

ÉTUDE EXPÉRIMENTALE ET PROBABILISTIQUE DU FROTTEMENT DANS UN MILIEU GRANULAIRE PULVÉRULENT

Hassen OUAHHABI ¹, Mourad MEGHACHOU ¹.

⁽¹⁾ Département de Génie Civil, Faculté des sciences de l'ingénieur, Université Sidi Bel Abbès, BP 89, Cité Ben M'hidi, 22000 Sidi-Bel-Abbès, Algérie, e-mail : hassen_ouahhabi@yahoo.fr

RÉSUMÉ

La compréhension du comportement des milieux granulaires pulvérulents est primordiale lorsqu'il s'agit d'étudier les mécanismes de rupture du sol. Le dimensionnement des ouvrages à la mobilisation du frottement du sol est souvent basé sur des normes, elles-mêmes issues de l'expérience. Nous proposons une étude expérimentale comparative entre différents essais de cisaillement à la boîte de Casagrande, réalisés à différentes contraintes normales et différentes densités de sable. La boîte de cisaillement au sein de notre laboratoire est constituée d'une demi-boîte classique de dimension 6x6 cm². Une corrélation directe entre ces derniers et le maximum du frottement pour un sable donné, est mise en évidence en quantifiant le coefficient de frottement. Nous discuterons les différents résultats d'essais en référence à des essais de cisaillement simple sur sable.

MOTS-CLÉS : *Milieux Pulvérulents, Boîte de Cisaillement, Coefficient de Frottement, Essais de Laboratoire.*

ABSTRACT

Understanding the behavior of granular powder is essential when studying the mechanisms of failure of the soil. The structural design for the mobilization of friction of soil, often based on norms, themselves derived from experience. We propose an experimental study comparing various tests Shear box Casagrande, made to different normal and different density of sand. The shear box in our laboratory consists of a semi-classical box dimension 6 x 6 (cm²). A direct correlation between these and the maximum friction for a given sand, is highlighted by quantifying the coefficient of friction. We discuss the various test results in reference to the simple shear tests on sand.

KEY-WORDS : *Powder granular, Shear box, friction coefficient, laboratory tests.*

1. Introduction

Dans le domaine du génie civil, les problèmes liés au comportement du sol jouent un rôle important dans celui des ouvrages (pieux, murs de soutènement ou structures de renforcement). En effet, la mobilisation du frottement du sol diffère selon la nature granulaire du sol et de sa densité. Bjerrum [4] a obtenu des résultats intéressants sur la variation de l'angle de frottement en fonction de l'augmentation de la porosité, pour un sable fin à granulométrie assez uniforme. Plusieurs recherches scientifiques étaient entreprises dans le but de tirer des formules empiriques qui traduisent bien l'évolution de l'angle de frottement interne Coster [4]. Chen l'a exprimé, d'après ses travaux expérimentaux, par l'Eq. (1), décrite ci-dessous :

$$\varphi = \varphi_1 + \varphi_2 \lg e \quad (1)$$

φ_1 et φ_2 : angles de frottement paramétriques constants ;
e : indice des vides.

On peut citer encore l'équation empirique de Giraudet :

$$\tan \varphi = 0,25 + \frac{0,3}{e} \quad (2)$$

Caquot avait proposé dès 1939 une équation plus simple :

$$\tan \varphi = \frac{K}{e} \quad (3)$$

qui donne une bonne approximation. Le coefficient K dépend de la forme des grains, de leur rugosité et de l'uniformité de la granulométrie. Caquot et Kérisel [4] ont indiqué que K pouvait varier entre 0,40 et 0,60. La formule de Caquot, pour un sol à grains rugueux assez uniformes, est donnée par la l'Eq. (4) :

$$\tan \varphi = \frac{0,55}{e} \quad (4)$$

Koushi Toriyama [16] a trouvé dans ses travaux une relation directe entre l'angle de frottement interne et la densité sèche de sable ρ_d pour différentes contraintes de confinement :

$$\varphi = 8,68 + 13,45 \rho_d \quad (5)$$

M. Duncan [6] dans ses travaux sur les sables et agrégats, a trouvé une corrélation entre l'angle de frottement, la densité relative et la contrainte normale (en Pa) :

$$\varphi = (A + B \times D_r) + (C + D \times D_r) \times \text{Log} \left(\frac{\sigma_v}{\sigma_a} \right) \quad (6)$$

où A, B, C et D sont les paramètres empiriques constants, D_r est la masse volumique apparente, le

coefficient d'uniformité du sable doit répondre à la condition : $(0 < C_u \leq 6)$.

