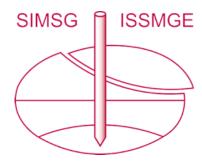
# INTERNATIONAL SOCIETY FOR SOIL MECHANICS AND GEOTECHNICAL ENGINEERING



This paper was downloaded from the Online Library of the International Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (ISSMGE). The library is available here:

https://www.issmge.org/publications/online-library

This is an open-access database that archives thousands of papers published under the Auspices of the ISSMGE and maintained by the Innovation and Development Committee of ISSMGE.

# Interaction sol-fondation – Influence d'un bicouche sol-Pneusol Soil-foundation interaction – Influence of a 2-layer soil-Pneusol

C. Boutin – DGCB URA CNRS ENTPE de Lyon, France
A. Boulebnane & P. Lareal – URGC-Géotechnique, INSA de Lyon, France
N.T. Long – LCPC Paris, France

ABSTRACT: This paper describes the stress distribution under a rigid slab being vertically loaded; the pressure in soil is measured by electric cells. It shows one of the way to use the Pneusol (Tyresoil) in Civil Engineering: as a distributor of vertical stresses. Experimental results presented herein show the influence of a 2-layer soil-Pneusol on the stress distribution. A theoretical study of the Pneusol behaviour using the homogenisation method is also presented.

RESUME: Cet article présente les résultats de mesures de contraintes totales au sein d'un massif modèle réduit de sable chargé par une semelle rigide. Des capteurs de contraintes à mode d'action indirect sont utilisés. L'influence d'un bicouche sol-Pneusol, sur la distribution des contraintes, est mise en évidence.

Une première approche théorique du comportement du Pneusol par une méthode d'homogénéisation est présentée.

## 1 INTRODUCTION

La connaissance de la répartition des contraintes au sein d'un massif, comme au contact sol-structure, est un élément essentiel de la validation des méthodes de prévision du comportement mécanique des sols sollicités par des ouvrages divers. Cependant, la distribution des pressions transmises au contact d'une fondation et au sein d'un massif de sol reste délicate à déterminer, et on se contente souvent de l'utilisation des résultats issus de la théorie de l'élasticité. Cependant, l'approche expérimentale par la mesure directe des contraintes, devrait permettre d'obtenir une meilleure représentation de leurs distributions réelles.

Les recherches réalisées à l'INSA de Lyon ont permis de tester l'efficacité, dans des massifs "modèles réduits" de sable, de capteurs pneumatiques à contre-pression, et de capteurs électriques à mode d'action indirect. On présente tout d'abord les résultats des mesures de contraintes obtenus, avec ce dernier type de capteur, dans un massif de sable chargé verticalement par une semelle métallique rigide.

On présente ensuite les résultats obtenus dans le cas particulier où la charge est transmise au massif de sable par l'intermédiaire d'un matelas constitué par du Pneusol mis en place sous la semelle de fondation. En effet le Pneusol, depuis les travaux de Long (1985), permet des applications diverses dans le domaine des travaux publics (Laréal et al. 1995). Son effet "dissipateur de pression" dans le cas d'un bicouche "sol-Pneusol" est ici présenté.

Les "pneus" utilisés dans les modèles réduits sont des couronnes en mousse de polyuréthanne dont l'association avec du sable simule qualitativement un massif de Pneusol léger (Long 1993).

Une première approche théorique du comportement du Pneusol léger par une méthode d'homogénéisation (Boutin et al. 1992) est enfin présentée afin de faire ressortir les propriétés spécifiques des massifs de Pneusol.

# 2 ANALYSE EXPERIMENTALE

On étudie l'influence de la présence d'un massif modèle réduit de Pneusol, mis en place sous une semelle rigide, sur la distribution des contraintes sous la fondation et en profondeur.

L'étude est réalisée sur un modèle réduit (Figure 1) constitué d'un massif de sable placé dans une cuve de profondeur H= 600 mm et de 1500 mm de diamètre, chargé en surface par une plaque métallique rigide de rayon R= 175 mm et de 35 mm d'épaisseur.

Les dimensions des pneus modèles réduits sont de 12 mm en

epaisseur, et respectivement 30 et 60 mm de diamètres interne et externe.

