

Colloque franco-polonaise
Paris Sept 93

APPROCHE THEORIQUE ET EXPERIMENTALE DU PNEUSOL LEGER

C. BOUTIN

Laboratoire Géomatériaux, E.N.T.P.E Lyon.

A. BOULEBNANE, P. LAREAL

Laboratoire Géotechnique, I.N.S.A de Lyon.

N.T. LONG

Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, Paris.

RESUME : Le pneusol nouveau matériau de génie civil, présente des avantages mécaniques très intéressants (légèreté, ductilité, compressibilité).

On propose ici une étude préliminaire théorique et expérimentale afin d'approcher le comportement de ce nouveau type de matériau de remblai, et pour mettre en évidence le rôle de répartiteur de pression que jouent les massifs de pneusol.

I- INTRODUCTION

Le pneusol léger inventé par N.T. Long, est un nouveau matériau du génie civil qui est constitué de couches de pneus entiers en alternance avec des couches de sol. Outre le fait d'utiliser des pneus usagés, les massifs en pneusol sont intéressants par leur propriétés mécaniques. On notera en particulier la légèreté, la cohésion apportée par la présence des pneus, et l'adaptabilité de leur comportement selon le mode de construction.

Plusieurs ouvrages ont été déjà réalisés avec cette technique, notamment comme massif réducteur de poussé derrière un mur de soutènement [1].

Dans ce travail, on présente en première partie une étude sommaire du fonctionnement en compression, qui permet de dégager un modèle simplifié de comportement théorique. La deuxième partie sera consacrée à une approche expérimentale sur modèle réduit. Dans la troisième et dernière partie, on compare les résultats expérimentaux, d'une part avec la modélisation théorique, et d'autre part avec la simulation numérique.

II- MODELE UNIDIRECTIONNEL

II-1-HYPOTHESE

Nous nous sommes limités à l'étude du comportement dans l'axe perpendiculaire aux nappes de pneus. Pour simplifier la géométrie de la cellule, on a remplacé les pneus par des tores de section carrée de même surface S . La figure 1 permet de visualiser la période du pneusol. Pour des raisons de symétrie, on se restreint à l'étude d'un quart de période que l'on décompose en quatre colonnes.

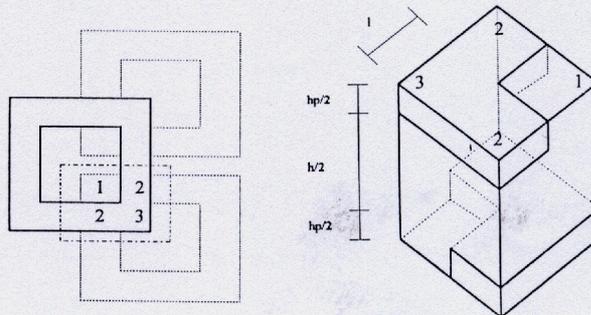


Figure 1 : Période de pneusol.

II-2- FONCTIONNEMENT MECANIQUE

En compression mécanique, 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.

II-3- MODELE ANALOGIQUE

Cette analyse de fonctionnement de l'assemblage peut se résumer sous la forme du modèle rhéologique décrit en figure 2, où les colonnes et leurs interactions sont représentées. Les constantes du modèle sont évaluées à partir des paramètres géométriques et mécaniques des constituants en supposant les pneus élastiques (k_p), le sol élastique en compression oedométrique (E), et élastique (μ) parfaitement plastique (τ) en cisaillement. Par exemple l'effort de cisaillement entre deux colonnes se traduit par un modèle patin ressort de seuil $\tau \cdot S_f$, et rigidité $\mu \cdot S_f / l$ (S_f étant la surface latérale de la colonne de sol, et l le demi rayon).

II-4- APPLICATION

Ce modèle analogique conduit à un comportement de type élastoplastique, dépendant de quatre paramètres adimensionnels :

- le rapport h/h_p entre épaisseur h de la couche de sol, et épaisseur h_p des pneus;
- le contraste de module entre sol et pneu : $R = E \cdot S / h_p \cdot k_p$;
- la limite élastique du sol en cisaillement : $\epsilon = \tau / \mu$;
- le coefficient de Poisson du sol ν .

