
Influence de la succion sur le comportement de matériaux granulaires routiers

Jean-Marie Fleureau* — Siba Kheirbek-Saoud** — Octavio Coronado***

* *Laboratoire de Mécanique des sols, structures & matériaux, Ecole Centrale Paris & CNRS, Grande voie des vignes, 92295 Châtenay-Malabry, France, jean-marie.fleureau@ecp.fr*

** *Faculté de Génie Civil, Université Tichrine, Lattaquié, Syrie, sibasaoud@free.fr*

*** *Departamento de Geotecnia, Universidad Nacional, Santiago de Bogota, Colombie, ocoronado@unal.edu.co*

RÉSUMÉ. Ce travail présente les résultats d'un ensemble d'essais sur deux matériaux granulaires routiers, comprenant des essais triaxiaux de précision en petites déformations sous chargement cyclique et des mesures de pression interstitielle négative (succion). Les deux matériaux diffèrent par leur pourcentage de fines (7 % pour MHC et 10% pour HFC). Les échantillons ont été compactés à différentes teneurs en eau et à une densité sèche correspondant à 97% de la densité maximale Proctor Modifié. L'interprétation des résultats dans le domaine quasi-élastique repose sur une analyse en contraintes effectives qui permet de prendre en compte à la fois les variations des contraintes totales et de la pression négative, dans la perspective d'un dimensionnement plus rationnel des couches de chaussée.

ABSTRACT. The results of an experimental work on two road granular materials are presented, including small strains precision triaxial tests under cyclic loading, large strains triaxial tests with measurement of the negative pore water pressure (suction) and wetting tests. The influence of different initial conditions of density, water content and fines content was studied. The two materials differ by their fine contents (7 % for MHC and 10% for HFC). The specimens are compacted at different water content and at a density corresponding to 97% of the Modified Proctor maximum density. The interpretation of the results, in the quasi-elastic domain, is based on an effective stress analysis that allows to take into account both the effects of total stresses and negative pressure, in the perspective of a more rational design of pavement layers.

MOTS-CLÉS: Petites déformations, module, succion, fines

KEYWORDS: Small strains, modulus, suction, fine content

1. Introduction

Dans la pratique, pour dimensionner les structures de chaussée, différents guides de dimensionnement proposent une méthode rationnelle utilisant pour les propriétés des matériaux le module d'Young (E) et le coefficient de Poisson. Ces paramètres sont généralement déterminés en termes de contraintes totales, même si les matériaux granulaires utilisés dans la construction sont à l'état non saturé. Au laboratoire, les pressions interstitielles négatives, ou succions ($u_c = u_a - u_w$), ne sont pas faciles à mesurer dans ce type de matériaux et leur obtention nécessite d'utiliser des essais plus élaborés. Le but de cette communication est de présenter des mesures de pressions négatives et de montrer comment les prendre en compte dans l'analyse du dimensionnement d'une structure de chaussée en termes de contraintes effectives.

Plusieurs auteurs ont étudié l'effet de la pression interstitielle négative sur le comportement en petites déformations de sols partiellement saturés (Brull 1980, Wu et al. 1989, Kheirbek-Saoud 1994, Picornell et Nazarian 1998, Balay et al. 1998). Dans la majorité des cas, l'analyse des résultats est faite en contraintes totales, en considérant séparément le rôle du tenseur contrainte et celui de la pression interstitielle négative de l'eau (succion). En outre, presque toutes les études portent sur des sols fins.

D'autres auteurs (Wu et al. 1989, Biarez et al. 1991, Fleureau et al. 2003) ont montré qu'une approche en contraintes effectives pouvait être utilisée pour prendre en compte l'effet de la pression capillaire dans l'interprétation des données dans le domaine des très petites déformations. Récemment, Coussy & Dangla (2002), en partant de considérations thermodynamiques, ont confirmé la validité de l'approche en contraintes effectives d'un point de vue théorique dans la mesure où le comportement du sol non saturé pouvait être considéré comme élastique.