Le sol utilisé est le sable d'Hostun RF. C'est un sable siliceux (Flavigny et al. 1990) mis en place avec un poids volumique de 15,5 kN/m<sup>3</sup>.

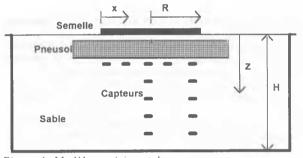


Figure 1. Modèle expérimental.

Des capteurs de contraintes totales de type Kyowa BE-C (Boulebnane 1996) permettent de mesurer la distribution des contraintes suivant des plans parallèles à la surface, et suivant les axes verticaux passant par le centre et le bord de la semelle (Figure 1).

Les mesures sont d'abord réalisées dans des massifs de sable seul (massif de référence), puis dans des massifs contenant un matelas de Pneusol constitué de 3, 5, 7, ou 9 couches de pneus disposés les uns sur les autres en quinconce.

# 3 CONTRAINTES SOUS LA SEMELLE

Les capteurs sont placés à 20 mm sous la semelle qui est chargée par paliers successifs de 2 à 12 kN (20 à 120 kPa).

La Figure 2 présente les distributions des contraintes lors du chargement (x/R = 1 étant l'axe de symétrie de la semelle). On note que :

- 1. La répartition des contraintes est de forme convexe avec un maximum au centre dès l'application des premiers incréments de charge. Cette convexité est conservée durant tout l'essai;
- 2. Une légère dissymétrie des courbes, due à un ou plusieurs des facteurs suivants : hétérogénéité locale de la densité de mise en place du sable, horizontalité initiale imparfaite de la semelle, ou un défaut d'horizontalité des capteurs concernés;
  - 3. Les contraintes mesurées dans l'axe de la plaque sont

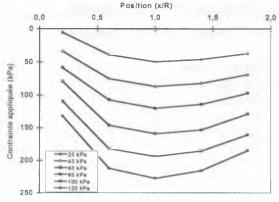


Figure 2. Distribution des contraintes à z = 20 mm.

généralement le double de la contrainte moyenne appliquée.

Ces résultats, notamment la convexité de la distribution, confirment ceux obtenus par Ibrahim (1983), Guezouli (1985), et Berriche (1988) avec des capteurs à contre-pression de type Glötzl Ils diffèrent de la distribution issue de la théorie de l'élasticité (distribution concave avec un maximum sous les bords pour les semelles rigides) qui ne traduit pas correctement le comportement des sols pulvérulents.

## 4 CONTRAINTES EN PROFONDEUR SOUS L'AXE

La Figure 3 présente les distributions des contraintes suivant l'axe vertical passant par le centre de la semelle (distribution moyenne de trois essais).

La tendance générale de ces courbes traduit bien la réduction des contraintes en profondeur. On observe

- 1. Une zone de concentration des contraintes entre z/H = 0.03 et z/H = 0.3, qui peut résulter d'effet voûte causé par la formation d'un coin de sol rigide solidaire de la semelle de fondation ;
  - 2. Un maximum de contraintes enregistré à z/H = 0.17;
- 3. Une diminution importante des contraintes au-delà de z/H=0.3;
- 4. Une réponse régulière des capteurs aux augmentations successives des incréments de contraintes appliquées.

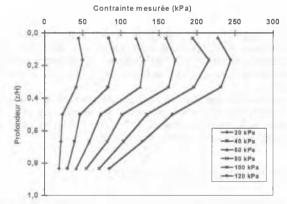


Figure 3. Distribution des contraintes sous l'axe de la semelle.

Ces résultats peuvent être comparés (Figure 4) à ceux obtenus par Berriche (1988), et Amrani (1993).

On remarque que ces auteurs avaient mis en évidence des formes semblables des distributions. Cependant l'utilisation ici de capteurs électriques permet des mesures instantanées et plus régulières, et donc plus fiables, que les capteurs pneumatiques.

Les distributions (Figure 4) issues de l'application de la théorie

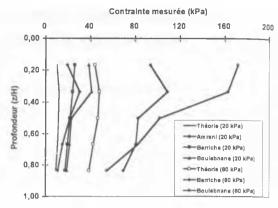


Figure 4. Distributions expérimentales et théorique des contraintes (pour 20 et 80 kPa).

de l'élasticité (avec v = 0.5 et H/R = 2) restent très différentes de celles mesurées ; elles les sous-estiment fortement.