σ_a est la pression atmosphérique, σ_v est la pression normale.

Enfin, Al-Mhaidib A.I. [2], dans une recherche plus récente, a trouvé une corrélation entre l'angle de frottement interne et la vitesse de cisaillement (SR) pour un sable, sous la forme :

$$\varphi = 1,5 \ln(SR) + 46,08 \quad (7)$$

SR : vitesse de cisaillement (shear ratio)

2. Appareillage

L'appareil de cisaillement direct utilisé pour cette étude était spécialement conçu pour les essais de cisaillement sol-sol afin de déterminer le coefficient de frottement interne des sols considérés. Cet appareil permet de mesurer les coefficients de frottement des différents sables testés.

La boîte de cisaillement se compose de deux demi-boîtes de dimension de $6 \times 6 \text{ cm}^2$ en acier traité, solidarisés par deux vis qu'on enlève avant chaque essai. Cette boîte est ensuite posée sur le chariot. La mise en marche de l'appareil est numérique et programmée à l'aide de la cellule de programmation.

La vitesse de cisaillement est maintenue constante pendant toutes nos campagnes d'essais à 0,5 mm/min. La contrainte de cisaillement est mesurée à l'aide du comparateur horizontal et la variation volumique au cours de l'essai est prise par le comparateur vertical. Quant au déplacement horizontal, il est mesuré par un troisième comparateur qui se trouve près du chariot où est posée la boîte de Casagrande.

La contrainte normale est appliquée à l'aide de l'étrier, celle-ci varie de 100, 200 et 300 KPa. Dans nos campagnes expérimentales, on a fait varier la densité relative des sables par des procédés différents. Pour obtenir la densité lâche, on a procédé à la pluviation; pour la densité moyenne, on a rempli la boîte en deux couches successives, en procédant à une compaction de 4 coups par couche. Quant à la dernière densité (forte), on a rempli la boîte de trois couches successives, avec 10 coups pour chaque couche déposée.

3. Matériaux testés

On a utilisé dans nos campagnes d'essais différents sables. Le sable de carrière de Tergha est un sable de mer de référence utilisé fréquemment dans nos laboratoires de la faculté des sciences de l'ingénieur et sur lequel de nombreuses recherches ont été réalisées auparavant. Le second, le sable de carrière de la commune de Chetouane, est un sable destiné aux chantiers de la Wilaya de Sidi-Bel-Abbès, et qui est

utilisé fréquemment dans nos laboratoires. Le dernier, le sable Port Say, est un sable de mer de l'extrême ouest algérien (wilaya de Tlemcen), qu'on a pris l'initiative de ramener afin d'enrichir d'avantage nos résultats expérimentaux.

Les courbes granulométriques des trois sables utilisés sont données dans la Fig.1.

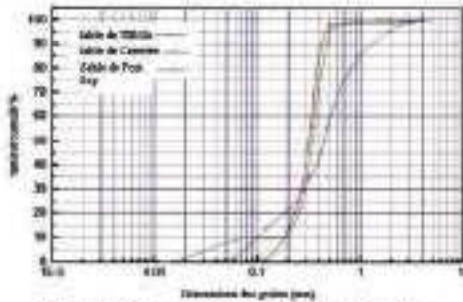


Figure 1 : Courbes granulométriques du sable de Tergla, de la carrière de la commune Chetouane et du Port Say.

Porosité	Dimension des Taux				Masse Volumique ρ (g/cm ³)
	D ₁₀ (mm)	D ₃₀ (mm)	D ₅₀ (mm)	D ₉₀ (mm)	
Tergla	0,21	0,14	0,26	0,52	2,62
Chetouane	0,43	0,1	0,27	0,2	2,46
Port Say	0,32	0,13	0,3	0,36	2,65

Tableau 1 : Caractéristiques des sables de Tergla, de la commune de Chetouane et de Port Say.

