

ETUDE EXPERIMENTALE DE LA RHEOLOGIE DE MELANGES SABLE-KAOLINITE

THANH LOC NGUYEN, SERENA CAPUCCI, PHILIPPE REIFFSTECK, FABIEN SZYMKIEWICZ

Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (LCPC), 58 bd Lefebvre, 75732 cedex 15 Paris, France,
e-mail: thanh.loc.nguyen@lcpc.fr

Résumé: On présente les résultats d'une série d'essais effectués à l'appareil triaxial, sur des échantillons reconstitués à partir de sable et de kaolinite, compactés suivant des procédures spécifiques afin d'obtenir deux types de comportement anisotrope: 1. Le premier type correspond à des éprouvettes homogènes, consolidées de manière à obtenir un comportement anisotrope. 2. Le second type correspond à une anisotropie matérielle, due à la structure des éprouvettes constituées de couches alternées de sable et de kaolinite. Dans les essais à l'appareil triaxial, on mettra en œuvre des capteurs de déplacement locaux et des «bender elements». Le programme expérimental a pour but de déterminer l'évolution du module de cisaillement G en fonction de la contrainte moyenne p' subie par l'éprouvette.

Abstract: This study is based on experimental data obtained from the soil mixture material (kaolin and sand) with help of triaxial and bender elements' tests. The remoulded soil made from a mixture of sand and kaolin was compacted in layers in order to create two different types of anisotropy. The first set of specimens, homogeneously remoulded, was compacted in such a way that intrinsic anisotropic feature can be observed. The second set was poured in a specific mould in successive layers of sand and kaolin to create a material anisotropy. The triaxial tests will be carried out with local transducers and bender elements measurements. The goal of this experimental project is to determine the evolution of the shear modulus G in function of the mean stress p' applied on the sample.

1. INTRODUCTION

Dans le cadre de l'étude de l'anisotropie du sol, on considère que le sol créé par sédimentation est assimilé à un matériau élastique orthotrope de révolution. L'anisotropie peut être, lors du dépôt par couche, due à la surconsolidation (cas de l'éprouvette de type 1) et au mode de formation par sédimentation des sols (cas de l'éprouvette de type 2). La surconsolidation peut être due à des surcharges, des pressions tectoniques ou des actions climatiques comme par exemple des cycles de séchage. Par contre, la sédimentation est le résultat du dépôt de couches stratifiées horizontales de nature souvent différente, qui ont subi dans le passé un même état de contraintes.

Compte tenu de ces conditions de formation, il est évident que les couches possèdent des propriétés équivalentes dans toutes les directions de leur plan de stratification et que ces propriétés sont distinctes des propriétés élastiques des plans contenant l'axe de révolution perpendiculaire à ce plan d'isotropie.

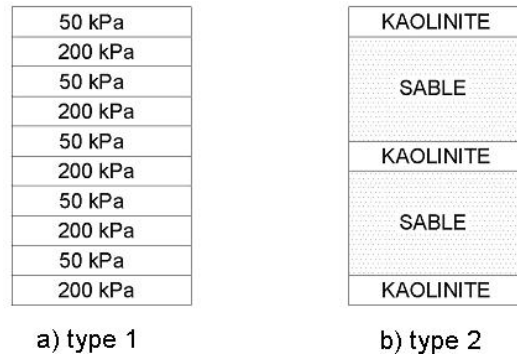


Fig. 1. Types d'éprouvettes

Les éprouvettes de type 1 sont taillées dans le but d'étudier l'anisotropie due à la surconsolidation. Ces éprouvettes se composent de couches homogènes superposées et consolidées en condition oedométrique respectivement avec des contraintes différentes (figure 1a).

Par contre, les éprouvettes de type 2 se composent de couches de sable et de kaolinite qui sont consolidées à la même pression. Ce type d'éprouvette est utilisé pour étudier l'anisotropie résultant de la sédimentation (figure 1b).

