



COMPORTEMENT MECANIQUE D'UN SOL EXPANSIF STABILISE PAR AJOUT DE SABLE DE DUNE

M.K. GUEDDOUDA, I. GOUAL, M. LAMARA, M.S. GOUAL

Laboratoire de recherche de Génie civil, Université Amar Teledji. B.P 35 G. Laghouat, Algérie

Corresponding author: gueddouda_mk@yahoo.fr

Résumé: Cet article présente une étude sur trois sols provenant d'une région aride du sud de l'Algérie (Laghouat), où des dégâts ont été enregistrés (endommagement des structures, fissuration et destruction partielle des chaussées). Dans la première étape, le gonflement des sols est estimé par des méthodes indirectes basées sur les caractéristiques géotechniques, suivi par des mesures directes des paramètres de gonflement (taux et pression de gonflement), par la suite, la mesure des suctions (totale et matricielle) a été effectuée. La seconde étape de cette investigation a porté sur l'effet de l'ajout du sable dunaire sur le potentiel de gonflement du sol. L'ajout du sable de dunes a conduit à une réduction importante des paramètres de gonflement. Enfin, une étude de la résistance au cisaillement du sol stabilisé est effectuée pour différents états de saturation. Les résultats montrent qu'il y a une augmentation de résistance au cisaillement avec le pourcentage de sable ajouté.

Mots clés : sols expansifs, stabilisation, succion, résistance au cisaillement, Algérie.

Abstract: This study has been conducted on three types of soils extracted from the region of Laghouat in the south of Algeria, where damages has been recorded (damage of structure, cracking and partial destruction of road pavements). In the first stage the swelling of soils is estimated using indirect methods based on the geotechnical characteristics than the swelling parameters are measured, thereafter the measurement of different components of suction (total and matriciel) is realised. The second stage of this investigation is concerned with the study of the effect of dune sand addition on the swelling potential of soils. Sand addition leads to a substantial reduction in the swelling parameters. By the end, a study of stabilized soil strength is achieved at different state of saturation. The results show that an increase of soil strenght with percentage of sand addition.

Key words : expansive soils, stabilisation, suction, shear strength, Algeria

I. Introduction

Le sol à l'état non saturé est un milieu polyphasique et hétérogène, son comportement est extrêmement complexe. Des interactions prennent place entre les différentes composantes : grains solide eau sous différentes formes (adsorbée, capillaire et libre) et air. Cette activité interfaciale peut engendrer des phénomènes tels que la capillarité, l'adsorption, le gonflement et le retrait des sols.

Certains sols argileux soumis aux variations de la teneur en eau peuvent augmenter ou diminuer de volume. Ces phénomènes cycliques, de gonflement-retrait, provoquent des contraintes parasites dans les structures. Ces contraintes ont de grandes conséquences à caractère pathologique sur les constructions fondées sur ces sols tels que : destruction de chaussées, fissuration de bâtiments et glissement de terrains. De plus, la variation de taux d'humidité dans les sols gonflants a une grande influence sur leurs comportements mécaniques, comme le changement de structure et la diminution de la résistance au cisaillement.

Le travail présenté dans cet article consiste, en une première étape, à estimer le potentiel de gonflement en se basant sur les propriétés géotechniques et les mesures directes des paramètres de gonflement (taux et pression de gonflement) des sols provenant d'une région aride au sud de l'Algérie (Laghouat, base de vie station de pompage N°5, noté par B.V.S.P.5, Sonatrach)(Lamara et al., 2005). Par la suite, la mesure de la succion (totale, matricielle) des sols est effectuée à l'aide de la méthode de papier filtre.

Dans une seconde étape, l'étude a porté sur l'effet de l'ajout de sable dunaire à différents pourcentages sur le potentiel, la pression de gonflement et la succion.

Enfin, une étude de la résistance au cisaillement des sols traités et non traités pour différents états de saturation est réalisée. Pour montrer l'effet de la succion sur la résistance au cisaillement des sols non saturés, on a mesuré, à la fin de l'essai de cisaillement, la succion matricielle de chaque échantillon.

II. Caractérisation des sols

Deux matériaux locaux ont été utilisés dans ce travail : les sols argileux et le sable de dune.