Sable	C _u	C _s	C _v
Tergla	1,75	1,37	1,31
Chetouane	3	1,46	1,54
Port Say	2,4	1,66	1,42

Tableau 2 : Valeurs des coefficients d'uniformité, de courbure et de symétrie pour chaque type de sable.

C_u est le coefficient d'uniformité :

$$C_u = D_{60} / D_{10}$$

C_s est le coefficient de courbure :

$$C_s = (D_{30})^2 / (D_{10} * D_{60})$$

C_v est le coefficient de symétrie :

$$C_v = (D_{50})^3 / (D_{30} * D_{60})$$

4. Comportement au pic

Concernant le comportement au pic des trois sables testés lors d'essais du cisaillement direct, on a observé que pour les sables de densité forte les courbes contrainte tangentielle-déplacement progressent jusqu'à atteindre le pic puis régressent jusqu'à une stabilisation. Pour ce qui est des sables moyennement denses, c'est le même constat que précédemment,

mais la régression de la contrainte de cisaillement est de moindre importance. Quant aux sables lâches, la courbe est d'une progression continue jusqu'à atteindre une valeur maximale. Ces observations viennent corroborer des travaux antérieurs.

En ce qui concerne la variation volumique des sables testés lors des essais du cisaillement direct, on a observé, pour les sables de densité forte, que l'évolution du volume au cours du cisaillement est marquée par trois phases distinctes. La première phase est celle de l'apparition du phénomène de contractance au début de l'essai, puis le sable a tendance à augmenter de volume progressivement jusqu'à atteindre une valeur maximale puis se stabilise Schlosser [14]. Pour le cas des sables de moyenne densité, on a remarqué que les trois phases déjà citées se reproduisent, avec une variation volumique moindre. Quant aux sables de densité relative lâche, on a pu apercevoir une contractance continue jusqu'à atteindre une valeur minimale.

5. Résultats Expérimentaux

Le tableau 3 montre les mesures du coefficient de frottement et de l'angle de frottement obtenus par d'autres chercheurs; le tableau 4 présente les mesures obtenues du coefficient de frottement interne et de l'angle de frottement pour chaque type de sable.

Type de sable	ϕ	C ₁	ϕ_0	ϕ_{90}	ρ	σ (T/m ²)
TOYOLINA (sable tassé)	0,5	1,45	0,15	0,25	0,825	40
TOYOLINA (sable lâche)	0,45	1,45	0,15	0,25	0,840	35
HOUSTON (sable tassé)	1	2	0,205	0,25	1	45
HOUSTON (sable lâche)	0,8	2	0,205	0,25	0,7	42
HOUSTON (sable dense)	0,2	2	0,205	0,25	0,7	35
CHATELAIN (sable tassé)	0,75	1,75	0,215	0,265	0,785	35

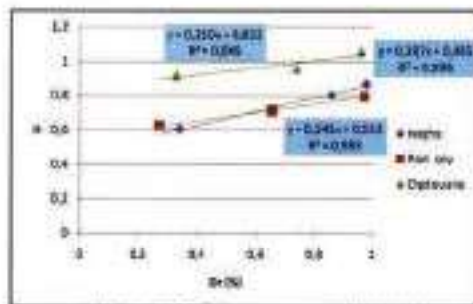
Tableau 3 : Valeurs de l'angle de frottement interne et du coefficient de frottement pour différents sables de référence.

