

# Comportement hydromécanique des matériaux granulaires compactés non-saturés

Xuan Nam HO, Hossein NOWAMOOZ, Cyrille CHAZALLON, Bernard MIGAULT

Laboratoire de Génie de la Conception (LGéCo), INSA de Strasbourg, 24 Boulevard de la Victoire, 67084 Strasbourg Cedex, France. [hossein.nowamooz@insa-strasbourg.fr](mailto:hossein.nowamooz@insa-strasbourg.fr)

## Résumé:

*Ce travail présente l'effet de la non-saturation sur le comportement réversible mécanique des matériaux granulaires de chaussées. On commence par caractériser le comportement hydrique des différents matériaux. A partir des matériaux précédents, on caractérise à la boîte de cisaillement direct (à chargements statiques) le comportement à la rupture et à l'appareil triaxial (à chargements répétés) les comportements réversibles. Ce travail nous permettra finalement d'injecter la succion dans les modèles classiques d'élasticité non linéaire développés pour les sols saturés.*

## Abstract:

*This work presents the effect of unsaturated states on the short-term resilient behavior of granular materials for roads. We present the characteristics of hydraulic behavior of different materials and we characterize the maximum strength with direct shear tests and the resilient behavior with repeated load triaxial tests. This work, allows us to add suction in the nonlinear elastic model for the mechanical behavior of the unsaturated granular soils.*

**Mots clefs:** sols non-saturés, sols granulaires, déviatorique, vibrocompression, triaxial.

## 1. Introduction

Les matériaux granulaires sont souvent utilisés dans la construction des infrastructures routières. La teneur en eau de ces matériaux granulaires a une influence significative sur son comportement mécanique. En conséquence, l'influence de la non saturation sur la réponse mécanique de ces sols granulaires présente un intérêt majeur dans la construction des infrastructures routières possédant des sols partiellement saturés. Cet état non saturé pour les matériaux granulaires de chaussées, globalement défini par la pression interstitielle négative ou la succion, n'a pas été suffisamment étudié dans la littérature.

L'objectif de cet article est d'injecter la succion, dans les modèles classiques d'élasticité non linéaire des sols granulaires saturés, pour différentes sollicitations hydriques lors d'essais triaxiaux à chargements répétés utilisés pour déterminer le comportement résilient du matériau. Les courbes de rétention ont été utilisées pour ajouter la succion dans le modèle élastique non linéaire de Boyce. Deux concepts, l'un basé sur la contrainte totale et l'autre basé sur la contrainte effective, ont été utilisés pour modéliser les essais triaxiaux cycliques.

## 2. Programme expérimental

Cette partie présente les essais de laboratoire effectués sur un sable. Le sable de Missillac contient 7,5 % de fines (fraction 0/80  $\mu\text{m}$ ). Il appartient à la classe B2 qui correspond à un matériau sableux, légèrement argileux et donc sensible à l'eau. Il se caractérise par sa granulométrie étalée. Sa teneur en eau à l'optimum Proctor est égale à 9.2% et a pour densité sèche  $\gamma_d = 2.06 \text{ g/cm}^3$ . Dans cet article, on présente les résultats des essais de la mesure de la succion, de l'essai à la boîte de cisaillement direct et de l'essai triaxial à chargements répétés (TCR) sur le sable de Missillac pour des teneurs en eau variant de 6% à 12,5%.