Dans ce travail, des essais triaxiaux en petites déformations ont été réalisés avec mesure de la pression interstitielle négative sur une grave non traitée (GNT) de référence en France. Les matériaux étudiés ont été recomposés avec deux pourcentages de fines (10% et 7%), et compactés en laboratoire à différents teneurs en eau et à une densité de 97% de la densité maximale Proctor Modifié correspondante. Des essais d'humidification ont par ailleurs été réalisés pour déterminer l'évolution du matériau soumis à des variations des conditions hydriques.

L'étude permet de mettre en évidence l'influence de la granulométrie et de la teneur en eau de compactage sur les variations de la pression interstitielle négative et du module réversible. Les résultats montrent l'importance de prendre en compte ces aspects dans la construction et le dimensionnement des chaussées.

2. Caractéristiques du matériau

Le matériau utilisé dans cette étude est défini comme une Grave Non Traitée (GNT) formée de gneiss de la carrière des « Maraîchères » en France. Ce matériau a fait précédemment l'objet de programmes d'essais au Laboratoire Régional des Ponts et Chaussées (LRPC) de Saint Briec. Il est composé d'un mélange de cinq matériaux différents : sable 0/4 mm, gravillon 2/6,3 mm, gravillon 4/10 mm, gravillon 10/20 mm et gravillon 14/20 mm. Les granulométries de référence utilisées dans cette étude contiennent respectivement 7% de fines ($< 80 \mu\text{m}$) pour MGC et 10 % pour HFC. La Figure 1 montre les courbes granulométriques des mélanges, déterminées conformément à la norme AFNOR NFP 98-129.

Le compactage à l'énergie Proctor Modifiée a été réalisé selon la procédure de la norme AFNOR NF P94-093. L'optimum correspond à une teneur en eau de 5,8% pour MGC et 5,5% pour HFC, une masse volumique sèche de $2,20 \text{ Mg/m}^3$ pour MGC et $2,22 \text{ Mg/m}^3$ pour HFC et un degré de saturation de 70%. La valeur de l'indice d'abrasion Los Angeles est d'environ 20%.

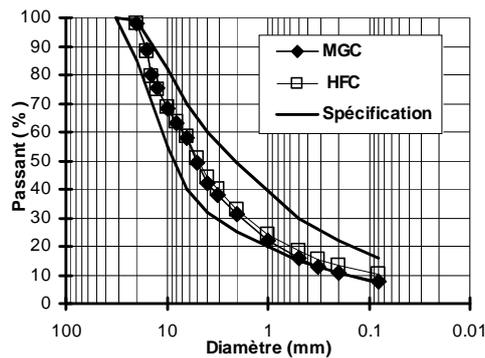


Figure 1. Courbes granulométriques des mélanges

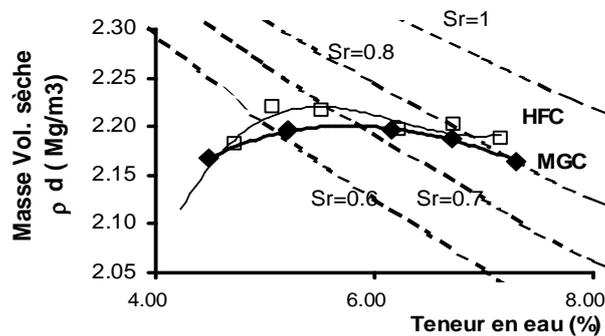


Figure 2. Courbes Proctor Modifié des mélanges

3. Dispositif expérimental et protocole d'essai

3.1. Appareil triaxial à chargements répétés

Les essais cycliques sont réalisés dans une cellule triaxiale classique permettant une mesure directe du module de rigidité et du coefficient de Poisson pour des déformations homogènes comprises entre 10^{-6} et 10^{-2} . Pour pouvoir explorer le domaine des très petites déformations avec beaucoup de précision, les mesures de force et de déformation sont effectuées sur l'échantillon lui-même. Le capteur de force est placé directement sur la tête de l'échantillon, ce qui permet une mesure précise de la force appliquée sur celle-ci et d'éliminer le problème du frottement palier-piston. La mesure des déformations axiales est réalisée au moyen de trois capteurs de déformation de type LDT placés dans la zone centrale de l'échantillon, afin d'éviter l'influence du freinage des embases sur les mesures. Les déformations radiales sont déduites des variations du périmètre de l'échantillon mesurées par une ceinture déformable placée à mi-hauteur et équipée d'un capteur LDT.