2. PRÉPARATION DES ÉCHANTILLONS

Les dimensions des éprouvettes de deux types sont les mêmes: 10 cm de hauteur et 5 cm de diamètre. Les éprouvettes sont compactées statiquement à la teneur en eau de l'OPN ($w_{OPN} = 12\%$), cette teneur en eau a été déterminé par une série d'essais Proctors réalisés au préalable (REIFFSTECK et NGUYEN PHAM [3]).

Touttes les éprouvettes sont saturées lors de leur consolidation en condition oedométrique.

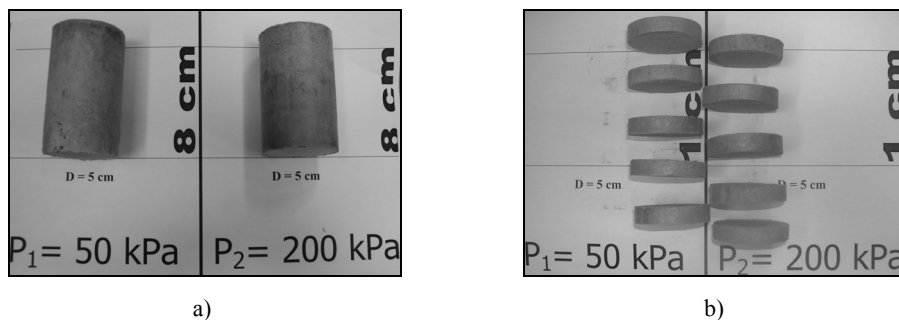


Fig. 2. Blocs 50 et 200 avant et après tranchage en couches

2.1. ÉPROUVETTE DE TYPE 1

Les deux blocs de mélange (70% sable et 30% kaolinite, $w = 12\%$) sont consolidés séparément jusqu'à 50 et 200 kPa (figure 2a) désignés bloc 50 ($e = 0,58$, $\gamma_h = 1,88 \text{ g/cm}^3$) et bloc 200 ($e = 0,54$, $\gamma_h = 1,93 \text{ g/cm}^3$) et stockés dans une chambre de conservation à température et hygrométrie contrôlées, dans des sacs hermétiquement fermés pour empêcher les variations de teneur en eau.

Ensuite, chaque bloc est tranché en 8 couches de 1 cm d'épaisseur (figure 2b); 5 couches choisies de chaque bloc sont assemblées les unes avec les autres pour former une « nouvelle éprouvette » (figure 3a).

Finalement, la « nouvelle éprouvette » a été consolidée à la pression verticale de 50 kPa pour assurer le contact entre les couches et réduire les vides entre les couches.

2.2. ÉPROUVETTE DE TYPE 2

Ce type d'éprouvette se compose de 3 couches de kaolinite et 2 couches de sable. Le rapport masse de sable sur masse totale est aussi égal à 70% et celui masse de kaolinite sur masse totale est de 30%. En fonction du niveau de compactage recherché ($p_0 = 160 \text{ kPa}$ et $w = 12\%$) on a calculé le poids de matériau sec et la quantité d'eau à ajouter. L'épaisseur déterminée des couches de kaolinite est de 12 mm et chaque couche de sable a une épaisseur de 32 mm (figure 3b). En fin, toutes les couches (sable et kaolinite) sont consolidées à la même pression de 160 kPa.