## 2.1. Essai de la mesure de la succion

Deux méthodes de mesure de succion ont été utilisées afin d'obtenir la courbe de rétention du sol compacté: la méthode du papier filtre pour mesurer la succion totale et matricielle et la méthode du tensiomètre pour mesurer la succion matricielle. La procédure de détermination des composantes de la succion d'un sol par la méthode du papier filtre est exposée dans la norme ASTM D 5298-94 (1995) [1]. Cette méthode est basée sur l'hypothèse de l'établissement d'un équilibre hydrique entre le papier filtre et un échantillon de sol ayant une succion donnée. A l'équilibre, la teneur en eau du papier filtre est égale à la teneur en eau de l'échantillon. Cette technique permet de mesurer des succions allant jusqu'à 1000 MPa. Pour utiliser la méthode du tensiomètre, il est nécessaire d'utiliser une pierre poreuse céramique fine, qui doit rester saturée à tout niveau de succion, et qui assure la continuité de l'eau entre le sol non saturé et la chambre du capteur, qui doit rester pleine d'eau [2]. En contact avec le sol, l'eau dans le tensiomètre entre en contact avec l'eau du sol et à l'équilibre les deux ont la même pression. Cette technique est limitée à 100 kPa.

Chaque mélange est compacté avec une presse de compactage statique pour obtenir la densité sèche de  $2.06 \text{ g/cm}^3$ . Les valeurs de la succion matricielle obtenues avec les deux méthodes sont présentées dans la figure 1. Ces résultats expérimentaux, en plus de leur application dans la modélisation analytique expliquée dans la partie suivante, produisent une base de données importante pour évaluer la précision de chaque méthode utilisée dans une gamme de succion entre 0 et 500 kPa. Le palier à la teneur en eau de 10% pourrait être attribué à la double structure du sol étudié: macro- et microstructure. Un essai de porosimétrie au mercure montre l'existence de cette double porosité. Globalement, une bonne correspondance a été trouvée entre les deux courbes de rétention.

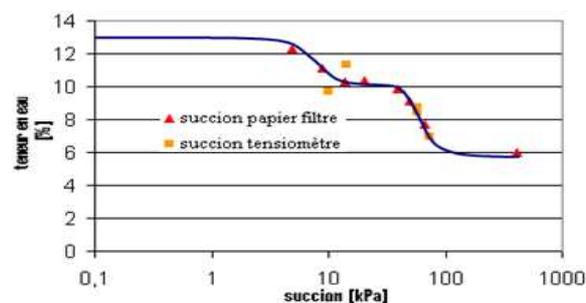


Figure 1. Résultats expérimentaux obtenus avec les deux méthodes de mesure de la succion [3]

## 2.2. Essai à la boîte de cisaillement

Concernant les essais à la boîte de Casagrande, ils ont été effectués à différentes teneurs en eau entre 6 % et 12,5 % sous trois contraintes verticales constantes. Ces résultats permettent d'estimer la résistance au cisaillement maximale à chaque teneur en eau (Figure 2). Les valeurs de l'angle de frottement et de la cohésion obtenues avec les essais de cisaillement sont présentées dans le tableau 1 et la figure 3 pour chaque teneur en eau.

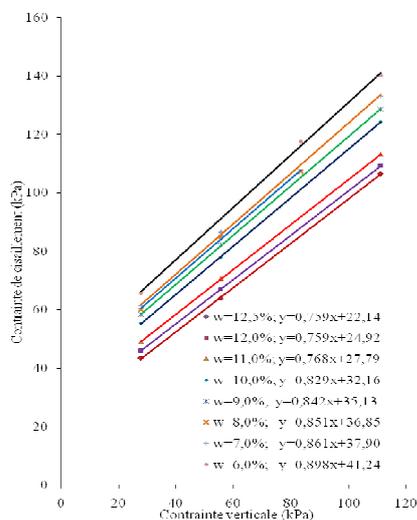


Figure 2. Droites de rupture du matériau

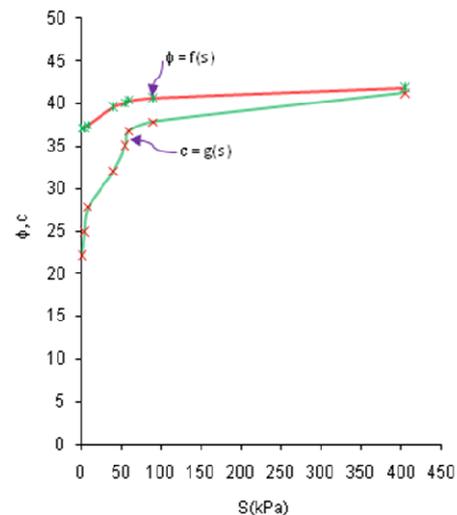


Figure 3. Evolution de  $\phi$  et  $c$  avec la succion ( $S$  (kPa))