Les capteurs LDT, constitués de 4 jauges de déformation, formant un pont de Wheatstone complet collées sur une lame flexible en bronze au béryllium, ont été fabriqués à l'Ecole Centrale Paris sur le modèle des capteurs développés à l'Université de Tokyo dans l'équipe du Professeur Tatsuoka (Goto et al. 1991). Des points de fixation sont mis en place dans l'échantillon pendant le compactage, sur lesquels viennent se positionner les supports des capteurs. La précision de la mesure de déformation est voisine de 10^{-6} avec un convertisseur Agilent A/D 21 bits. La Figure 3 montre l'échantillon mis en place dans la cellule triaxiale, ainsi que la disposition des capteurs de mesure des déformations axiales et radiales.

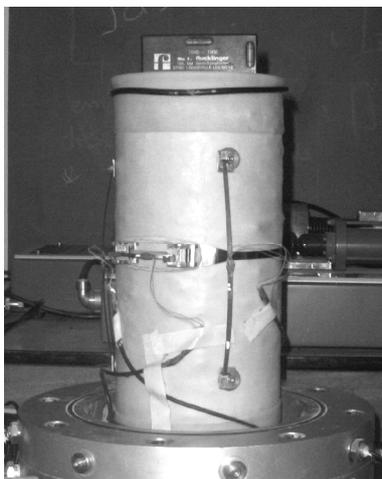


Figure 3. Echantillon pour essai triaxial avec capteurs de déformation LDT

3.2. Plaques tensiométriques

Pour imposer des pressions interstitielles négatives comprises entre 0 et 30 kPa, on utilise des plaques tensiométriques constituées d'un filtre de verre fritté de faible porosité, qui joue le rôle de séparation semi-perméable, serti dans un entonnoir de verre. L'échantillon est placé sur le filtre, à la pression atmosphérique, en contact avec un réservoir rempli d'eau désaérée. En imposant une dénivellation entre le filtre et le tube de mesure, on peut contrôler la dépression de l'eau placée dans le réservoir, et donc la pression interstitielle négative de l'échantillon

3.3. Préparation des échantillons et procédures d'essai

3.3.1. Essai triaxial à chargements répétés

L'eau est ajoutée au mélange sec de façon homogène. Le compactage par chocs de l'éprouvette, de 150 mm de diamètre et 300 mm de hauteur, a été réalisé manuellement au moyen de la dame Proctor Modifié, en 12 couches avec 56 coups de dame par couche. Les caractéristiques initiales des échantillons sont indiquées dans le Tableau 1. Lors de la fabrication de l'échantillon, une attention particulière est portée à la mise en place des six supports de fixation des capteurs verticaux. Ensuite, les capteurs de déformation axiale et radiale sont mis en place, ainsi que le capteur de force. Les essais pour l'étude du comportement réversible sont réalisés en deux étapes. Dans la première, on applique à l'éprouvette un conditionnement afin de simuler les conditions réelles de mise en place, consistant en 20 000 cycles de chargement sous une contrainte isotrope de 40 kPa et une contrainte déviatoire de 280 kPa. Dans la deuxième étape, l'échantillon est soumis à 20 chemins successifs à des niveaux de contrainte de plus en plus élevés (Figure 4). Tous les essais sont faits à contrainte de confinement σ_3 constante. Chaque chargement est appliqué pendant 100 cycles. Les déformations réversibles de l'éprouvette sont mesurées au cours du 100^{ème} cycle.