#### 5 INFLUENCE DU PNEUSOL

Un matelas de Pneusol, d'épaisseur variable suivant le nombre de couches de pneus (3, 5, 7 ou 9 couches), est intercalé (Figure 1) entre la semelle de fondation et les points de mesure (capteurs). Les mesures sont réalisées aux mêmes points que dans les massifs de référence (sable seul).

#### 5.1 Contraintes suivant des plans horizontaux

- La Figure 5 présente, à titre d'exemple, la distribution des contraintes dans le massif de sable seul et sous le massif de Pneusol contenant 3 couches de pneus, à la même profondeur z/H = 0.12. On constate que :
- 1. La forme de la distribution est convexe. avec un maximum au centre de la fondation; cependant, la convexité des courbes avec le Pneusol est moins prononcée.
- Les courbes de distribution des contraintes sont plus étalées en présence du Pneusol.

Les essais réalisés avec respectivement 3, 5, 7, et 9 couches de pneus montrent, d'une manière générale, que la présence de Pneusol dans le massif de sol de fondation se traduit par une réduction d'environ 30% des contraintes sous la partie centrale, et par une augmentation des contraintes sous les bords (Boulebnane 1996).

## 5.2 Contraintes en profondeur sous l'axe de la semelle

La Figure 6 présente les distributions des contraintes mesurées aux mêmes profondeurs, sous le massif de Pneusol constitué de 5 couches de pneus, et dans le massif de sable seul.

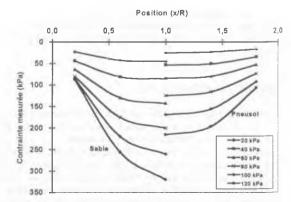


Figure 5. Distribution des contraintes (3 couches de pneus z/H = 0.12).

En présence de Pneusol, les contraintes mesurées sont nettement réduites, quelle que soit la profondeur sous la semelle de fondation.

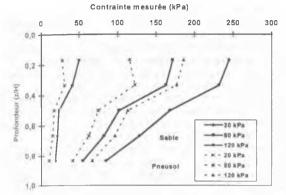


Figure 6 Evolution des contraintes sous l'axe central (5 couches de pneus , z/H = 0.16).

# 5.3 Contraintes en profondeur sous les bords de la semelle

La Figure 7 présente l'évolution des contraintes normales en profondeur sous les bords de la semelle. Elle permet de confirmer l'influence de la présence du Pneusol. Ce dernier provoque une augmentation des contraintes à la verticale du bord de la fondation, quelle que soit la profondeur.

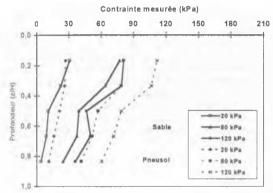


Figure 7. Evolution des contraintes sous le bord (5 couches de pneus ; z/H = 0.16).

# 5.4 Zone d'influence

L'ensemble de ces résultats met en évidence que le matelas constitué par le massif de Pneusol, en jouant un rôle de dissipateur de pression sur chaque plan horizontal, se comporte comme une fondation nouvelle de plus larges dimensions que la semelle. En plaçant des capteurs à l'extérieur de l'emprise de la semelle et du massif de Pneusol, on a pu montrer (Boulebnane 1996) que le cône d'influence de la semelle rigide passe de 29° dans le massif de sable seul, à 42° en présence du matelas de Pneusol.

# 6 EBAUCHE DE COMPORTEMENT THEORIQUE DU PNEUSOL LEGER

L'approche par homogénéisation parait bien adaptée au Pneusol léger, constitué d'alternances de couches de sol et de couches de pneus entiers vides répartis selon une structure périodique. Toutefois, la complexité géométrique de la structure élémentaire due à la disposition des pneus en quinconce (Figure 8), le contraste de propriétés mécaniques entre sol et pneus, et le rôle de la plasticité, rendent délicate une approche strictement théorique. C'est pourquoi, nous avons développé une approche simplifiée qui s'appuie sur les principes de l'homogénéisation.