On donne un exemple de calcul en figure 3 où est tracé le module du massif (E_{pse}) par rapport au module du sol (E). La courbe montre l'évolution en fonction du rapport d'épaisseur h/h_p , pour des pneus poids lourds (PL) et véhicules légers (VL), et deux types de sol ($E = 10$ MPa, 100 MPa). Les valeurs obtenues semblent cohérentes avec celles déjà mesurées lors de la construction de ce type de massif.

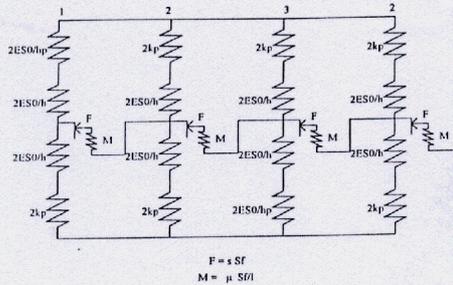


Figure 2 : Modèle rhéologique.

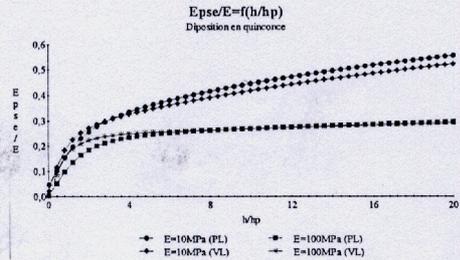


Figure 3 : Evolution du module du massif par rapport à celui du sol.

III- ETUDE EXPERIMENTALE

III-1- DISPOSITIF ET MATERIAUX UTILISES

L'objet de l'expérimentation est d'étudier qualitativement l'influence de la présence d'un massif de pneusol, mis en place sous une fondation superficielle. On s'intéresse à la distribution des pressions dans le massif, et plus spécialement sous l'emprise de la fondation.

L'étude est menée sur un modèle semi-grandeur, constitué d'un massif de sable placé dans une cuve métallique de 1.5m de diamètre et 0.6m de profondeur (figure 4), chargé par une plaque en duralumin de 350mm de diamètre et 35mm d'épaisseur. La charge verticale et centrée est communiquée par un vérin activé par une centrale hydraulique. Les tassements de la fondation sont contrôlés par des comparateurs au 1/100^e de mm.

Les "pneus" utilisés [1] (figure 5), sont en mousse de polyuréthane. Ce sont des couronnes de 12mm d'épaisseur, et de respectivement 30 et 60 mm de diamètre intérieur et extérieur (échelle 1/20^e par rapport à un pneu de poids lourd). Les couches de pneu sont disposées en double quinconce avec un décalage d'un demi diamètre.

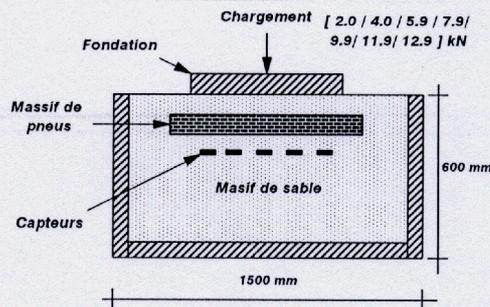


Figure 4 : Dispositif expérimental.

Le sol utilisé est le sable d'Hostun de référence RF [2]. Ce sable siliceux, dont les caractéristiques sont regroupées sur le tableau I, est mis en place avec un poids volumique voisin de 15.5 kN/m^3 .

γ_{max} (kN/m^3)	γ_{min} (kN/m^3)	γ_s (kN/m^3)	e min	e max
15.99	13.24	25.97	0.624	0.961

Tableau I : Caractéristiques du sable d'essai [COLLIAT 1986].

Les pressions sont mesurées avec des capteurs électriques Kyowa type BE-C [3], de 30mm de diamètre et 9mm d'épaisseur. Ces capteurs sont placés suivant un axe parallèle au diamètre de la fondation.

Notre étude préliminaire portera sur l'influence de deux paramètres : l'épaisseur du massif de pneusol (trois couches et cinq couches), et la diffusion de la charge (position des capteurs dans le massif de sable à 80mm et 110mm de profondeur).

III-2- RESULTATS EXPERIMENTAUX

III-2-1- COURBES EFFORT-DEFORMATION

La mesure du tassement de la fondation permet de tracer les courbes effort-déformation du massif.