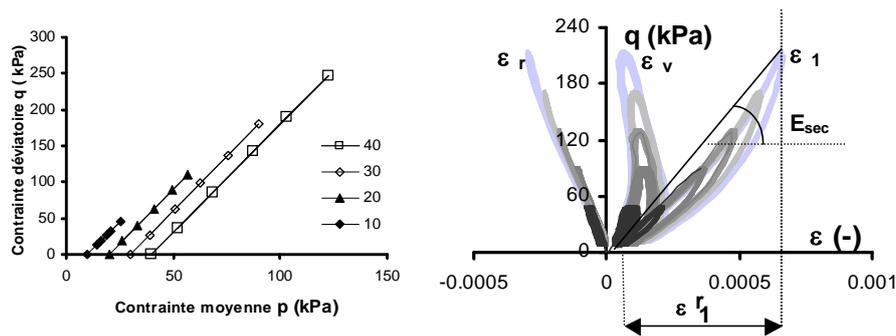


Figure 4. Chemins de chargement suivis pour la détermination du module sécant et exemple de réponse du matériau

		Masse volumique sèche (Mg/m ³)	Teneur en eau (%)
Essai 2		2.123	2.05
Essai 3	MGC	2.132	3.86
Essai 4		2.167	5.12
Essai 5		2.132	2.00
Essai 8	HFC	2.150	3.50

Tableau 1. Conditions initiales des échantillons

Le module sécant est défini de la façon suivante (Figure 4) :

$$E_{\text{sec}} = q / \varepsilon_1' \quad [1]$$

3.3.2. Essai d'humidification sur la plaque tensiométrique

A la fin de l'essai triaxial à chargements répétés, l'échantillon est découpé en morceaux, qui sont mis en place sur la plaque tensiométrique en essayant d'assurer le meilleur contact possible entre le matériau et le support. Les échanges d'eau entre l'échantillon et le réservoir sont déduits du déplacement du ménisque d'eau dans le tube de mesure horizontal. Une fois l'équilibre atteint, généralement au bout de 5 jours, le volume total de l'échantillon est mesuré par immersion dans du kerdane, ainsi que sa teneur en eau ; on en déduit l'indice des vides et le degré de saturation du matériau.

4. Résultats obtenus

4.1. Essai d'humidification sur la plaque tensiométrique

La Figure 5 montre les résultats de l'essai d'humidification. La courbe de pression interstitielle négative en fonction de la teneur en eau et du degré de saturation présente l'allure habituelle. L'étalement de la granulométrie des matériaux se traduit par une légère pente de la courbe après le point d'entrée d'air. Ce point, qui correspond à la pression négative pour laquelle se produit la diminution rapide du degré de saturation et de la teneur en eau, peut être situé entre 1 et 5 kPa pour les deux matériaux. On peut noter la bonne concordance entre les valeurs de succion trouvées dans les essais triaxiaux avec mesure de pression interstitielle négative (à $\sigma_3 = 0$), qui ont été effectués sur certains échantillons, et les essais d'humidification présentés ici.

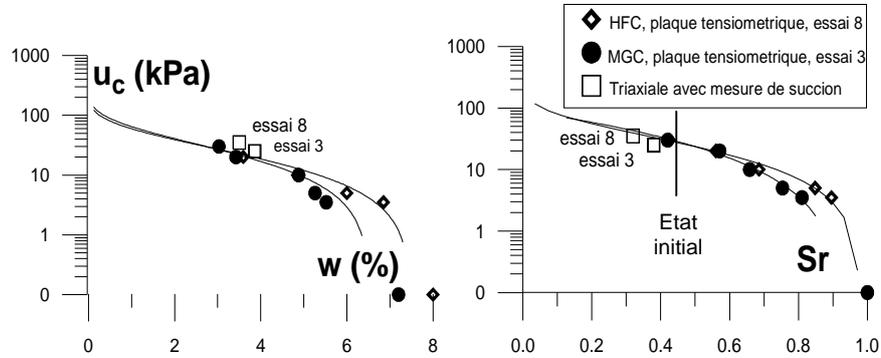


Figure 5. Variation de la pression interstitielle négative en fonction de la teneur en eau et du degré de saturation

4.2. Influence de la teneur en eau sur le module sécant

La Figure 6 présente la variation du module sécant du matériau MGC en fonction de la contrainte verticale, pour différentes valeurs de teneur en eau. On note la sensibilité du matériau à ce paramètre. Le module décroît si la teneur en eau croît à cause des liaisons de type capillaire qui se forment entre les grains.