Teneur en eau initial	Contrainte verticale (kPa)	Contrainte de cisaillement (kPa)	Masse humide (g)	Masse sèche (g)	Teneur en eau final (%)	Ecart relatif w (%)	Angle de frottement (°)	Cohésion (kPa)
12,5	27,78	43,43	152,5	136,2	11,97	4,3	37,16	22,14
	55,56	63,87	153,1	136,8	11,92	4,7		
	111,11	106,46	153,5	137,0	12,04	3,6		
12	27,78	45,99	150,1	134,6	11,52	4,0	37,20	24,92
	55,56	67,07	151,2	135,7	11,42	4,8		
	111,11	109,22	150,8	135,2	11,54	3,8		
11	27,78	48,97	148,7	134,4	10,64	3,3	37,52	27,79
	55,56	70,69	149,1	134,6	10,77	2,1		
	111,11	113,06	149,7	135,0	10,89	1,0		
10	27,78	55,36	147,3	134,2	9,76	2,4	39,66	32,16
	55,56	77,93	146,2	133,6	9,43	5,7		
	111,11	124,34	148,1	135,5	9,30	7,0		
9	27,78	58,34	147,8	135,9	8,76	2,7	40,10	35,13
	55,56	82,16	148,3	136,5	8,64	3,9		
	111,11	128,60	149,1	137,3	8,59	4,5		
8	27,78	60,04	144,2	133,8	7,77	2,8	40,40	36,85
	55,56	85,00	140,3	130,3	7,67	4,1		
	83,33	107,31	146,8	136,6	7,47	6,7		
7	27,78	61,32	145,6	136,9	6,36	9,2	40,73	37,90
	55,56	86,44	142,8	134,2	6,41	8,5		
	111,11	133,28	144,2	135,5	6,42	8,3		
6	27,78	65,72	140,3	132,7	5,73	4,5	41,92	41,24
	83,33	117,53	138,8	131,1	5,87	2,1		
	111,11	140,10	139,6	132,2	5,60	6,7		

Tableau 1. Résultats expérimentaux des essais de cisaillement.

### 2.3. Essai triaxial à chargements répétés

Les éprouvettes testées sont fabriquées par vibrocompression selon la norme NF P 98-230-1. Elles sont de forme cylindrique et ont un diamètre de 160 mm et une hauteur de 320 mm. La figure 4 montre le type de sollicitations reproduites lors d'un essai triaxial cyclique. Le chargement cyclique suivant différents chemins de contraintes, est réalisé grâce à un système pneumatique. L'échantillon a été soumis à un conditionnement de 104 cycles de chargement à l'appareil triaxial à chargements répétés (TCR), à une fréquence de 1Hz, afin d'obtenir une stabilisation des déformations.

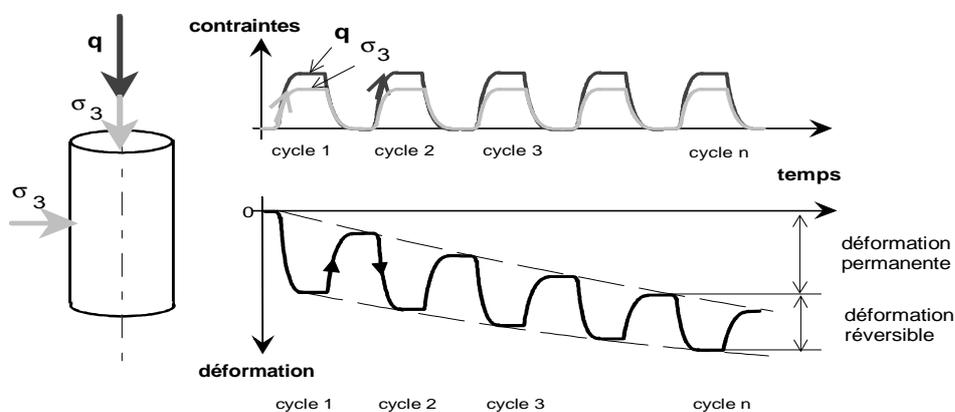


Figure 4. Type de sollicitations reproduites lors d'un essai triaxial [4]