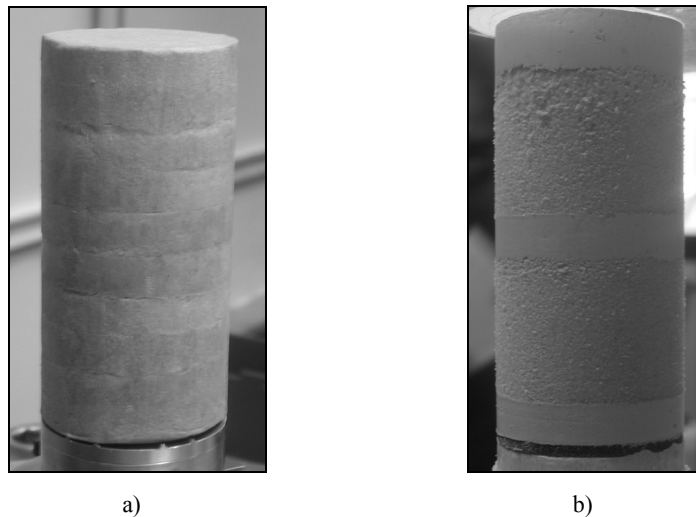


Fig. 3. Eprouvtes avant essai

3. PROCÉDURE D'ESSAI

Six essais triaxiaux ont été réalisés: trois éprouvettes de type 1 à des pressions respectives de consolidation de 50, 100 et 150 kPa, et trois éprouvettes de type 2, consolidées aux mêmes pressions. (BLIVET et MIEUSSENS [1]).

Les essais sont en condition drainée, avec une contre pression maintenue constante à 200 kPa. Des mesures de propagation d'ondes par mise en vibration d'éléments piézo-électriques ont été réalisés dans les éprouvettes (figure 4). Ces essais sont communément appelés essais aux Bender Elements (BE).

Afin d'avoir un grand nombre de résultats, chaque éprouvette est consolidée par palier de 50 kPa, avec un essai BE effectué à la fin de chaque phase de consolidation; les vitesses de propagation des ondes sinusoïdales dans l'éprouvette sont mesurées. Avec une pression interstitielle et une contrainte moyenne effective p' maintenues constantes, les essais se terminent lorsque la déformation axiale ε_1 atteint 15%.

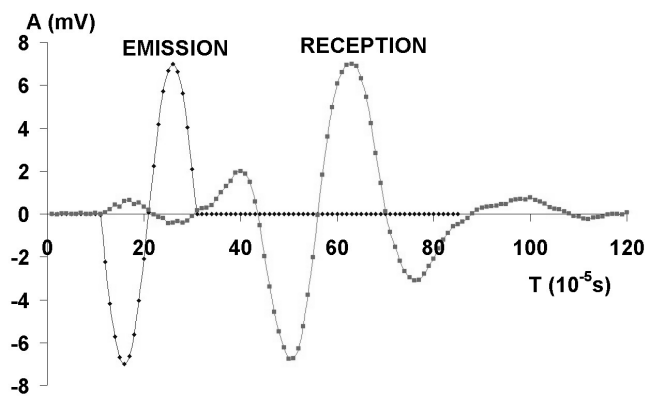


Fig. 4. Mesure de «bender elements»

4. RÉSULTATS D'ESSAI ET DISCUSSION

4.1. ESSAI TRIAXIAL

Tous les essais se sont terminés par une rupture en tonneau, avec aucun plan de rupture discernable ainsi que l'on peut l'observer sur la figure 5.