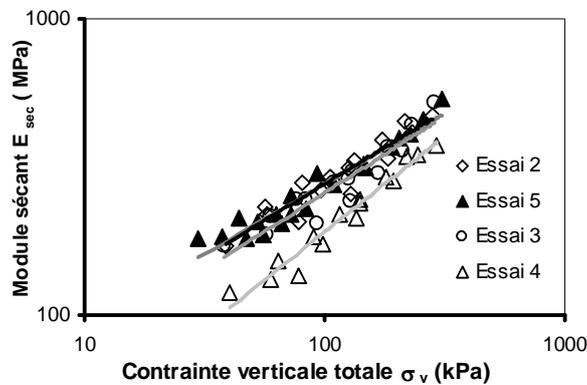


Figure 6. Influence de la teneur en eau sur le module.

4.3. Influence du pourcentage de fines

La figure 7 montre la variation du module sécant avec σ_v pour les deux pourcentages de fines étudiés. Lorsque le pourcentage croît de 7% à 10%, le module augmente de façon non négligeable.

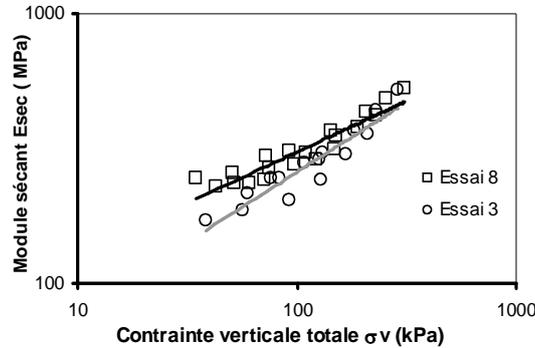


Figure 7. Influence du pourcentage de fines sur le module

5. Interprétation des résultats à différents indices des vides et teneurs en eau en fonction de la contrainte effective

Pour comparer les résultats des essais sur les deux matériaux, réalisés à des indices des vides de 0.30 et 0.21, il est nécessaire de normaliser les modules afin de se ramener au même indice des vides. La relation d'Iwasaki et al. (1978) a été utilisée pour se ramener à un indice des vides de 0.3 :

$$E_{v(e=0.3)} = E_{v(e)} \cdot \frac{f(0.3)}{f(e)}, \text{ avec } f(e) = \frac{(1.93 - e)^2}{(1 + e)} \quad [2]$$

Différentes expressions sont utilisées pour déterminer la contrainte effective dans un milieu non saturé. Dans le cas de pressions interstitielles négatives élevées et de faibles degrés de saturation, l'approche développée à l'Ecole Centrale Paris fait appel à un modèle micromécanique composé d'arrangements réguliers de billes indéformables de même diamètre (Taibi 1994, Fleureau et al. 2003). L'augmentation de pression interstitielle négative liée à la diminution du degré de saturation conduit à une augmentation des forces intergranulaires, ce qui fait croître les modules et la résistance au cisaillement. Cependant, dans un souci de simplification et en dépit des faibles valeurs du degré de saturation ($S_r \approx 0.4$ pour $w = 4\%$), les contraintes effectives ont été calculées en utilisant la relation de Terzaghi :

$$\sigma'_v = \sigma_v - u_w = \sigma_v + u_c \quad [3]$$

Avec les valeurs de pression interstitielle négative mesurées. En effet, les pressions interstitielles négatives sont en général inférieures aux contraintes moyennes appliquées, ce qui fait que l'erreur commise en utilisant cette approche simplifiée, qui surestime légèrement le rôle de la pression, reste acceptable. La Figure 8 repré-

sente les variations du module en fonction de la contrainte effective verticale de Terzaghi pour les différentes contraintes isotropes et pour les deux granulométries.