II.1. Sols argileux

Trois prélèvements de sols ont été effectués à différents points et à des profondeurs variables, d'une même zone située à 20 km au nord ouest de la ville de Laghouat (400 km au sud de la capitale Alger). Les résultats des essais d'identification des sols sont résumés

Tableau.1: Essais d'identifications des argiles

| | E1 | E2 | E3 |
|-------------------------------------|-------|-------|-------|
| Z (m) | 00,50 | 03,00 | 01,50 |
| C ₂ < 2 μm | 30,14 | 35,74 | 32,33 |
| w _{opt} (%) | 16,00 | 15,00 | 15,20 |
| γ _d (kN/m ³) | 18,37 | 18,20 | 17,78 |
| w _L (%) | 42,00 | 69,00 | 41,00 |
| w _p (%) | 23,55 | 33,52 | 26,14 |
| W _R (%) | 16,29 | 11,66 | 17,07 |
| I _p (%) | 18,45 | 35,48 | 14,86 |
| I _R (%) | 25,71 | 57,34 | 23,93 |
| A | 00,37 | 00,53 | 00,27 |
| SS _t (m ² /g) | 175,0 | 350,7 | 147,0 |
| e ₀ | 0,351 | 00,41 | 00,62 |
| C _c | 00,17 | 00,15 | 00,23 |
| C _g | 00,04 | 00,16 | 00,05 |

dans le tableau 1.

D'après les analyses chimiques, les principaux constituants des trois sols sont : la silice, l'alumine et la calcite (tableau 2). Les trois sols présentent des pourcentages en SiO₂ inférieurs à 80%, ce pourcentage est la frontière entre les sols gonflants et non gonflants (Hachichi et Fleureau, 1999 ; Hachichi et al., 2003), ce qui permet de dire que ces sols auraient tendance de gonfler.

II.2 Sable de dune

Comme la région de Laghouat est considérée comme une région saharienne, la zone de provenance du sable de dune est située dans les environs très proches de la ville de Laghouat (Oasis Nord). Les résultats des essais d'identification du sable dunaire sont inclus dans le tableau 3.

Tableau 2 : Analyses chimiques des argiles

| symboles | Les échantillons | | |
|----------------------------------|------------------|-------|-------|
| | E1 | E2 | E3 |
| SiO ₂ % | 54,45 | 58,94 | 50,95 |
| Al ₂ O ₃ % | 5,65 | 6,03 | 5,25 |
| CaCO ₃ % | 20,78 | 17,70 | 23,24 |
| NaCl % | 0,18 | 0,12 | 0,23 |
| Fe ₂ O ₃ % | 3,03 | 1,02 | 2,13 |
| SO ₄ % | 3,12 | 3,25 | 1,85 |
| P.F % | 12,83 | 12,83 | 17,05 |
| H ₂ O% | 5,26 | 3,36 | 11,15 |
| CO ₂ % | 8,57 | 9,47 | 5,90 |
| M.O% | ----- | ----- | ----- |

Tableau 4 : Analyse chimique du sable de dune

| | |
|-----------------------|-------|
| SiO ₂ (%) | 95,87 |
| SO ₃ (%) | 00,91 |
| Cl ⁻ (%) | 00,36 |
| CaCO ₃ (%) | 02,50 |
| MO (%) | ---- |

III. Etude du gonflement

Les argiles gonflantes ont des caractéristiques physiques bien spécifiques, permettant d'avoir une idée préliminaire sur leur potentiel de gonflement. Pour quantifier ce potentiel, la mesure directe de ces paramètres est nécessaire.

III.1. Mesure indirecte du potentiel de gonflement

Plusieurs approches empiriques, proposées par différents auteurs sont, utilisées pour l'estimation du potentiel de gonflement, (tableau 5). Ces approches sont basées sur les caractéristiques physiques du sol, faciles à déterminer en laboratoire ; (Skempton (1953) ; Holtz et Gibbs (1956) ; Seed et al (1962) ; Ranganathan et Satyanaryana (1965) ; Vijayverjya et Ghazzaly (1973) ; Williams et Donaldson (1980) ; Mouroux et al (1988)).

Toutes les classifications montrent que le sol E2 a une tendance au gonflement plus importante, ce qui est en accord avec le minéral prédominant qui est la Montmorillonite. Les sols E1 et E3 présentent un potentiel de gonflement faible à moyen.