Le conditionnement est réalisé en appliquant un état de contraintes  $(\Delta p, \Delta q) = (40 \text{ kPa}, 80 \text{ kPa})$  à partir de l'état de contraintes initial ( $p = 10 \text{ kPa}$ ,  $q = 5 \text{ kPa}$ ). Une série de 100 chargements cycliques a été appliquée sur différents chemins ( $q/p$ ) et pour chaque niveau de contraintes ( $p_{\max}$ ,  $q_{\max}$ ). Six chemins de contraintes ont été étudiés ( $\Delta q/\Delta p = 0; 0,5; 1; 2; 2,5; 3$ ) et trois ou quatre niveaux de contraintes ont été appliqués pour chaque chemin de contrainte.

### 3. Détermination des paramètres des modèles

Nous présentons ici la détermination des paramètres des modèles à partir des résultats de l'essai de la mesure de la succion, de l'essai à la boîte de cisaillement direct et de l'essai triaxial TCR pour le sable de Missillac.

#### 3.1. Paramètres du modèle de Bishop

Le modèle introduit le coefficient de Bishop  $\chi$  comme un paramètre de calcul de la contrainte effective généralement supposé égal au degré de saturation. La détermination du paramètre  $\chi$  est difficile expérimentalement car ce paramètre dépend en réalité de nombreux facteurs tels que le type de sol, sa structure et son indice des vides. Nous utilisons les essais à la boîte de cisaillement pour déterminer le coefficient  $\chi$ .

En se basant sur l'hypothèse de contrainte effective de Bishop, un premier critère de type Mohr-Coulomb prenant en compte la succion a été proposé:

$$\tau = c' + \sigma' \tan \varphi' = c' + (\sigma - u_a) \tan \varphi' + (u_a - u_w) \chi \tan \varphi' \quad (1)$$

où :  $S$  est la succion,  $S = (u_a - u_w)$ ;  $\chi$  est le coefficient de contraintes effectives,  $0 \leq \chi \leq 1$ ;  $\varphi'$ : angle de frottement à l'état saturé;  $c'$ : la cohésion à l'état saturé;  $\tau$ : contrainte de cisaillement. En évaluant le paramètre  $\chi$  à partir des essais, on obtient :

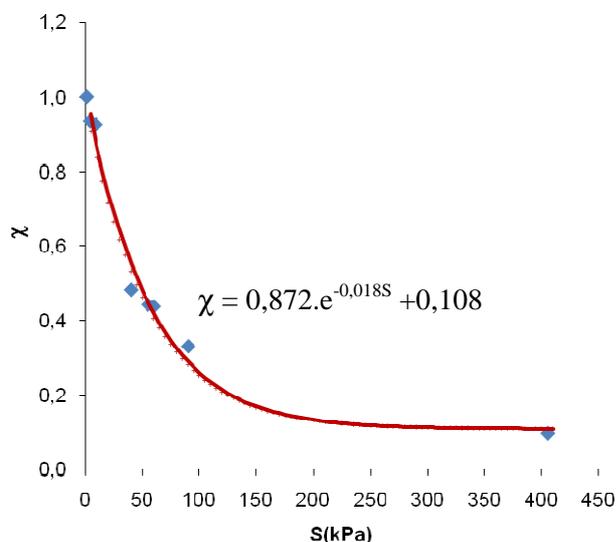
$$\chi = \frac{\tau - [c' + (\sigma - u_a) \tan \varphi']}{(u_a - u_w) \tan \varphi'} = \frac{\tau - [c' + \sigma_v \tan \varphi']}{S \tan \varphi'} \quad (2)$$

où  $c'$  et  $\varphi'$  sont définis à l'état saturé ( $w = 12,5\%$ ):  $\varphi' = 37,16^\circ$ ;  $c' = 22,14 \text{ kPa}$