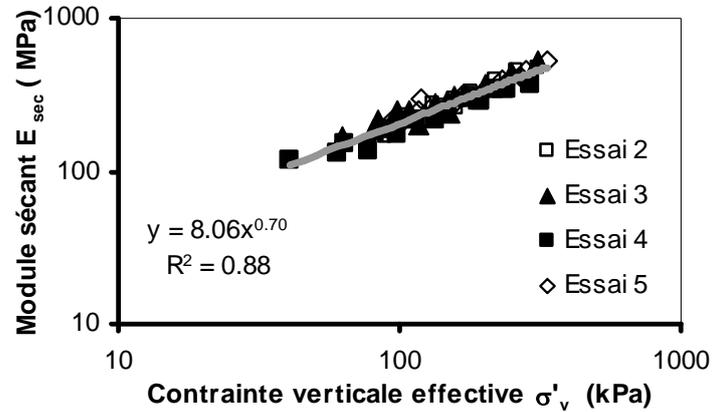


Figure 8. Variation du module en fonction de la contrainte verticale effective déduite de la relation de Terzaghi

6. Conclusions

Les essais triaxiaux de précision réalisés sur deux graves routières ont mis en évidence le comportement non linéaire des matériaux à la fois pour le module sécant et le coefficient de Poisson, l'effet important de la teneur en eau et de la granulométrie. L'interprétation de ces résultats en termes de contrainte effective à partir de mesures de succion ou au moyen d'un modèle empirique a montré la possibilité de prendre en compte simplement l'effet de la teneur en eau sur les paramètres réversibles et le fait que l'influence de la granulométrie se limitait à un changement de succion.

Ces résultats permettent de généraliser les lois de comportement des graves sèches à des conditions plus larges de teneur en eau représentatives des conditions réelles dans les chaussées.

7. Bibliographie

- Balay, J., Gomes Correia, A., Jouve, P., Hornych, P. & Paute, J., « Etude expérimentale et modélisation du comportement mécanique des graves non traitées et des sols support de chaussées ». *Bull. Ponts & Ch.*, vol. 216, 1998, p.3-18.
- Biarez, J., Fleureau, J.M. & Kheirbek-Saoud, S., « Validité de $\sigma' = \sigma - u_w$ dans un sol compacté », *10th E.C.S.M.F.E.*, Firenze, Vol. 1, 1991, p. 15-18.
- Brull A., « Caractéristiques mécaniques des sols de fondation de chaussées en fonction de leur état d'humidité et de compacité », *Coll. Int. Compactage, Presses Ponts & Chaussées*, Paris, Vol. 1, 1980, p. 113-118.
- Coussy, O. & Dangla, P., « Approche énergétique du comportement des sols non saturés », in *Mécanique des sols non saturés*, Hermès, Paris, 2002, p. 137-174.
- Goto, S., Tatsuoka, F., Shibuya, S., Kim Y.-S. & Sato, T., « A simple gauge for local small strain measurements in the laboratory », *Soils and Foundations*, vol. 31, n° 1, 1991, p. 169-180.
- Fleureau, J.-M., Hadiwardoyo, S. & Gomes Correia, A , « Generalised effective stress analysis of strength and small strains behaviour of a silty sand, from dry to saturated state », *Soils and Foundations*, vol. 43, n° 4, 2003, p. 21-33.
- Iwasaki, T., Tatsuoka F. and Takagi Y. « Shear moduli of sands under cyclic torsional shear loading », *Soils and Foundations*, vol. 18, n°1, 1978, p. 39-50.
- Kheirbek-Saoud, S., « Comportement mécanique du ballast et de la couche de fondation d'une voie ferrée », Thèse de doctorat, Ecole Centrale Paris, 1994.
- Picornell, M. & Nazarian, S., « Effects of soil suction on the low-strain shear modulus of soils », *2nd Int. Conf. on Unsat. Soils*, Beijing, vol. 2, 1998, p. 102-107.
- Taibi, S., « Comportement mécanique et hydraulique des sols partiellement saturés », Thèse de doctorat, Ecole Centrale Paris, 1994.
- Wu, S., Gray, D.H. & Richart, F.E., « Capillary effects on dynamic modulus of sands and silts », *Geot. Eng. Div. J., ASCE*, vol. 110, n° 9, 1989, p.1188-1203.

8. Remerciements

Les auteurs remercient l'ambassade de France en Colombie, Colciencias et l'université des Andes pour le financement du séjour de O. Coronado à l'Ecole Centrale Paris.