Pour confirmer cette classification, des mesures directes du potentiel de gonflement sont indispensables.

Tableau3 : Paramètres d'identifications de sable de dune

| | |
|-------------------------|-------|
| Cu | 01,67 |
| Cc | 01,10 |
| ES _V (%) | 86,17 |
| ES _P (%) | 74,20 |
| V _B | 0,067 |
| Sst (m ² /g) | 01,40 |

D'après la classification des sols LCPC, le sable de dune se classe parmi les sables propres mal gradués, de granulométrie moyenne. Sa courbe est uniforme et très peu étalée.

Une observation importante a été fournie par des analyses chimiques : il s'agit de la présence d'une large quantité de silice qui est supérieure à 80%, et par conséquent, le sable de dune de la région de Laghouat est un sable siliceux (tableau 4).

Tableau 5 : Estimation indirecte du potentiel de gonflement des sols

| Les auteurs | Paramètres | E1 | E2 | E3 |
|--------------------------|--|----------------|-----------|----------------|
| Ranganathan et al (1956) | I _R | moyen | fort | bas |
| Snethen (1977) | I _P | moyen | haut | bas |
| Snethen et al., (1977) | W _L | non critique | élevé | non critique |
| Serratos (1957) | W _R | moyen | marginale | moyen |
| Seed et al., 1962 | Ac ₁ , C ₂ | faible à moyen | élevé | faible à moyen |
| Snethen (1977) | I _P , W _L | moyen | élevé | faible |
| Holtz et Gibbs(1956) | C ₁ , I _P , W _R | faible à moyen | important | faible à moyen |
| Snethen (1977) | I _P , W _L , W _R | moyen | élevé | faible |

III.2. Mesure directe du potentiel de gonflement

Le but de cette mesure est de déterminer les paramètres de gonflement (taux et pression de gonflement) de trois sols sur des échantillons reconstitués par le compactage quasi-statique à l'aide d'une presse de vitesse lente (1 mm/min), à une teneur en eau de 15% et à un poids volumique sec de 18,2 kN/m³. Les dimensions des échantillons sont respectivement : hauteur H=20 mm, diamètre D = 50 mm.

Les essais de gonflement libre sont effectués dans un œdomètre classique. L'échantillon est placé dans une cellule cylindrique entre deux pierres poreuses. Puis, suite à l'inondation, il est autorisé à gonfler verticalement sous la pression du piston durant plusieurs jours jusqu'à la stabilisation (Serratrice et Soyez, 1996). La valeur finale permet de calculer la variation relative du volume de l'échantillon, noté G, que l'on exprime souvent en pourcentage, il est déterminé d'après la formule suivante :

$$G(\%) = \frac{H_f - H_0}{H_0} \cdot 100 \quad (1)$$

H₀ : hauteur initiale.

H_f : hauteur finale après stabilisation

La pression de gonflement est la pression nécessaire pour ramener le sol à son volume initial après son gonflement. Plusieurs méthodes existent pour mesurer cette pression, et on a utilisé la méthode de gonflement à volume constant selon la norme ASTM1 D 4546-90 :

La tendance de l'échantillon à gonfler est neutralisée par l'application d'une charge croissante dès que le déplacement vertical atteint 1/100 mm. La valeur de la charge lorsque l'échantillon est stabilisé est la pression de gonflement (Serratrice et Soyez, 1996).

III.3. Résultats

En ce qui concerne le potentiel de gonflement, la figure 1 montre l'évolution du gonflement libre en fonction du temps pour les trois sols. On constate qu'au début de l'inondation, les sols gonflent d'une manière

similaire, mais par la suite le sol E2 présente un taux de gonflement plus important (figure 1). Ces résultats montrent un caractère expansif du sol E2 et confirment les constatations obtenues à l'aide des méthodes indirectes.