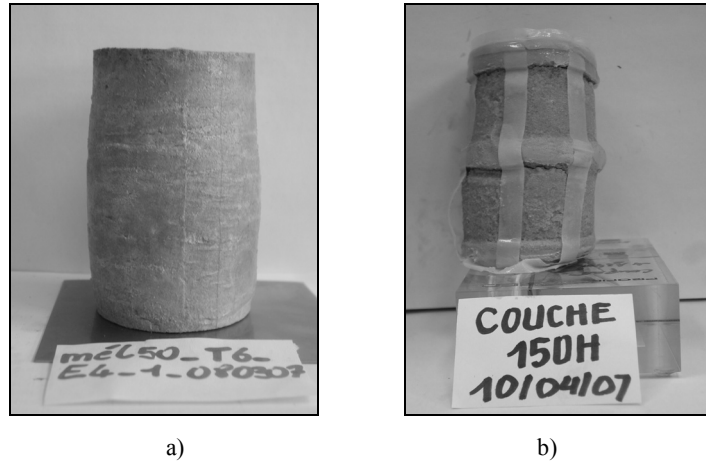


Fig. 5. Eprouvtes après essai

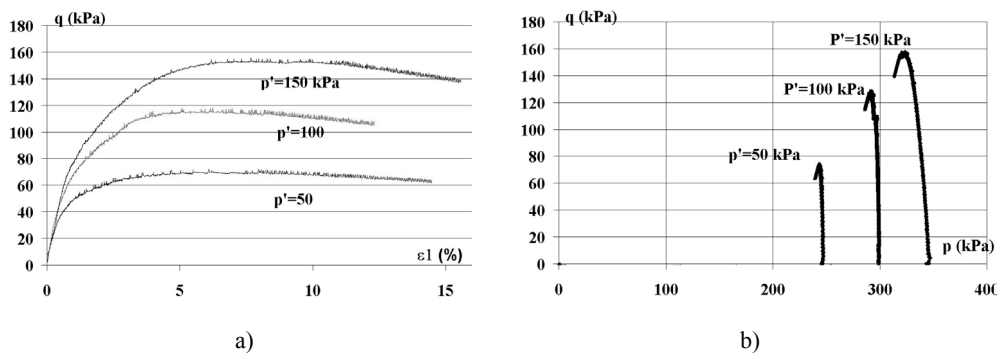


Fig. 6. Courbes de l'évolution du déviateur en fonction des déformations axiales pour les éprouvettes du type 1

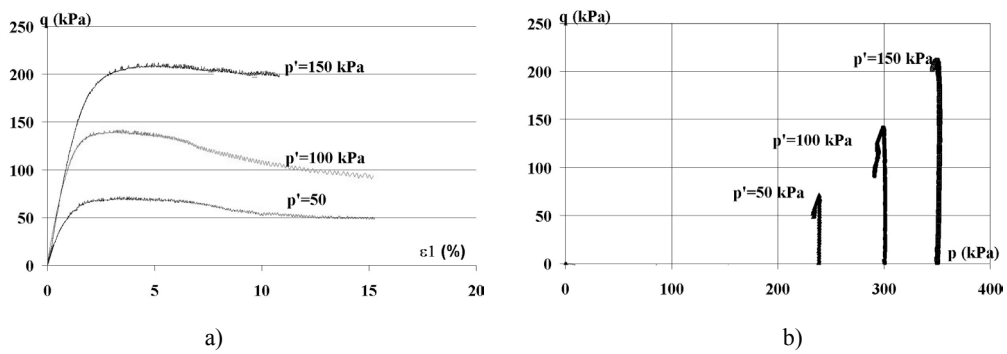


Fig. 7. Courbes de l'évolution du déviateur en fonction des déformations axiales pour les éprouvettes du type 1

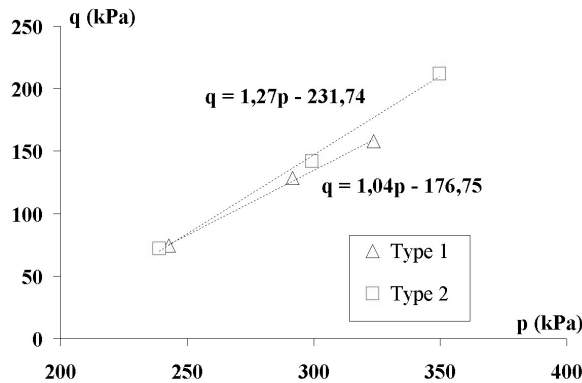
En comparant sur les figures 6a et 7a, les courbes de relation entre la déformation axiale et la contrainte déviatorique, on observe que le comportement des mélanges (type 1) ressemble au comportement d'un sable lâche tandis que le comportement des couches (type 2) présente un pic plus prononcé.