La variation de  $\chi$  présente une forme exponentielle en fonction des suctions (Tableau 2). Nous proposons l'équation suivante:

$$\chi = a.e^{-b.s} + c \quad (3)$$

Les paramètres constants  $a$ ,  $b$  et  $c$  sont égaux à 0,872; 0,018 et 0,108. Les valeurs de  $\chi$  obtenues sont présentées dans le tableau 2 et la figure 5 suivante:



Teneur en eau (%)	Le degré de saturation (%)	La succion matricielle (kPa)	Le paramètre $\chi$
12	96	4	0,934
11	88	9	0,925
10	80	40	0,482
9	72	55	0,442
8	64	60	0,437
7	56	90	0,329
6	48	405	0,096

Tableau 2. Valeurs de  $\chi$ .

Figure 5. Variation de  $\chi$  en fonction de la succion.

### 3.2. Paramètres du modèle de Boyce

Le modèle de comportement élastique non-linéaire orthotrope utilisé est formulé par Hornych [5]. Ce modèle repose sur celui de Boyce et est obtenu par dérivation de l'énergie potentielle par rapport à la contrainte moyenne et à la contrainte déviatorique. On obtient ainsi les déformations volumiques ( $\varepsilon_v$ ) et les déformations déviatoriques ( $\varepsilon_q$ ) :

$$\varepsilon_v = \frac{p'^n}{p_a^{n-1}} \cdot \left[ \frac{\gamma+2}{3 \cdot K_a} + \frac{n-1}{18 \cdot G_a} \cdot (\gamma+2) \cdot \left( \frac{q^*}{p'} \right)^2 + \frac{\gamma-1}{3 \cdot G_a} \cdot \frac{q^*}{p'} \right] \quad (4)$$

$$\varepsilon_q = \frac{2}{3} \cdot \frac{p'^n}{p_a^{n-1}} \cdot \left[ \frac{\gamma-1}{3 \cdot K_a} + \frac{n-1}{18 \cdot G_a} \cdot (\gamma-1) \cdot \left( \frac{q^*}{p'} \right)^2 + \frac{2 \cdot \gamma+1}{6 \cdot G_a} \cdot \frac{q^*}{p'} \right] \quad (5)$$

où:  $q' = q^*$  ;  $p' = (p^* - u_a) + \chi \cdot S$  ;  $u_a$  est la pression de l'air;  $p_a$  est la pression de référence ( $p_a = 100$  kPa).

$p^*$  et  $q^*$  sont la contrainte moyenne et la contrainte déviatorique:

$$p^* = \frac{\gamma \cdot \sigma_1 + 2 \cdot \sigma_3}{3} ; q^* = \gamma \cdot \sigma_1 - \sigma_3 \quad (6)$$

$\sigma_1$  et  $\sigma_3$  sont la contrainte verticale et la contrainte radiale.

$\chi$  varie en fonction de la succion selon l'équation (3).

$K_a$ ,  $G_a$ ,  $n$ ,  $\gamma$  sont les paramètres du modèle et ils ont été optimisés avec la méthode des moindres carrés dans laquelle l'erreur quadratique suivante est minimisée:

$$S_{\min} = \frac{\sum (\varepsilon_v - f(p', q))^2}{\sum (\varepsilon_v - m_v)^2} + \frac{\sum (\varepsilon_q - g(p', q))^2}{\sum (\varepsilon_q - m_q)^2} \quad (7)$$

où:  $\varepsilon_v$ ,  $\varepsilon_q$ : déformations volumiques et déformations déviatoriques élastiques expérimentales.

$f(p', q)$ ,  $g(p', q)$ : déformations volumiques et déformations déviatoriques issues du modèle.