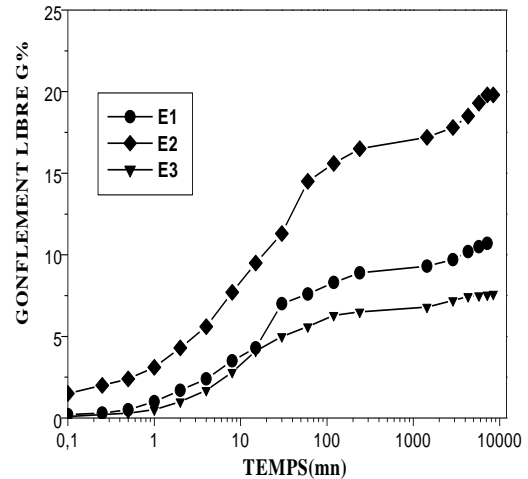


Fig. 1 : Evolution du gonflement en fonction du temps

IV. Mesure de la succion des sols

Dans cette étude, on a utilisé la méthode de papier filtre. Cette méthode permet de mesurer soit la succion totale quand le papier filtre n'est pas en contact avec le sol, soit la succion matricielle quand le papier filtre est en contact avec le sol (figure 2).

Les échantillons sont préparés à des densités sèches maximales correspondantes à l'optimum Proctor et pour des teneurs en eau initiales variables, du côté sec et humide de l'optimum, (5%, 10%, 15%, 20% et 25%)

La courbe d'étalonnage diffère selon qu'il s'agit de papier filtre sec ou humide. D'après ASTM D-5298-94 (état sec) :

$$\log s = 5,327 - 0,0779 w_f \text{ pour : } w_f < 45,3 \%$$

$$\log s = 2,412 - 0,0135 w_f \text{ pour : } w_f > 45,3 \%$$

Pour le même papier filtre (état sec), cette corrélation s'exprime d'après Amraoui (1996) par :

$$\log s = 5,3344 - 0,0882 w_f \text{ pour : } w_f < 39,8 \%$$

$$\log s = 2,4778 - 0,0165 w_f \text{ pour : } w_f > 39,8 \%$$

w_f : teneur en eau du papier filtre (%)

s : succion en kPa

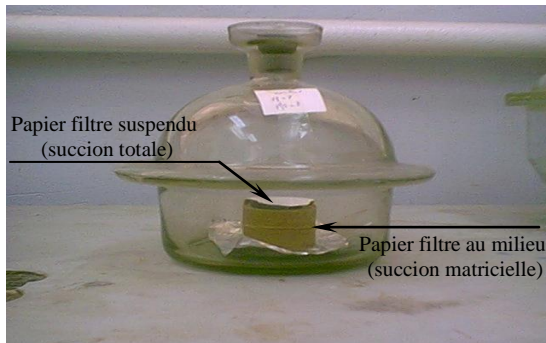


Fig. 2 : Dessiccateur (mesure de la succion)

IV.1. Résultats et discussions

En général, les valeurs des succions obtenues par la méthode ASTM sont légèrement supérieures à ceux obtenues par la méthode d'Amraoui (1996). La figure 3 représente graphiquement les mesures de ces succions pour chaque type de sol (résultats d'après ASTM). On note à partir des courbes obtenues que les succions sont inversement proportionnelles aux teneurs en eau initiales. Le sol *E2* présente des succions totales et matricielles plus élevées comparés aux sols *E1* et *E3*; cela explique que le sol *E2* a tendance à gonfler plus que les autres types de sols.

On remarque que les succions matricielles et totales pour les trois sols sont similaires, ce qui veut dire que la succion osmotique est négligeable.