Type de sable	ϕ_0	ϕ_{90}	ϕ_{45}	ρ	σ (kPa)	C ₁	σ'	σ'' (kN/m ²)
TERGLA	0,095	0,5	0,095	0,5	90	1,75	0,062	44,5
TERGLA	0,095	0,5	0,095	0,571	90	1,75	0,789	30,4
TERGLA	0,095	0,5	0,095	0,571	34	1,75	0,482	21,7
CHETOUANE	0,044	0,256	0,044	0,264	90	3	0,065	44,9
CHETOUANE	0,044	0,256	0,044	0,31	75	3	0,399	43,7
CHETOUANE	0,044	0,256	0,044	0,399	33	3	0,613	43,9
PORT SAY	0,03	0,333	0,716	0,33	97	2,4	0,391	34,4
PORT SAY	0,03	0,333	0,716	0,391	27	2,4	0,623	33,8
PORT SAY	0,03	0,333	0,716	0,459	90	2,4	0,597	33,2

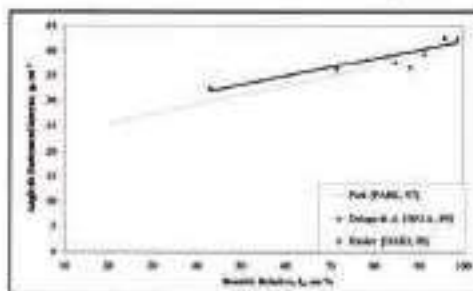
Tableau 4 : Valeurs de l'angle de frottement interne et du coefficient de frottement pour chaque type de sable testé.

La Fig.2 nous montre que la variation du coefficient de frottement μ en fonction de la densité relative I_d est une droite de progression de la forme :

$$\mu = A * I_d + B \tag{8}$$



a) Variation de μ^{int} interne par rapport à la densité ρ



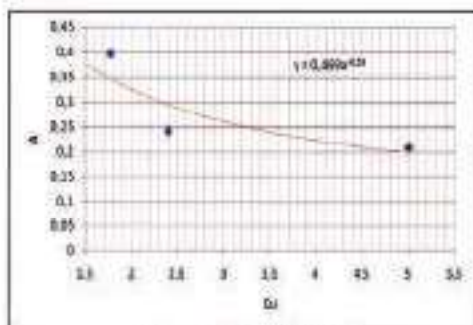
b) Variation de μ^{int} interne par rapport à la densité L_1 , présentée par Park [11], Onda [5] et Hsieh [8].

Figure 2: Variation de μ^{int} interne par rapport à la densité.

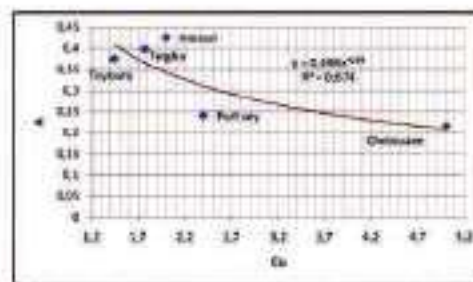
6. Etude paramétrique

On a constaté que les trois sables testés au sein de notre laboratoire et les sables normalisés de France et du Japon, se comportaient aux essais du cisaillement direct différemment suivant leurs coefficients d'uniformité et leurs diamètres moyens. L'intérêt de notre étude est de chercher une corrélation entre le paramètre « A » et le coefficient d'uniformité C_u . A cet effet, on a tracé deux graphes présentés dans la fig.3. Ces deux graphes montrent qu'il y a une corrélation entre le paramètre A et C_u , sous la forme :

$$A = A_1 (C_u)^{-0.54} \tag{9}$$



a) Essais expérimentaux



b) Essais expérimentaux, présentés par Lancelot [9], Sâdjia [15].

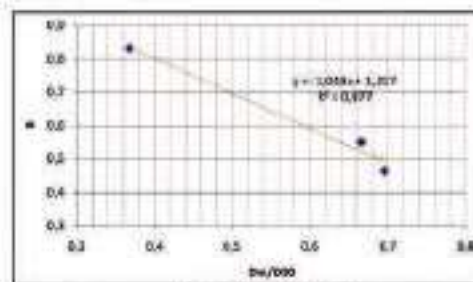
Figure 3: Variation de paramètre « A » en fonction du coefficient d'uniformité.

