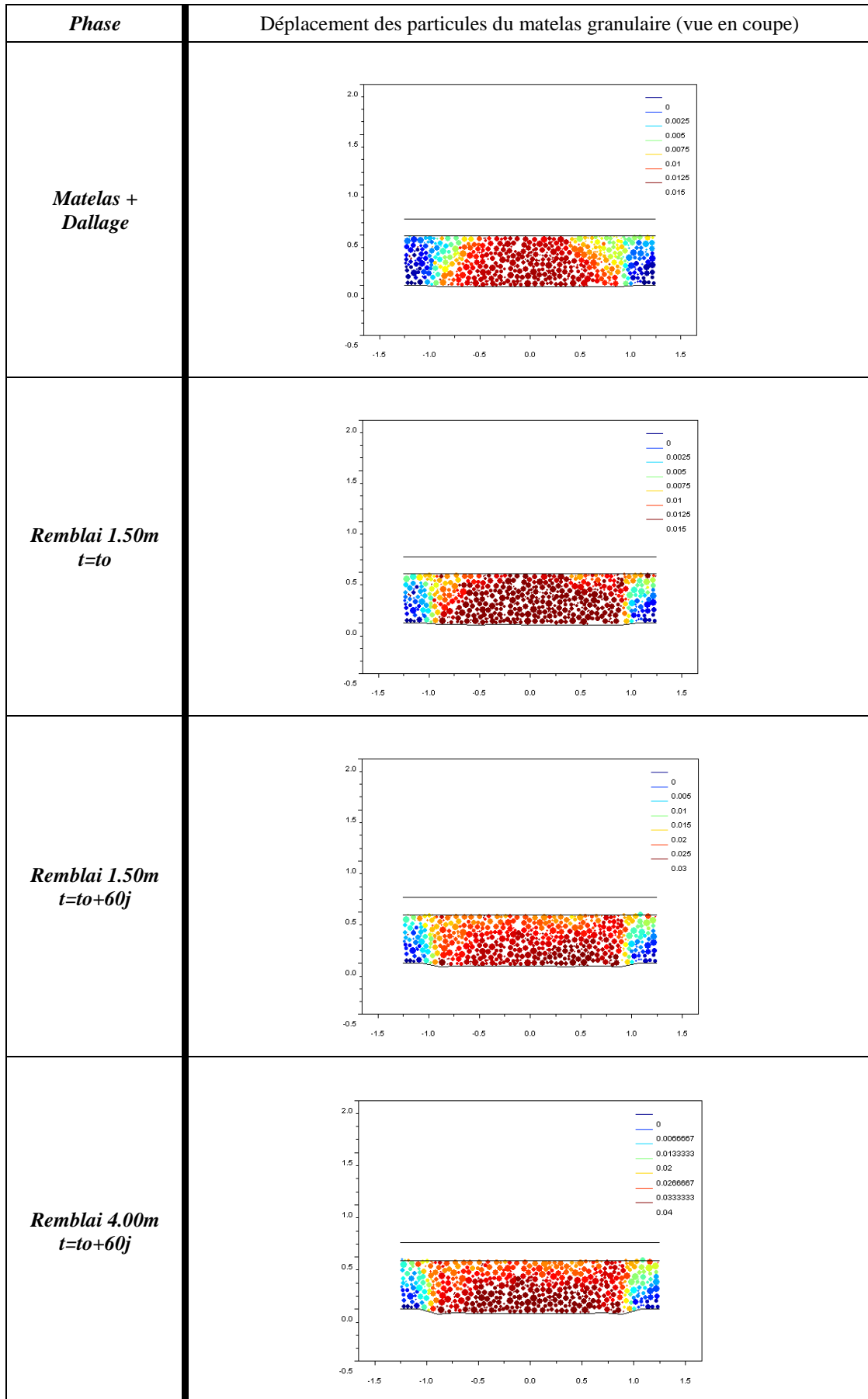


Fig. 5 : Cartographie des déplacements des particules du matelas granulaire