$m_v$ ,  $m_q$ : valeurs moyennes des déformations volumiques et déformations déviatoriques élastiques expérimentales.

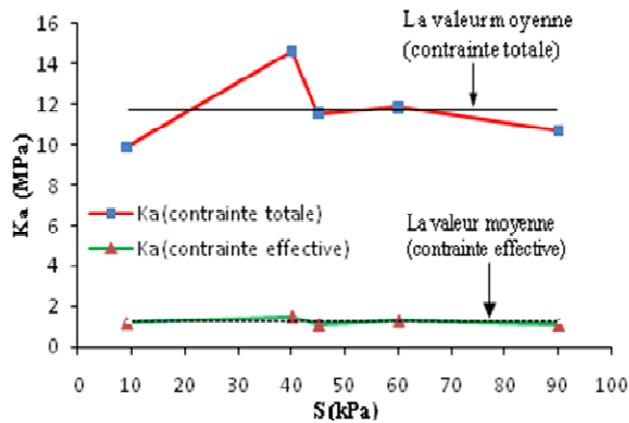
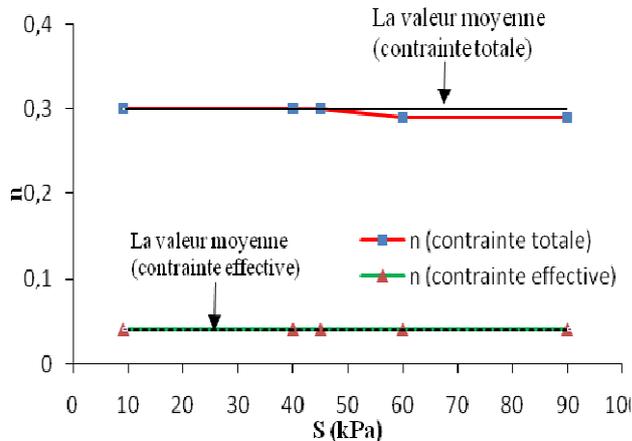
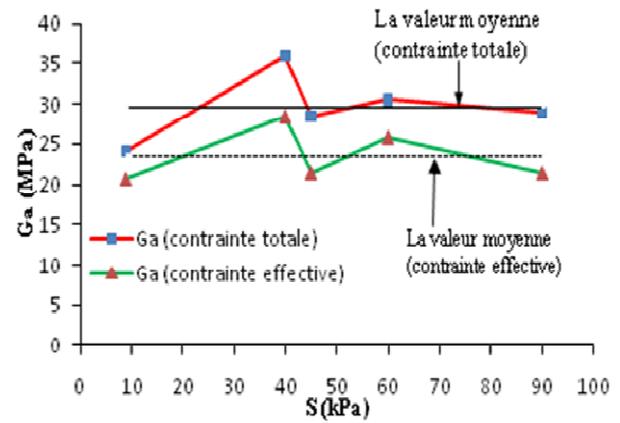
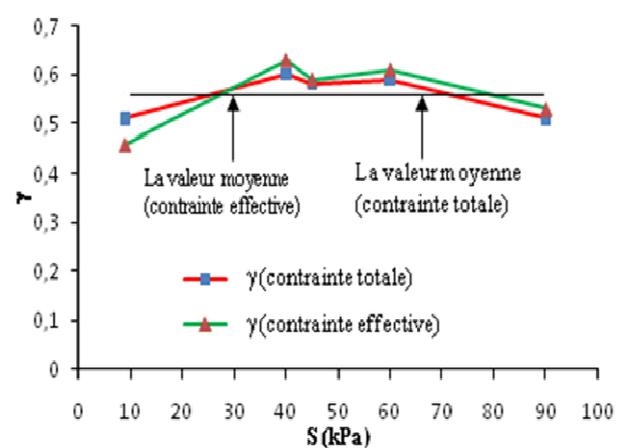
Le coefficient de corrélation s'exprime par :

$$C_{\text{corrél.}} = 1 - \sqrt{\frac{S_{\min}}{2}} \quad (8)$$

Pour voir l'influence de ces deux états sur les paramètres du modèle, une optimisation des paramètres a été réalisée. Les teneurs en eau considérées dans cette optimisation sont de 7%, 8%, 9.6%, 10% et 11%. Le tableau 3, les figures 6, 7, 8 et 9 présentent les paramètres du modèle de Boyce basé sur la contrainte totale et la contrainte effective. Notons qu'à chaque teneur en eau correspond cinq ou six chemins de contraintes ( $\Delta q/\Delta p = 0; 0,5; 1; 2; 2,5; 3$ ).