Ainsi, si on prend les paramètres du graphe (b), on aura donc:

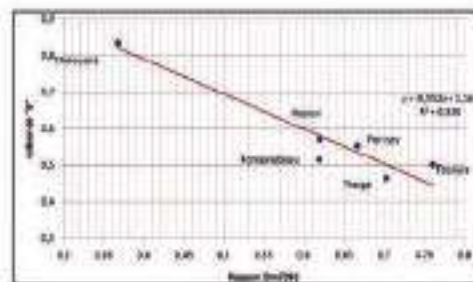
$$A = 0,496(C_u)^{-0,54} \tag{10}$$

Quant à la variation du paramètre «B» en fonction de D_w/D_{50} , on a observé, Fig.4, que cette variation a une allure d'une droite de régression linéaire, l'Eq. (11) s'écrit sous la forme :

$$B = B_1 \left(\frac{D_w}{D_{50}} \right) + B_2 \tag{11}$$



a) Essais expérimentaux



b) essais expérimentaux, présentés par Lancelot [9], Agüero [1] et Sâdjia [15].

Figure 4: Variation du paramètre «B» en fonction du rapport D_w/D_{50} .

Les deux graphes de la Fig.4 montrent qu'il y a une corrélation entre le paramètre « B » et D_w/D_{50} .

Donc on peut écrire :

$$B = -0,952 \frac{D_m}{D_{90}} + 1,169 \quad (12)$$

En substituant les paramètres A et B de l'Eq.(8) par l'Eq.(10) et Eq.(12) on obtient l'Eq.(13) citée ci-dessous :

$$\mu = \left(\frac{0,496}{C_u^{0,54}} \right) I_d - 0,952 \frac{D_m}{D_{90}} + 1,169 \quad (13)$$

où :

I_d : est l'indice de densité du sable; C_u : le coefficient d'uniformité; D_{90} : le diamètre équivalent au passant 90%, et D_m : le diamètre moyen calculé par l'Eq. (14) :

$$D_m = \frac{(0,1 \times D_u) + (0,3 \times D_m) + (0,5 \times D_{90}) + (0,6 \times D_w)}{1,5} \quad (14)$$

On a comparé les résultats expérimentaux des trois sables testés et les autres sables normalisés avec les résultats obtenus par la formule. Ce qui nous a donné une erreur relative moyenne de l'ordre de 2,83%. Les résultats de calcul sont regroupés dans le tableau 5.

SABLE	I_d	C_u	D_u	D_m	D_{90}	μ	μ Calculé	μ mesuré	$\Delta \mu$	Erreur (%)
TERGHA	0,98	1,77	0,295	0,42	0,857	40,61	40,76	0,149	0,4	
TERGHA	0,86	1,77	0,295	0,42	0,814	39,14	38,64	-0,5	1,35	
TERGHA	0,34	1,77	0,295	0,42	0,424	31,97	31,67	-0,3	2,45	
PORT SEY	0,97	2,4	0,32	0,48	0,834	39,84	38,41	-1,43	4,05	
PORT SEY	0,66	2,4	0,32	0,48	0,738	36,44	35,28	-1,16	3,3	
PORT SEY	0,27	2,4	0,32	0,48	0,618	31,71	31,89	0,182	0,52	
CHETOUANE	0,96	5	0,404	1,1	1,019	45,54	46,54	1	2,27	
CHETOUANE	0,74	5	0,404	1,1	0,973	44,22	43,7	-0,52	1,19	
CHETOUANE	0,33	5	0,404	1,1	0,888	41,6	42,39	0,785	1,79	
TOYOUURA [Lancelot]	0,9	1,43	0,19	0,25	0,813	39,13	40	0,872	2,33	
TOYOUURA [Shinjo]	0,49	1,43	0,19	0,25	0,646	32,86	33	0,144	0,94	
HOSTUN [Lancelot]	1	2	0,353	0,57	0,921	42,63	45	2,368	5,83	
HOSTUN [Gay]	0,8	2	0,353	0,57	0,852	40,44	42	1,558	3,83	
HOSTUN [Gay]	0,3	2	0,353	0,57	0,682	34,28	35	0,713	1,76	
FONTAINEBLEAU [Afrani]	0,75	1,73	0,242	0,39	0,838	39,96	38	-1,96	5,17	
Total des erreurs										46,48
Erreur moyenne										2,83

Tableau 5 : Comparaison entre les valeurs mesurées et calculées du coefficient de frottement interne μ