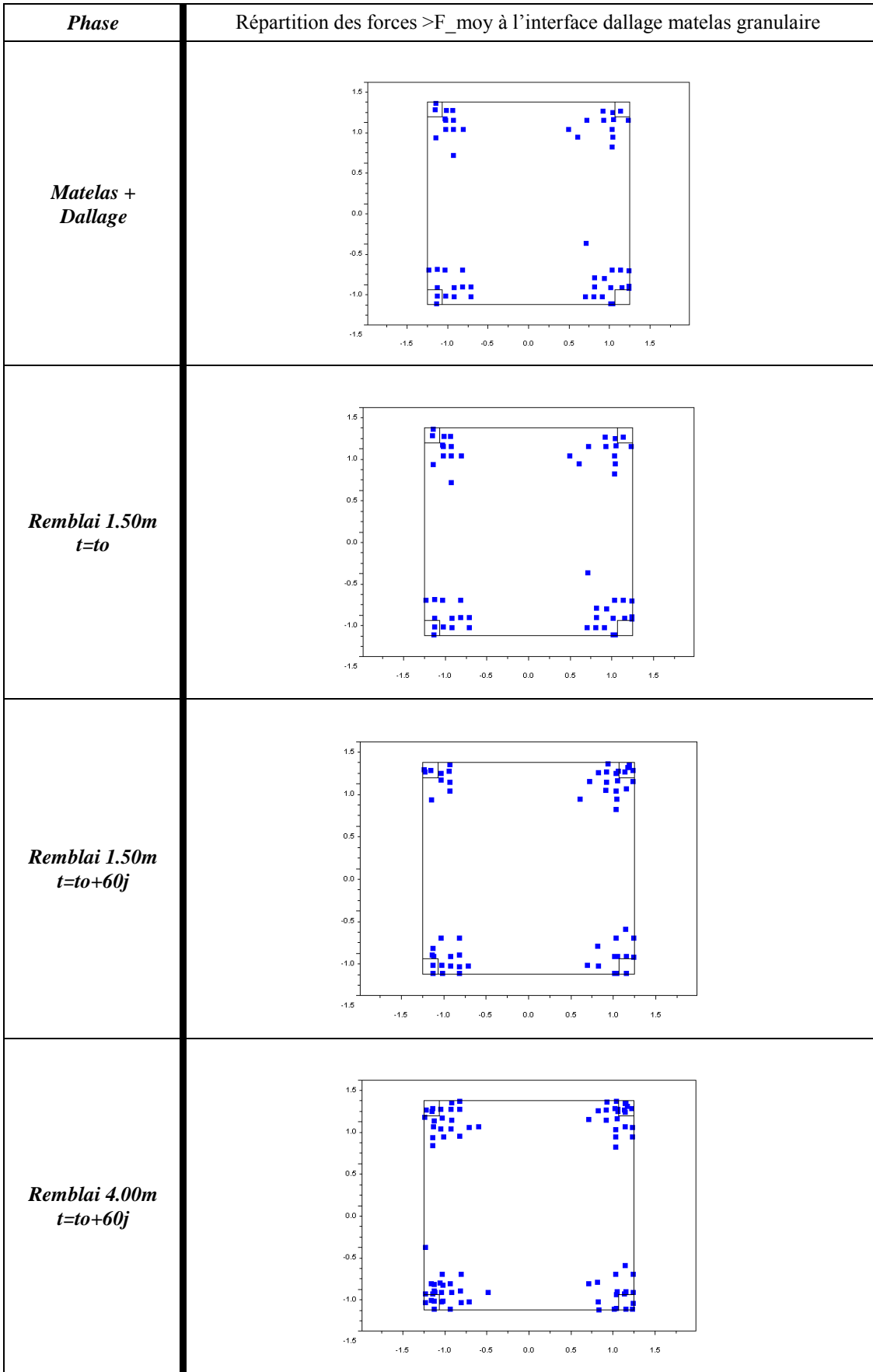


Fig. 6 : Répartition des efforts dits « forts » à l'interface entre le dallage et le matelas granulaire