Le tableau 1 récapitule les points caractéristiques dans le plan (p, q) de l'état critique (figure 6b et 7b) observé sur les courbes déformation axiale et contrainte déviatoriques représentés sur la figure 6a et 7a.

Tableau 1

Contraintes critiques

Eprouvette	Contraintes critiques		
	p kPa	q kPa	M
Type 1	242,82	43,42	1,038
	291,78	92,78	
	320,50	121,50	
Type 2	238,96	41,43	1,263
	299,35	102,52	
	349,69	153,12	

Fig. 8. Détermination des droites d'état critique dans le plan (p, q)

En étudiant les contraintes critiques obtenues à la rupture des deux types d'éprouvettes sur la figure 8, on remarque que la résistance au cisaillement des éprouvettes de type 2 est environ 25% supérieure à celle des éprouvettes de type 1.

La remarque précédente sur la plus grande rigidité du type 2 par rapport au type 1 est bien corroborée par l'observation d'une pente de la droite d'état critique plus importante pour les éprouvettes de type 2. La présence de couches de différentes natures pourrait agir comme un renforcement, ce phénomène a été mis en évidence dans divers travaux menés sur les sols renforcés.

4.2. ESSAI AUX BENDER ELEMENTS

4.2.1. ANALYSE DU TEMPS DE PROPAGATION

Le calcul du temps de parcours (noté T) des ondes de cisaillement sinusoïdal (désignées onde S) dans les éprouvettes, nous a permis de déterminer leurs vitesses, et le module de cisaillement des éprouvettes pour différents points de calcul (points A , B , etc. de la figure 9).

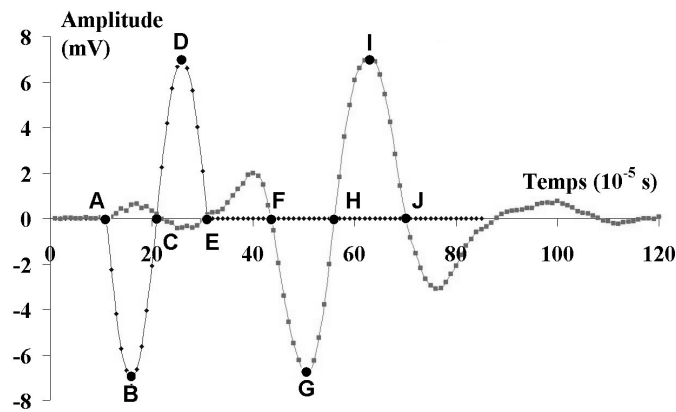


Fig. 9. Train des ondes émises et reçues

On peut remarquer à la lecture du tableau 2 qu'en fonction du type d'interprétation choisi la valeur de T n'était pas toujours constante, et nous avons donc choisi d'utiliser pour le calcul de G le temps $T1$: laps de temps entre les points A et F (voir figure 9) (SHARIFIPOUR [4]).

Tableau 2

Temps de propagation mesurés

Eprouvette	P'	T_s	T_r	T_1	T_2	T_3	T_4	T_5
	kPa	ms	ms	ms	ms	ms	ms	ms
Type 1	50	0,20	0,33	0,44	0,45	0,48	0,53	0,57
	100	0,20	0,32	0,37	0,41	0,42	0,44	0,49
	150	0,20	0,25	0,30	0,34	0,33	0,37	0,36
Type 2	50	0,20	0,23	0,66	0,69	0,69	0,69	0,69
	100	0,20	0,19	0,54	0,55	0,54	0,54	0,53
	150	0,20	0,16	0,43	0,42	0,41	0,40	0,39

Théoriquement, la mesure du temps de propagation des ondes ne dépend pas de la position dans le train d'ondes, c'est-à-dire que $T_1 = T_2 = T_3 = T_4 = T_5$. Mais on

observe ici que pour les éprouvettes de type 1, la valeur de T augmente selon la position du point mesuré dans le train d'ondes reçues. Pour les éprouvettes de type 2, T semble assez stable. Il est à remarquer également que les temps de propagation sont plus grands dans les éprouvettes de type 2, ce qui implique aussi une plus petite vitesse des ondes S .