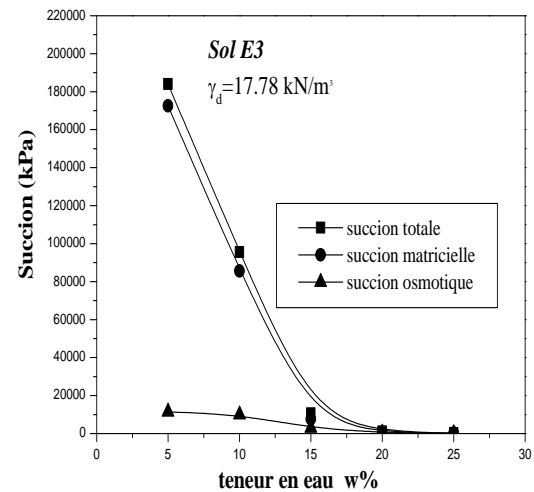
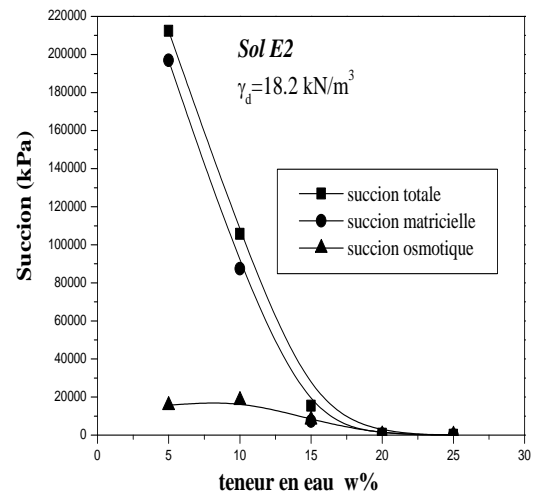
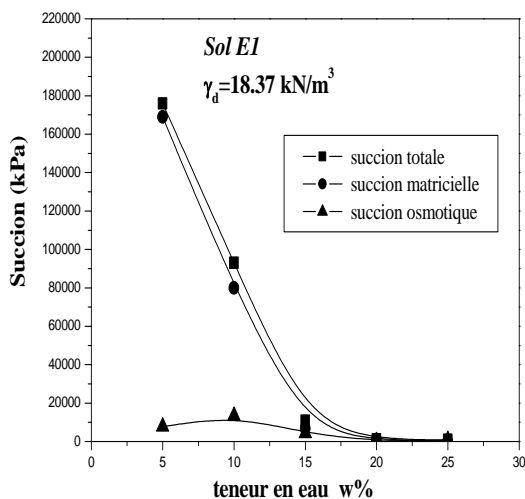


Fig.3 : Succions totales, matricielles et osmotiques des sols argileux.

V. Stabilisation du sol par ajout de sable de dune

Stabiliser un sol, c'est modifier certaines de ces propriétés en vue d'améliorer ses performances techniques. Il existe plusieurs techniques de stabilisation, parmi elles, la stabilisation par ajout de sable. C'est vers les années soixante dix que des auteurs ont étudié l'influence de l'ajout de sable sur les sols gonflants. L'emploi du sable comme matériau traitant est une technique assez récente. Elle consiste à ajouter une quantité de sable au sol gonflant. Des études récentes ont été menées par de nombreux chercheurs (Kaoua et al., 1994 ; Bouzid, 1997 ; Bengraa et al., 2005, Lamara et al., 2006 ; Gueddouda et al., 2007)), elles montrent que l'ajout de sable réduit la



plasticité du mélange argile-sable, et par conséquent son potentiel de gonflement.

Sur la base des résultats obtenus, on a choisis le sol E2 pour l'étude de la stabilisation par ajout de sable de dune. Les pourcentages de sable considérés dans cette étude sont : 15%, 30% et 45%.

V.1. Effet de l'ajout du sable dunaire sur le potentiel de gonflement

La figure 4 montre la représentation graphique de l'évolution du taux de gonflement en fonction de temps pour les mélanges argiles-sable. L'allure de la courbe d'évolution de gonflement dans le temps est la même pour tous les mélanges. Cependant, plus le pourcentage de sable augmente, plus le potentiel de gonflement diminue. Cela peut s'expliquer comme suit :

- A faibles pourcentages de sable ajouté (15%), les particules de sable sont dispersées dans la masse argileuse. L'effet de l'ajout de sable sur la structure de la masse de sol argileux est faible et par conséquent la réduction du gonflement n'est pas importante.
- A moyen et fort pourcentage de sable ajouté (30% et 45%), la quantité de sable additionnée permet de créer des vides plus au moins importants à l'intérieur de la masse du sol, ce qui permet d'encaisser, au sein de la structure, les variations de volume expérimentées par les particules argileuses et conduit à une réduction du potentiel de gonflement.