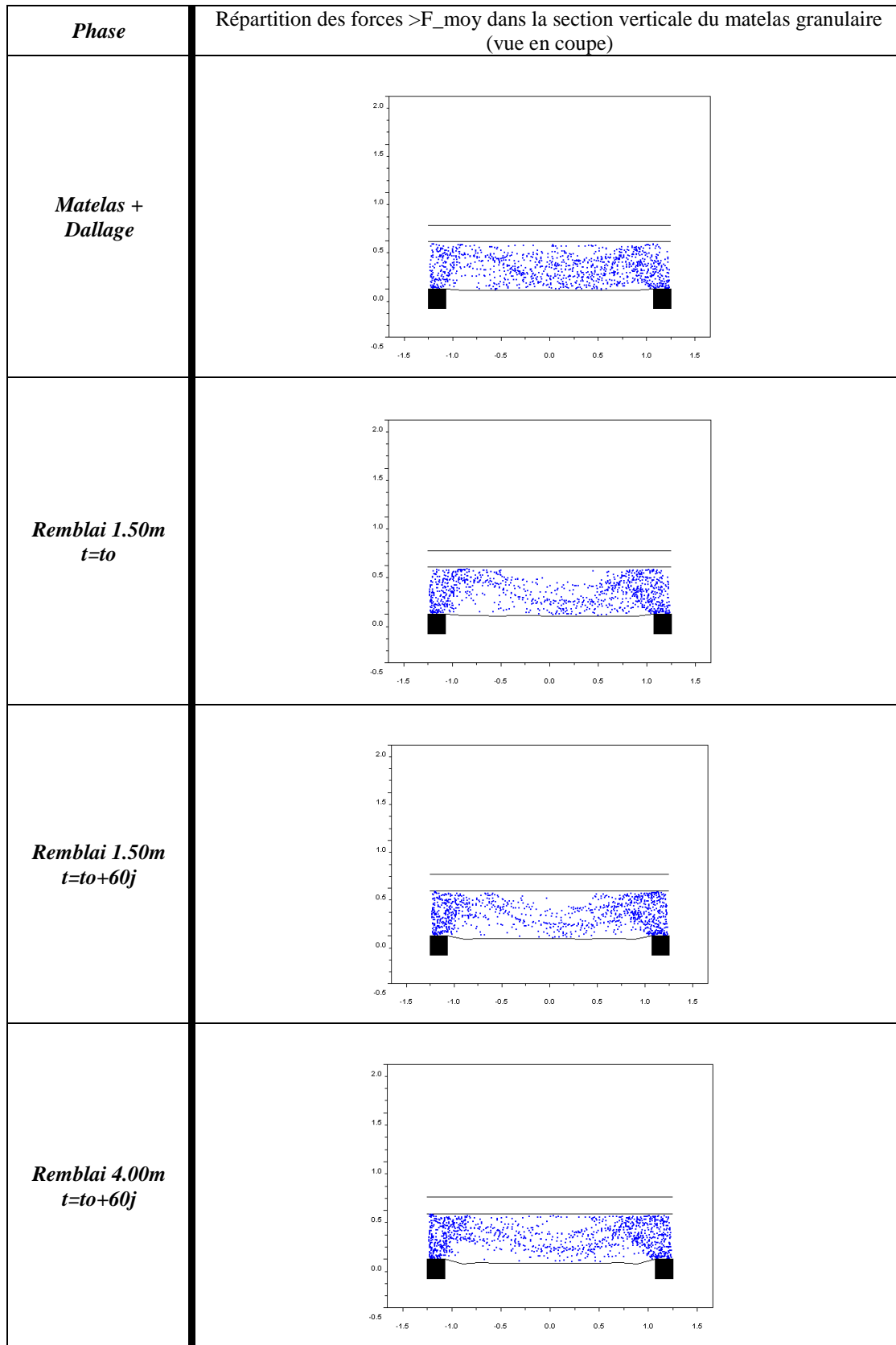


Fig. 7 : Répartition des efforts de contact entre particules dits « forts » dans le matelas granulaires. Chaque effort de contact est pondéré par l'altitude du point de contact dans la couche