w (%)	S (kPa)	$\Delta q/\Delta p$	Les paramètres basés sur la contrainte totale				La corrélation	Les paramètres basés sur la contrainte effective				La corrélation
			$K_a$	$G_a$	n	$\gamma$		$K_a$	$G_a$	n	$\gamma$	
7	90	0; 0,5; 1; 2; 3	10,70	28,90	0,29	0,51	0,89	1,10	21,50	0,04	0,53	0,87
8	60	0; 0,5; 1; 2; 2,5; 3	11,85	30,50	0,29	0,59	0,88	1,32	25,80	0,04	0,61	0,91
9.6	45	0; 0,5; 1; 2; 3	11,56	28,50	0,30	0,58	0,89	1,10	21,50	0,04	0,59	0,88
10	40	0; 0,5; 1; 2; 2,5; 3	14,65	36,00	0,30	0,60	0,87	1,50	28,40	0,04	0,63	0,92
11	9	0; 0,5; 1; 2; 2,5; 3	9,90	24,10	0,30	0,51	0,85	1,18	20,77	0,04	0,46	0,89
La valeur moyenne			<b>11,73</b>	<b>29,60</b>	<b>0,30</b>	<b>0,56</b>		<b>1,24</b>	<b>23,59</b>	<b>0,04</b>	<b>0,56</b>	

Tableau 3. Les paramètres du modèle de Boyce

Figure 6. Evolution de  $K_a$ Figure 8. Evolution de  $n$ Figure 9. Evolution de  $\gamma$ 

En contrainte totale, les paramètres  $K_a$ ,  $G_a$ ,  $n$  montrent une variation importante par rapport à leur valeur moyenne, tandis qu'une variation plus faible des paramètres peut être observée pour le modèle utilisant le concept de contrainte effective. Le paramètre  $\gamma$  reste presque constant dans les deux simulations.

## 4. Conclusion

Cet article décrit un modèle classique d'élasticité non linéaire pour le comportement mécanique des sols granulaires non-saturés dans lequel la succion a été injectée. Les paramètres obtenus du modèle ont donné des résultats très encourageants. Les simulations du comportement résilient, avec le modèle de Boyce, exprimées en termes de contraintes effectives confirment la capacité du modèle à reproduire la tendance générale des expériences. Ainsi, pour les applications pratiques, le nombre d'essais triaxiaux utilisés pour prédire le comportement résilient à différentes teneurs en eau pourrait être significativement réduit.

## Références

- [1] ASTM D 52980-094, 1995, "Standard test method for measurement of soil potential (suction) using filter paper", Vol. 4.09, pp 154 – 159.
- [2] ISO 11275, 2004, "Soil quality - Determination of unsaturated hydraulic conductivity and water - retention characteristic – Wind's evaporation method".
- [3] Maria Ioana, A., 2009, "Interprétation en contraintes effectives du comportement réversible des matériaux granulaires compactés non saturés sous sollicitations triaxiales cycliques", Projet fin d'étude, INSA de Strasbourg.
- [4] Allou, F., 2006, "Un modèle élastoplastique pour la modélisation de l'orniérage des chaussées à faible trafic", thèse de doctorat, Université de Limoges.
- [5] Hornych P., Kazai A., Piau JM., 1998, "Study of the resilient behaviour of unbound 529 granular material". In: Proceedings 5th conference on bearing capacity of 530 roads and airfields, Trondheim, vol. 3; p. 1277–87.