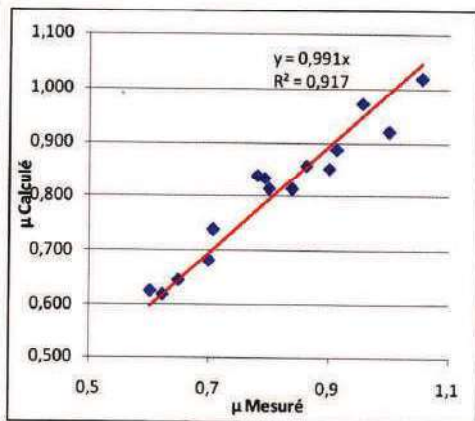


Figure 5 : Comparaison entre les valeurs mesurées et calculées du coefficient de frottement interne μ .

La fig.5 montre que les valeurs du coefficient de frottement calculées sont en général inférieures de 1% à celles tirées de l'expérimental.

7. Etude probabilistique ou domaine de variation du coefficient de frottement

Nous avons, dans cette étude, établi des domaines de variation des trois paramètres ($0 \leq I_d \leq 1$; $1 \leq C_u \leq 20$ et $D_m/D_{90} = f(C_u)$). Comme il est montré dans la fig.6, pour ce dernier paramètre (D_m/D_{90}) la formule qui le relie à C_u , d'après les résultats expérimentaux de Lancelot [9], Afriani [1], Shinjo [15] est sous la forme :

$$\frac{D_m}{D_{90}} = \frac{0,963}{C_u^{0,57}} \quad (15)$$

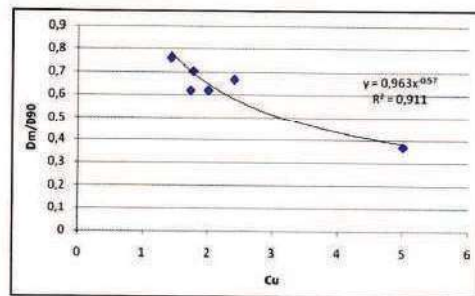


Figure 6 : Variation du rapport D_m/D_{90} en fonction de C_u .

8. Variation de μ en fonction des trois paramètres (I_d , C_u et D_m/D_{90})

En appliquant ces trois domaines de variation dans l'Eq. (13), nous avons obtenu trois graphes donnant la variation du coefficient de frottement en fonction de chaque paramètre :

8. 1. 1^{er} paramètre (indice de densité variable)

La fig.7 montre une probabilité comprise dans le domaine de variation des paramètres C_u (1 à 20) et D_m/D_{90} , μ varie linéairement en fonction de l'indice de densité. En plus, il est compris dans une plage définie par des états limites.

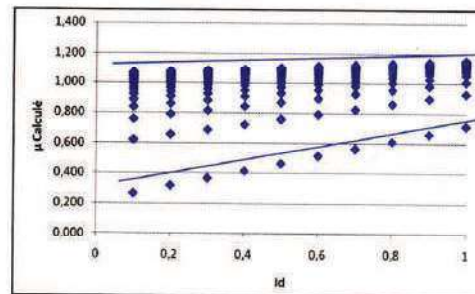


Figure 7 : Variation du coefficient de frottement en fonction de I_d .

* Pour une densité lâche :

$$I_d=0 \rightarrow 0,217 \leq \mu \leq 1,056 \text{ ou } 12,24^\circ \leq \varphi \leq 46,56^\circ$$

* Pour une densité forte :

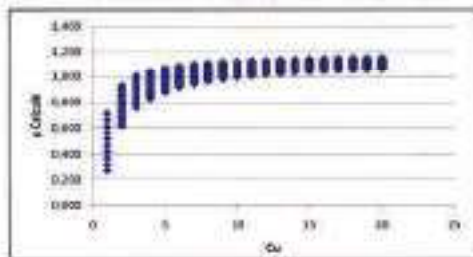
$$I_d=1 \rightarrow 0,713 \leq \mu \leq 1,154 \text{ ou } 35,48^\circ \leq \varphi \leq 49,09^\circ$$

Donc, on peut conclure que l'angle de frottement d'un sable est compris dans un intervalle fermé, c'est-à-dire : $12,24^\circ \leq \varphi \leq 49,09^\circ$ dans un intervalle égal à $1 \leq C_u \leq 20$.