On présente sur la figure 6 la courbe de référence obtenue avec le massif de sable seul, et celle obtenue avec le massif de pneusol (nombre de couche = 5), pour vingt cycles de chargement-déchargement, dont on ne représente ici que les premier, second, huitième, et vingtième cycles.

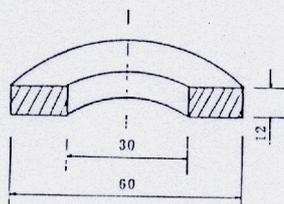


Figure 5 : Pneus utilisés forme et dimensions.

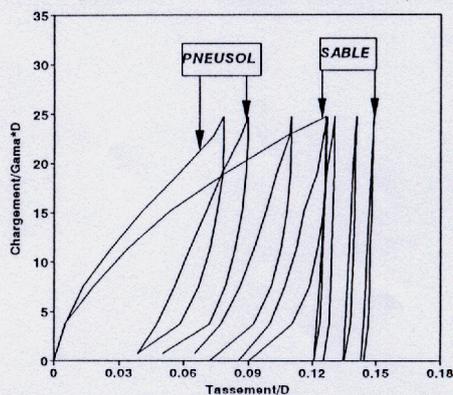


Figure 6 : Courbes effort-déformation.

Dans les deux cas, lors du premier chargement, le tassement est important, bien que plus faible lorsqu'il y a présence du massif de pneusol. Par contre lors des cycles de chargement-déchargement suivants, le massif de sable se rigidifie rapidement, alors que le massif contenant du pneusol garde une compressibilité et une hystérésis importantes dues à la présence des pneus. Ainsi, le module équivalent (initial) pour un incrément de charge de 4 kN, varie peu (de 1.26 à 2.4 MPa) au cours de chargements successifs car il y a du pneusol, alors qu'il varie de manière plus importante (de 1.68 à 14.2 MPa) dans le cas du massif de sable seul.

III-2-2- REPARTITION DES PRESSIONS SOUS L'EMPRISE DE LA FONDATION

Quand la fondation repose sur un massif de pneusol (figure 5), elle est placée à 20mm au dessus de ce dernier. Suivant que ce massif comporte trois ou cinq couches de pneus, les capteurs sont placés à 20mm sous la base inférieure, soit à 80 ou 110 mm de profondeur. Dans les massifs de sable seul de référence, les capteurs sont placés à ces mêmes profondeurs.

Les courbes histogrammes des figures 7 et 8 permettent d'illustrer la répétabilité des mesures de pression pour une charge donnée. On constate que pour quatre essais de référence (figure 4), la dispersion des résultats est comprise entre -10 et +17 %. Cette dispersion comprise entre -10 et +14 % quand il y a présence du pneusol (figure 5), peut être considérée comme très acceptable.

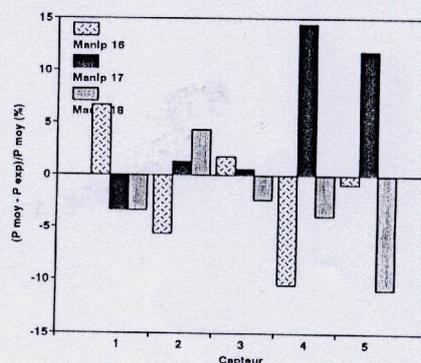
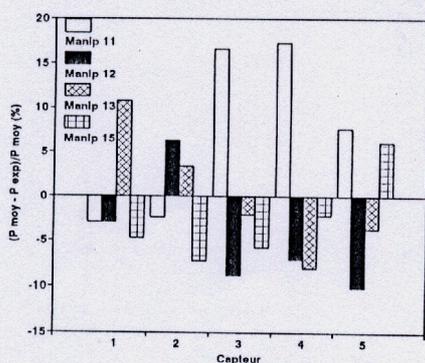


Figure 7 : Répétabilité (sable seul). Figure 8 : Répétabilité (pneusol).

Les figures 9 et 10 représentent la répartition des pressions totales pour trois incréments de contraintes appliqués (20.5, 82, 123 kPa), avec sable seul et avec pneusol, pour trois couches (figure 10), et pour cinq couches (figure 11).