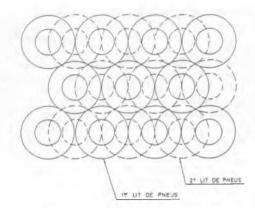


Figure 8. Répartition des pneus en quinconce

## 6.1 Du massif au modèle unidirectionnel

On s'est limité à l'étude du comportement en compression perpendiculairement aux nappes de pneus.

Pour l'analyse du fonctionnement mécanique de ce type de massif, il est déterminant de remarquer que la géométrie des pneus et leur disposition en quinconce, impose à toute ligne verticale de traverser alternativement les deux matériaux. Compte tenu de cette observation, il est possible, dans un but de simplification, de remplacer les pneus par des tores carrés de même surface S, sans dénaturer le comportement du massif. La Figure 9 permet de visualiser la structure élémentaire simplifiée. Pour des raisons de symétrie, on se restreint à l'étude d'un quart de structure que l'on décompose en quatre colonnes (Figure 10) de surface S<sub>o</sub> = S/12.

En compression, du fait de la périodicité verticale, le déplacement en tête de chaque colonne est identique, mais compte tenu de l'écart de module entre sol et pneus, les colonnes de sol se translatent les unes par rapport aux autres, ce qui se traduit par du cisaillement sur les faces latérales de chaque colonne.

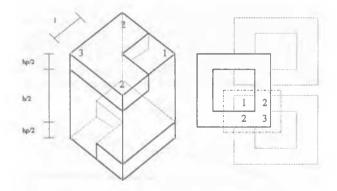


Figure 9. Structure élémentaire simplifiée.

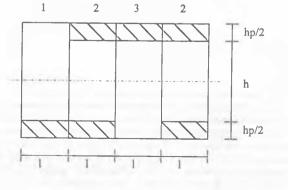


Figure 10. Géométrie "dépliée".

Cette analyse du fonctionnement de l'assemblage peut se résumer sous la forme du modèle rhéologique décrit en Figure 11 où les colonnes et leurs interaction sont représentées. Les constantes du modèle sont évaluées à partir des paramètres géométriques et mécaniques des constituants en supposant les pneus élastiques de rigidité ( $k_p$ ), le sol élastique en compression oedométrique (module E), et en cisaillement, élastique parfaitement plastique ( $\mu$ , module de cisaillement, s, contrainte de rupture). Par exemple l'effort de cisaillement entre deux colonnes se traduit par un modèle patin-ressort de seuil s.Sf, et de rigidité  $\mu$  Sf/I (Sf étant la surface latérale de la colonne de sol et I le demi rayon).

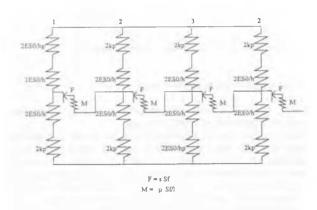


Figure 11 Modèle de comportement et paramètres

# 6.2 Type de comportement et paramètres

Le modèle conduit à un comportement de type élastoplastique ductile dépendant de quatre paramètres sans dimension :

- 1. Le rapport h/hp entre épaisseur h de la couche de sol et épaisseur hp des pneus ;
  - 2. Le contraste de module entre sol et pneu :  $R = E.S/h_p.k_p$ ;
  - 3. La limite élastique du sol en cisaillement :  $\varepsilon_p = s/\mu$ ;
  - 4. Le coefficient de Poisson du sol.

On donne en Figure 12 la courbe d'évolution du rapport entre les modules du massif ( $E_{\rm pec}$  dans le domaine élastique) et du sol, en fonction du rapport d'épaisseur h/hp, pour des pneus de poids lourds et de véhicules légers. Ce résultat met en évidence l'augmentation de la compressibilité apportée par les couches de pneus et la possibilité d'adaptation en jouant sur les rapports d'épaisseurs.

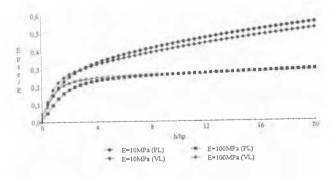


Figure 12. Comportement du Pneusol.

Les ordres de grandeurs de ces valeurs sont cohérents avec ceux déjà obtenus lors de la construction de ce type de massif.