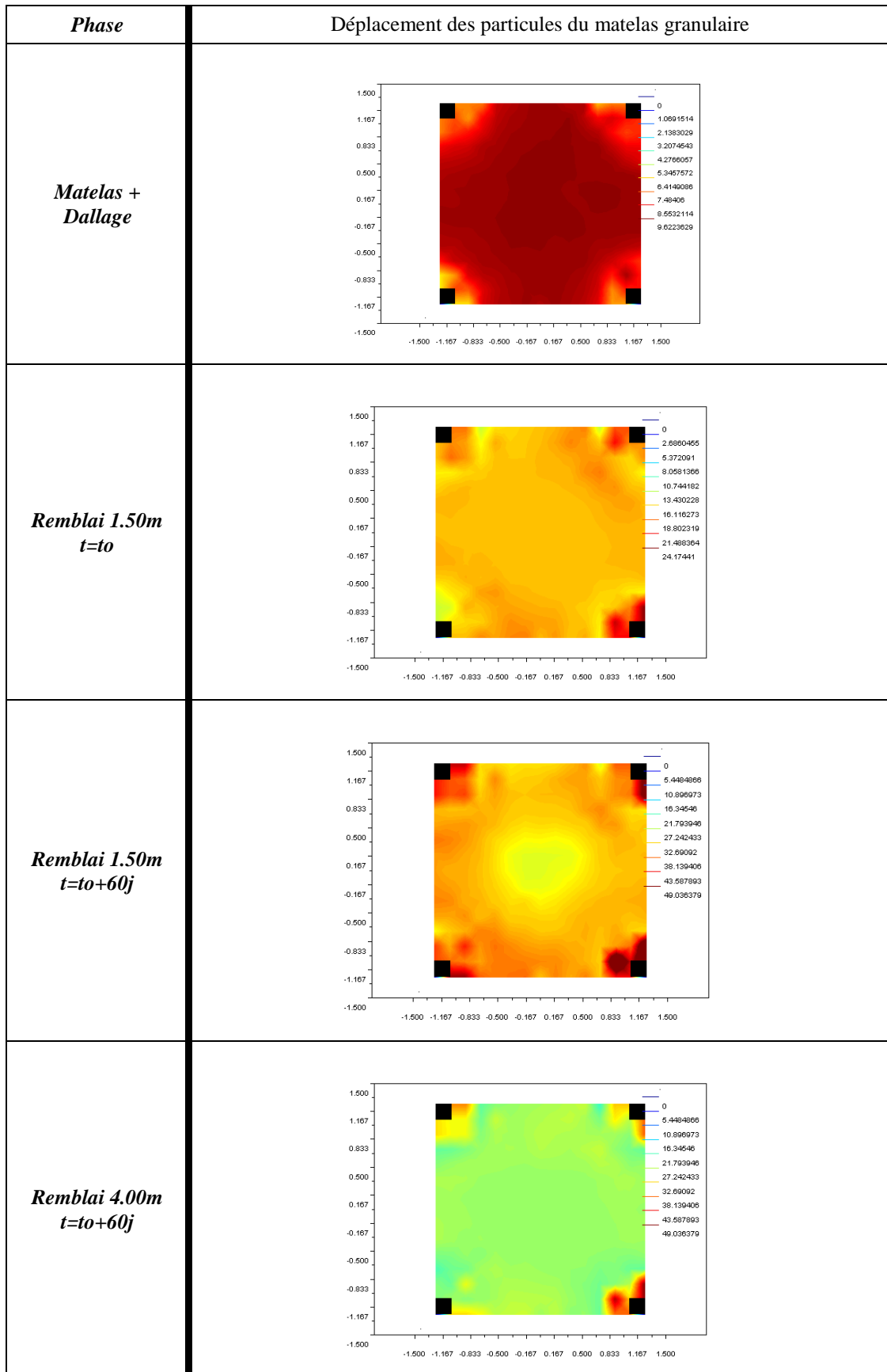


Fig. 8 : Répartition des contraintes à l'interface entre le matelas et le sol compressible

Le tableau 5 résume les résultats obtenus par simulation en terme de comportement global : tassement moyen du dallage et efficacité. L'efficacité est définie de la manière suivante :

$$E_p = \frac{\text{effort appliqué sur les inclusions}}{\text{effort total vertical appliqué}}$$

Phase	tassement moyen (cm)	efficacité (%)
matelas granulaire + dallage	0.00	30.7
remblai 1.50m à t0	0.54	46.5
remblai 1.50m à t0+60	2.24	57.4
remblai 4.00m à t1	2.98	58.7
remblai 4.00m à t1+60j	6.07	68.2

Tab. 5 : Résultats macroscopiques obtenus sur le plot modélisé

Pour mémoire, le taux de recouvrement effectif des inclusions dans ce cas est de 2,2%, ce qui est très faible. L'efficacité mesurée en fin de chargement (presque 70%) est très élevée. Etant donné l'épaisseur de matelas de transfert mise en œuvre, on peut légitimement supposer que la surcharge appliquée sur la dalle est transmise directement aux inclusions au travers d'un volume de sol limité situé juste au dessus des inclusions.

### 3.4. Perspectives et conclusions

La modélisation discrète de l'expérimentation en vraie grandeur est réalisable avec la méthode des éléments discrets en 3D, et dont les résultats sont présentés ici.

Cette méthode nous permet d'avoir accès à des résultats exploitables à différentes échelles (de l'échelle macroscopique jusqu'à l'échelle des contacts en grains du matelas de transfert). Cette diversité d'échelles permet une très bonne compréhension des mécanismes mis en jeu. Dans le cas présent d'un matelas granulaire surmonté d'un dallage, on peut apprécier la manière dont les efforts sollicitant l'ouvrage transitent à travers le matelas granulaire jusqu'aux inclusions, qui en fin de chargement, reprennent presque 70% de l'effort vertical total appliqué.

On peut également remarquer que la présence du dallage entraîne une diffusion des efforts très localisée au droit des têtes d'inclusions. Elle a pour conséquence de solliciter très fortement ces zones particulières du matelas granulaire. Le reste du matelas de transfert reste, quant à lui très peu sollicité.

Des calculs similaires ont été effectués sans dallage et présentés dans le cadre du benchmark. Par la suite une étude paramétrique sera menée afin de mieux apprécier l'influence des paramètres principaux du problème sur les mécanismes de transfert de charge : compressibilité du sol support, hauteur du matelas de transfert, caractéristiques mécaniques du matelas granulaires, influence du dallage...