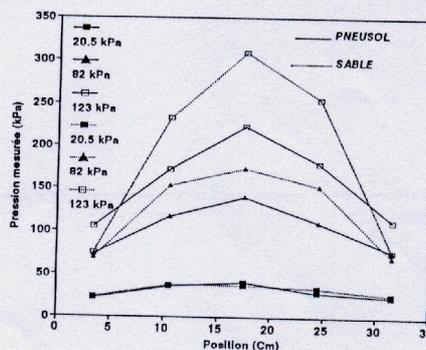
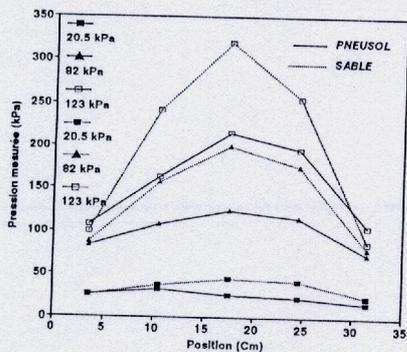


Figure 9 : Répartition des pressions (3 couches). Figure 10 : Répartition des pressions (5 couches).

Pour de faibles incréments de contraintes (20.5 kPa), les répartitions sont très légèrement convexes, et leur comparaison ne permet pas de

mettre en évidence une nette influence de la présence du massif de pneusol.

Avec l'augmentation de la pression appliquée en surface (82 kPa), les courbes deviennent nettement convexes. Cependant la présence du pneusol réduit les contraintes sous la partie centrale de la fondation et provoque leur dissipation vers l'extérieur de l'emprise.

Ce phénomène est accentué pour les forts incréments de charge (123 kPa). Il est encore plus net pour le massif de cinq couches.

Une étude statistique a montré que la réduction moyenne des pressions sous la partie centrale de la fondation, due à la présence du pneusol, est de l'ordre de 30% pour trois couches de pneus et 25% pour cinq couches.

Ainsi le massif de pneusol placé sous la fondation, joue un rôle de répartiteur de pression.

VI- DISCUSSION DES RESULTATS

VI-1- COMPARAISON EXPERIENCE-MODELE RHEOLOGIQUE

Dans l'état actuel des essais, il est difficile de confronter les résultats de la modélisation et de l'expérimentation. En effet, le modèle simplifié de comportement développé en première partie n'est valable que si le massif est soumis à une compression homogène. Ceci ne correspond pas précisément aux conditions d'essai dans l'expérience présentée, puisque l'état de contraintes sous la fondation d'une part n'est pas homogène, d'autre part comporte des contraintes de cisaillement (notamment au droit des bords de la plaque).

Cependant une comparaison purement qualitative des courbes effort-déplacement dans le cas du massif de sable seul, et du massif incluant des pneus (figure 6), montre clairement que la présence du massif de pneusol modifie notablement le fonctionnement mécanique de la fondation. On observe en particulier, après le premier cycle de mise en place, une forte diminution de la rigidité de la structure et un accroissement de la surface d'hystérésis. D'un point de vue qualitatif, ces deux phénomènes sont tout à fait cohérents avec la modélisation que nous proposons.

VI-2- COMPARAISON EXPERIENCE-MODELISATION NUMERIQUE

Pour mieux comprendre la répartition des contraintes sous la fondation et l'influence des couches de pneus, on a effectué une simulation par éléments finis de l'expérience en utilisant le code CESAR.

VI-2-1- HYPOTHESES DE CALCUL

Ce calcul a été réalisé en tenant compte de la symétrie de révolution, et de la géométrie, ainsi que les conditions aux limites introduites, correspondant exactement aux conditions expérimentales.

En ce qui concerne les paramètres mécaniques, on n'a traité le problème que dans le domaine élastique en utilisant le module élastique mesuré des pneus à échelle réduite ($E = 0.1 \text{MPa}$), et le module tangent du sable après quelques cycles ($E = 30 \text{MPa}$).

Vu la simplicité de la loi de comportement introduite pour le sable, cette analyse demeure purement qualitative.

VI-2-2- RESULTATS DE LA SIMULATION

Sur les figures 11 et 12 sont tracées les isovaleurs de la contrainte σ_z dans le massif de sable seul, et dans le massif comportant des pneus. On observe nettement que la distribution des contraintes dans ce dernier est différente de celle aperçue dans un massif élastique homogène. La couche compressible de pneus a tendance à étaler les bulbes de contraintes.