Ce modèle très sommaire, établi à partir des considérations cinématiques données plus haut, a simplement été vérifié par une étude en photoélasticité. Il apparaît clairement que dans une plaque percée de trous en quinconce (simulant les pneus très compressibles) soumise à une compression uniforme, il se développe effectivement des zones de cisaillement sur les faces latérales des colonnes.

#### 6.3 Intérêt et limites du modèle

Malgré des hypothèses simplificatrices fortes, cette approche permet de mettre en évidence deux propriétés mécaniques intéressantes de ce matériau

- 1. Sa forte compressibilité, celle-ci pouvant être ajustée selon la hauteur des couches de sol :
- 2. Son fort potentiel de ductilité résultant du fait qu'un effort de compression amène le sol à travailler en cisaillement.

Ces deux caractéristiques augurent en particulier d'un très bon comportement en tant qu'isolateur de vibrations.

Notons que cette approche n'est correcte que pour une disposition en quinconce. Si les pneus étaient agencés suivant des verticales, le massif serait constitué de colonnes de sol et de pneus et se comporterait de manière totalement différente.

Rappelons aussi que ce modèle n'est valide que pour un chargement uniforme s'étendant sur une surface importante Le cas d'autres types de chargement doit faire l'objet d'études complémentaires sur le fonctionnement en cisaillement et l'anisotropie du Pneusol, études qui permettront de mieux cerner les aspects tridimensionnels du comportement.

Ces remarques sont confortées par des analyses photoélastiques montrant par exemple que l'organisation du champ de contraintes est totalement différente sous une compression dans le sens perpendiculaire, ou sous un chargement ponctuel.

# CONCLUSION

Les résultats présentés ont montré que :

- 1. L'analyse expérimentale du comportement d'un massif pulvérulent chargé en surface par une fondation, peut être effectuée avec fiabilité en laboratoire en utilisant des capteurs à mode d'action indirect;
- 2. L'influence du bicouche sol-Pneusol est nettement mis en évidence; le Pneusol placé sous une semelle de fondation joue un rôle de répartiteur de contraintes vers l'extérieur;
- 3. L'approche théorique du comportement du Pneusol a mis en évidence sa forte compressibilité et sa ductilité qui peuvent permettre d'élargir le champ d'utilisation du matériau Pneusol;
- 4. Le modèle analogique présenté ici pourra être amélioré, et son champ d'utilisation étendu à l'étude du fonctionnement du Pneusol en cisaillement.

# REFERENCES

Amrani, K. 1993. Pression totale au sein d'un sable : étude de la réponse d'un capteur à contre pression. Thèse de Doctorat de l'INSA de Lyon, 159 p.

Berriche, Y. 1988. Mesure des pressions dans des sols pulvérulents chargés en surface. Thèse de Doctorat de l'INSA de Lyon, 225p.

Boulebnane, A. 1996. Contraintes totales dans les sols: Etude sur modèles en macrogravité et en semi-grandeur. Thèse de Doctorat de l'INSA de Lyon, 292 p.

Boutin, C., Jouve, P., Lareal, P., & N.T. Long 1992. Essais d'homogénéisation du Pneusol. *GRECO-Géomatériaux*, 311-317.

Flavigny, E., Desrues, J., et Player, B. 1990. Note technique: Le sable d'Hostun RF. Revue Française de Géotechnique, N°53, 67-70.

Guezouli, A. 1985. Mesure des pressions au contact solfondation; utilisation du capteur pneumatique Glötzl. Thèse de Doctorat de l'INSA de Lyon, 220 p.

Ibrahim, H. Z. 1983. Mesure des pressions au contact solfondation; influence des phases de construction. Thèse de Doctorat de l'INSA de Lyon, 318 p.

Laréal, P., Long, N.T., Ursat, P., et Vézole, P. 1995. Le pneusol: Dix ans d'expériences d'ouvrages de génie civil. 11 ème Congrès Européen de Mécanique des Sols et Fondations. Copenhague Balkema, 6 p.

Long, N.T. 1985. Le Pneusol.. Rapport des LCPC. Gt. -7, 36 p. Long N.T. 1993. Le Pneusol: recherches - réalisations perspectives. Thèse de Doctorat de l'INSA de Lyon, 347 p.