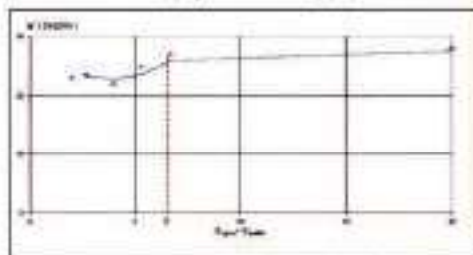
D'autre part, on constate que pour un indice de densité $I_d = 1$, le coefficient de frottement varie peu lorsqu'on augmente C_u par rapport à l'état lâche, ce qui corrobore les travaux de Chevalier [3]. En effet, ce dernier a trouvé que le coefficient de frottement dépend aussi de la discontinuité de la courbe qui, en augmentant, fait croître le coefficient de frottement. Cet effet est pris en compte, dans notre cas, par le rapport D_w/D_{50} .

8. 2. 2^{ème} paramètre (coefficient d'uniformité variable)

La Fig.8 montre que pour une probabilité comprise dans le domaine de variation des paramètres I_d et D_w/D_{50} , la valeur du coefficient de frottement varie hyperboliquement en fonction de C_u pour I_d constant (sables à structures granulaires similaires). C'est-à-dire, lorsqu'on augmente le coefficient d'uniformité jusqu'à la valeur $C_u = 7$, l'angle de frottement croît rapidement. Au delà de $C_u \geq 7$, l'angle de frottement φ croît mais moins rapidement, ce qui corrobore les travaux de Reiffsteck [12]. La même particularité a été observée auparavant sur différents sables dans les travaux de M. Duncan [6] avec une valeur de $C_u = 6$.



(a) probabilité de l'Eq. (13)

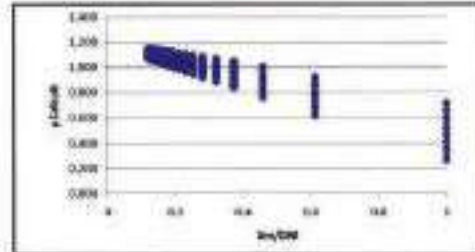


(b) résultats expérimentaux présentés par Reiffsteck [12]

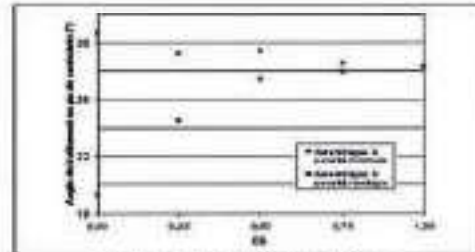
Figure 8 : Variation du coefficient de frottement en fonction de C_u .

8. 3. 3^{ème} paramètre (rapport D_w/D_{50} variable)

La Fig.9 montre que pour une probabilité comprise dans le domaine de variation des paramètres C_u (1 à 20) et I_d (0 à 1), la valeur du coefficient de frottement décroît linéairement lorsque $D_w/D_{50} \rightarrow 1$ ($D_w = D_{50}$, c'est-à-dire pour une courbe continue et monodimensionnelle) pour I_d constant (des sables à structures granulaires similaires). En plus, elle est comprise dans une plage définie par des états limites.



a) Variation du coefficient de frottement calculé en fonction de D_w/D_{50} .



b) variation de l'angle de frottement en fonction de la discontinuité de la courbe granulométrique

Figure 9 : Variation du coefficient de frottement calculé.

* Pour un rapport $D_w/D_{50} = 0,17$

$$\rightarrow 1,056 \leq \mu \leq 1,154 \text{ et } 46,56^\circ \leq \varphi \leq 49,09^\circ$$

* Pour un rapport $D_w/D_{50} = 0,96$

$$\rightarrow 0,217 \leq \mu \leq 0,713 \text{ et } 12,24^\circ \leq \varphi \leq 35,48^\circ$$

9. Conclusion

Dans cet article, on a cerné le comportement du cisaillement de deux sables de mer et d'un sable de carrière, par un essai de cisaillement direct à la boîte de Casagrande, ce qui nous a permis de relever quelques tendances et d'expliquer la physique du contact granulaire régissant le comportement granulaire des sables et de comprendre la cinétique du phénomène de contractance et de dilatance.