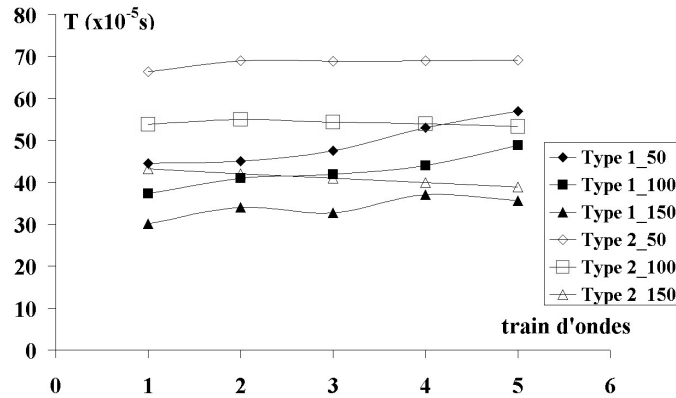


Fig. 10. Variation du temps de propagation dans le train des ondes reçues

4.2.2. ANALYSE DES PÉRIODES DES ONDES REÇUES

La période des ondes reçues (Tr) n'est pas identique à celle des ondes émises (Ts): elle décroît quand la pression de consolidation augmente.

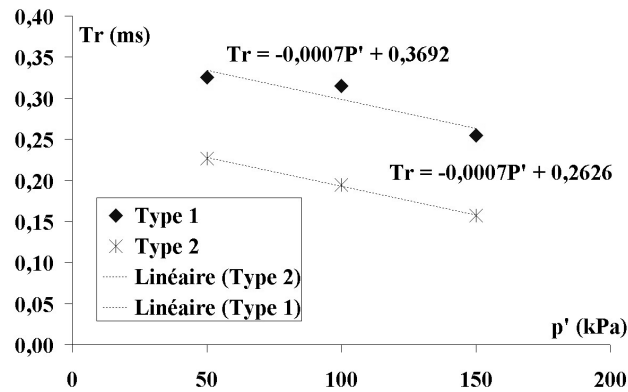


Fig. 11. Variation des périodes des ondes reçues

Pour ces éprouvettes, on obtient une relation expérimentale linéaire de la période des ondes reçues en fonction de la contrainte moyenne effective:

$$Tr = n.p' + T_0, \quad (1)$$

T_0 : période des ondes reçues sans consolidation ($p' = 0$).

Pour le mélange (type 1) : $T_0 = 0,3692$ (ms).

Pour les couches de sable et de kaolinite (type 2): $T_0 = 0,2626$ (ms).

n : constante dépendante des caractéristiques du sol. Pour les deux types, on obtient une valeur unique $n = -0,0007$ (ms/kPa).

4.2.3. DÉTERMINATION DU MODULE DE CISAILLEMENT G

Le module de cisaillement G a été calculé à partir de la formule classique suivante:

$$G = \rho \cdot V^2. \quad (2)$$

Avec:

ρ : masse volumique (g/cm^3),

V : vitesse de propagation des ondes S dans l'éprouvette (cm/s), égale à la hauteur d'éprouvette divisée par le temps de propagation des ondes (T_1).

Les résultats sont rassemblés dans le tableau 3.