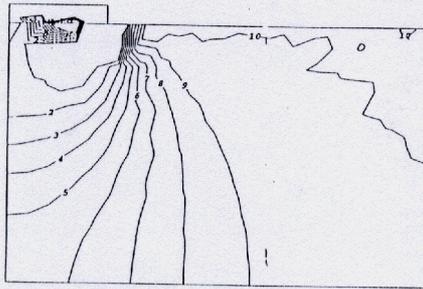


Figure 11 : Isovaleurs de σ_z
(sable seul)

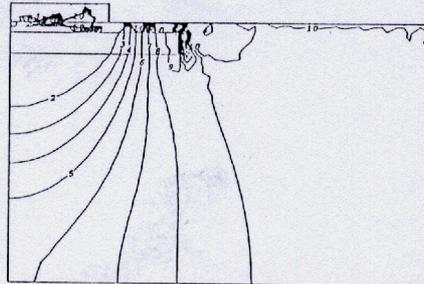


Figure 12 : Isovaleurs de σ_z
(sable+pneus)

Sur la figure 13 est représentée la répartition des contraintes σ_z à la profondeur correspondant à celle des capteurs dans le modèle expérimental. On note une atténuation de la contrainte au droit de la fondation et une répartition plus complexe qu'en massif homogène. Par ailleurs les ordres de grandeur des contraintes calculées sont en accord avec les contraintes mesurées.

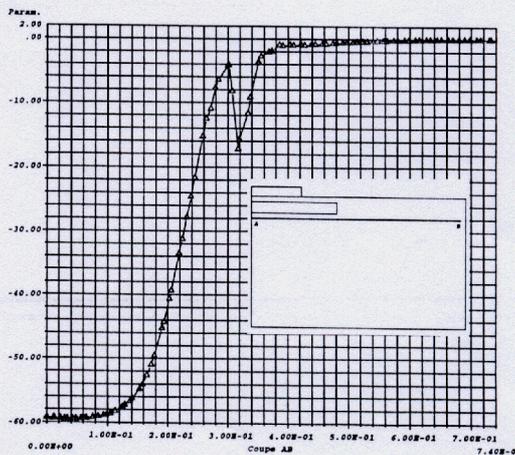


Figure 13 : Répartition des contraintes sous la fondation.

En définitive, cette simulation élastique est assez concordante avec l'expérience, si l'on s'intéresse uniquement au fonctionnement après le premier cycle de mise en place.

V- CONCLUSION

L'analyse du fonctionnement mécanique d'une cellule de pneusol nous a permis de développer un modèle simple de comportement traduisant la forte compressibilité du pneusol et l'effet de cisaillement local lorsque le massif travaille en compression.

L'étude expérimentale dont la fiabilité est assurée par la bonne répétabilité des mesures, met en évidence le rôle de répartiteur de pression joué par un massif de pneusol.

La théorie et la modélisation numérique sont d'un point de vue qualitatif très cohérent avec l'expérience. Mais il reste à les compléter, en particulier en améliorant les modèles de comportement pour pouvoir les utiliser quantitativement.

Nous comptons continuer notre étude dans cette voie, tout en examinant l'influence de la solidarisation des pneus.

L'ensemble de ces travaux devrait conduire à terme à une base d'information suffisante, pour permettre une utilisation plus vaste de ce matériau en génie civil et notamment en génie parasismique.

REMERCIEMENTS : Nous tenons à remercier M^r Christophe DUPAS Ingénieur ENTPE, MM Jérôme FILLON et Vincent RAMET Ingénieurs INSA pour leur contribution à la réalisation de cette étude.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

[1] P. LAREAL, N.T. LONG (1987) - "Le pneusol, réducteur de poussée." - 4^e Colloque Franco-Polonais de mécanique des sols. Vol. 1. Grenoble 14-18 Septembre, pages 519-530.

[2] FLAVIGNY E., DESRUES J., et PALAYER B. (1990). - "Note technique : le sable d'Hostun RF." - Revue Française de géotechnique- N°53, pages 67-70.

[3] BOULEBNANE A., LAREAL P., GARNIER J., FARGEIX D. - " Mesure des pressions totales dans les sols sous divers champs de contraintes." - Coll. René HOUPERT. Structure et comportement mécanique des géomatériaux. Nancy, pages 577-585.