Pour la variation de volume, on a remarqué qu'il y a une différence de comportement entre le sable lâche, dont la contractance est continue, et le sable dense

qui se contracte jusqu'à stabilisation puis se dilate en continu jusqu'à une valeur maximale.

D'après cette étude paramétrique, on a constaté que la variation du coefficient de frottement interne varie en fonction de la densité relative de chaque sable; cette variation a l'allure d'une droite de corrélation de progression dont les paramètres « A » et « B » varient en fonction des caractéristiques propres des sables. Pour le cas du paramètre « A », on a constaté qu'il varie inversement par rapport au coefficient d'uniformité. Quant au paramètre « B », il varie proportionnellement au rapport « D_w/D_{50} » où « D_w » est le diamètre moyen, qui joue un rôle seulement sur la valeur initiale du coefficient de frottement interne.

10. Références bibliographiques

- [1] L. Afrani, D. Levacher, M. Khay, et D. Losach, Résistance au cisaillement d'une grave alluvionnaire. VIIème Journées Nationales Génie Civil – Génie côtier, Anglet, France, 15-17 Mai 2002.
- [2] A. I. AL-Mhaidib, Influence of shearing rate on interfacial friction between sand and steel, Engineering Journal of University of Qatar, Vol.19,2006.
- [3] B. Chevalier, G. Combe, P. Villard, Etude du comportement mécanique de matériaux granulaires hétérogènes par simulations numériques discrètes, Bulletin N°268-269 du LCPC, Juil./Août./Sept.2007.
- [4] J. Costet, G. Sanglerat, Bjerrum, Caquot et Kérisel, cours pratique de mécanique des sols 1: Plasticité et calcul des tassements. Ed. Dunod.
- [5] P. Delage, G. Petit, E. De Lauro, Interaction sol-clou : étude à la boîte de cisaillement. Rapport du CERMES-ENPC, Décembre 1989, 90 p.
- [6] M. Duncan, Friction angles for sand, gravel and Rockfill. Notes for a lecture presented at the Kenneth L. Lee Memorial seminar, Long beach, California April 28, 2004.
- [7] Gay O., 2000. Modélisation physique et numérique de l'action d'un glissement lent sur fondation d'ouvrages d'art. Thèse de doctorat en Mécanique, laboratoire 3S, Grenoble1.
- [8] S. Haider, Interaction sol-structure par essais de frottement. DEA : INSA de Lyon, URGC Géotechnique, septembre 1998, 80p.
- [9] L. Lancelot, I. Sharour, Al Mahmoud, comportement du sable d'Hastun sous faibles contraintes, Revue Française de Géotechnique, 1996, N°74, 1er trimestre, PP 63-74.
- [10] Liu S.H., «Simulating a direct shear box test by DEM» Can. Geotech. J. 43: 155-168 (2006).
- [11] H. S. Park, mise en place de canalisation par micro-tunnelage interaction en frottement sol-canalisation, Thèse Génie Civil : INSA, Institut nationale des sciences appliquées, URGC géotechnique, Lyon, Sept, 1997, N°97ISAL0078, 227 P.
- [12] P. Reiffsteck, P.T. Nguyen Pham, Influence de la répartition granulométrique sur le comportement mécanique d'un sol, Bulletin N°268-269 du LCPC, Juil./Août./Sept.2007.
- [13] Reynolds O., Phil. Mag, fifth series, 20, p. 469.
- [14] Schlosser F., Guilkoux A. Le frottement dans le renforcement des sols. Revue Française de Géotechnique, 1981, n°16, août, pp. 65-77.
- [15] T. Shinjo, Y. Komiya, K. Nagayoshi and M. Kuniyoshi, effects of particle size and roughness on interface behavior of sand and steel, University of the Ryukyus, 54, 2004.
- [16] K. Totiyama, shearing properties of uniformly graded gravels, Bull. Fac. Agr. Shimane University, 28: 67-73, December 20, 1994.