Tableau 3

Détermination du module de cisaillement

Eprouvette	p' kPa	m g	v cm^3	h cm	ρ g/cm^3	V cm/s	G MPa
Type 1	50	426,91	196,46	10,01	2,17	22512,57	110,13
	100	432,69	196,23	10,24	2,21	27417,17	165,75
	150	398,37	182,15	9,77	2,19	32445,55	230,23
Type 2	50	361,87	197,35	10,26	1,83	15447,86	43,76
	100	359,56	195,31	10,08	1,84	18732,10	64,60
	150	396,41	178,68	9,04	2,22	20933,47	97,22

Les résultats obtenus représentés sur la figure 12 nous ont permis de mettre en évidence une relation expérimentale entre G et p' , en absence de contrainte déviatorique ($q = 0$), de forme:

$$G = G_0 \cdot e^{m \cdot p'} \quad (3)$$

avec:

m : coefficient dépendant des caractéristiques du sol,

G_0 : module de cisaillement initial sans consolidation ($p' = 0$).

Pour les deux types d'éprouvettes, la valeur de m est presque la même, environ $0,008$ (kPa^{-1}). En revanche, le module initial G_0 varie fortement, de $29,262$ (MPa) pour les éprouvettes de type 2 à $77,195$ (MPa) pour les éprouvettes de type 1. Le module G est, à chaque palier de consolidation, environ deux fois plus grand pour les éprouvettes de type 1 que pour les éprouvettes de type 2. Les éprouvettes de couches

de sable et de kaolinite (type 2) sont donc moins résistantes dans la zone élastique que les éprouvettes de mélange.

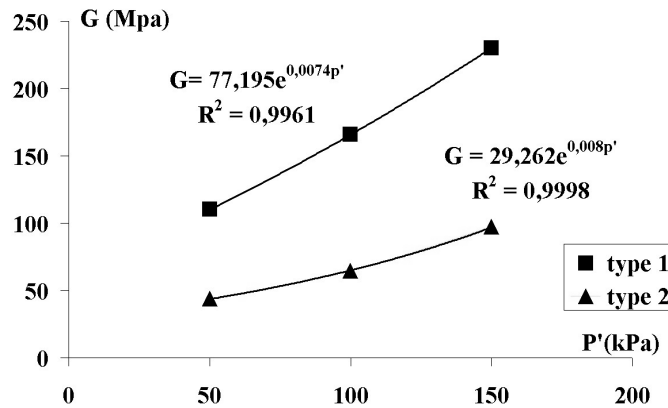


Fig. 12. Relation entre le module de cisaillement et la contrainte moyenne effective

La relation trouvée est différente de celle habituellement utilisée proposée par HARDIN [2] à partir d'essais triaxiaux sur sable.

5. CONCLUSION

Les résultats de ces essais montrent qu'avec la même proportion de matériau (70% sable, 30% kaolinite), le comportement des différentes éprouvettes varie selon les conditions de création du matériau. Par exemple, dans le domaine élastique, le mélange est plus résistant que les couches séparées de sable et kaolinite, tandis que dans le domaine plastique, on observe un comportement inverse.

Cette étude simule deux types d'anisotropie orthotrope, l'une causée par des différences de consolidation, l'autre causée par la structure matérielle (représentative de la sédimentation dans la nature) et elle se poursuivra par des essais sur des couches inclinées à 30, 45, 60 et 90 degrés afin de nous permettre de mieux comprendre le comportement des sols anisotropes et de proposer d'éventuelles modifications pour les modèles théoriques existants.

RÉFÉRENCES

- [1] BLIVET J.C., MIEUSSENS C., *Détermination de la résistance au cisaillement des sols, en laboratoire*, Projet de méthode d'essai L.P.C. 18, 2001.
- [2] HARDIN B.O., *Nature of damping in sands*, Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division. ASCE, 1965, Vol. 91 (SM1), 63–97.

- [3] REIFFSTECK P., NGUYEN PHAM P.T., *Influence de la répartition granulométrique sur le comportement mécanique d'un sol*, 16ème Conf.Int. de Mécanique des Sols et de Géotechnique, Osaka, 12–16 Septembre 2005, 583–586.
- [4] SHARIFIPOUR M., *Caractérisation des sols par propagation d'ondes analyse critique de la technique des bender extend elements*, Thèse de doctorat, Ecole centrale de Nantes, 2006, 23, 31.