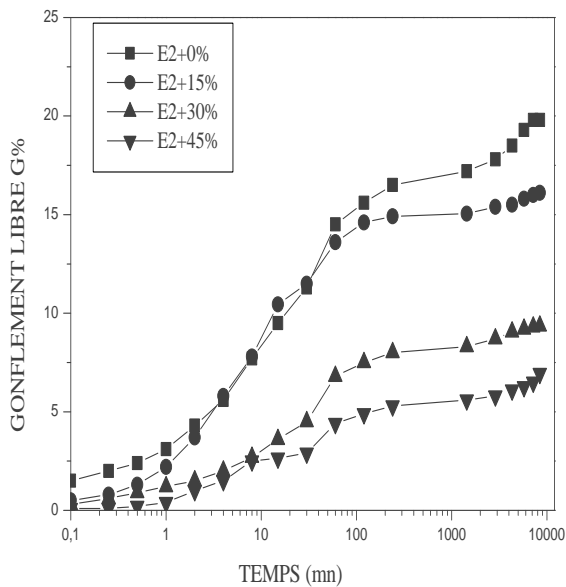


Fig.4 : Evolution du gonflement des mélanges argile-sable en fonction du temps

La figure 5, montre l'effet de l'ajout de sable sur la pression de gonflement, il y a une réduction de la pression proportionnelle au pourcentage de sable ajouté.

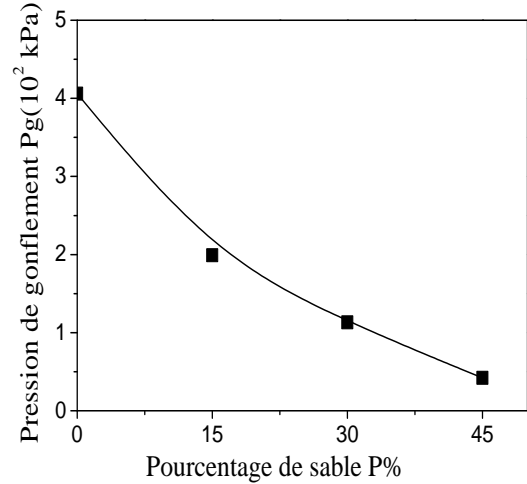


Fig. 5: Variation de la pression de gonflement Pg en fonction du pourcentage de sable

V.2. Effet de l'ajout du sable dunaire sur la succion

Dans cette partie, on a étudié l'effet de l'ajout de sable de dune sur la succion matricielle. La méthode de mesure utilisée est celle du papier filtre (état sec).

Comme la succion est un phénomène relié aux dimensions de pores dans une masse de sol, et vu que l'addition de sable conduit à une augmentation de la taille des pores, par conséquent l'ajout de sable de dune entraîne une diminution de la succion dans le sol ; ce qui est bien montré par les courbes de la figure 6.

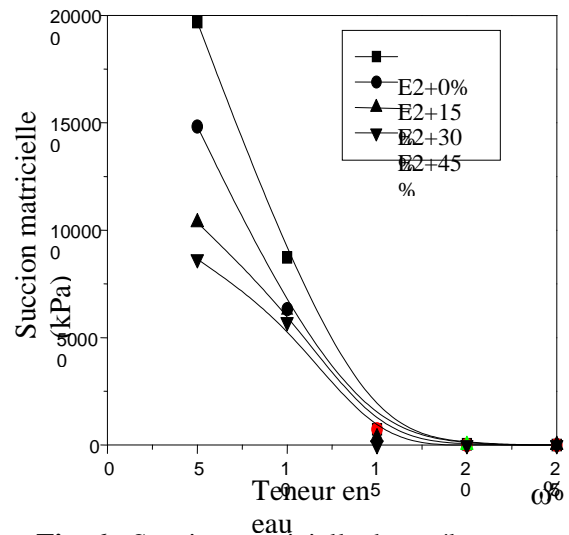


Fig. 6 : Succion matricielle des mélanges argile-sable (Selon ASTM)

VI. Resistance au cisaillement

Le comportement mécanique du sol peut être décrit, d'une manière satisfaisante, à l'aide du principe des contraintes effectives. La résistance au cisaillement d'un sol saturé peut être définie en termes de contraintes totales ou en termes de contraintes effectives.

$$\tau_f = c + \sigma \operatorname{tg} \varphi \quad (3)$$

$$\tau_f = c' + \sigma' \operatorname{tg} \varphi' \quad (4)$$

c et c' : cohésion totale et effective

φ et φ' : angle de frottement total et effectif

Fredlund et Morgenstern (1977) suggèrent que le comportement mécanique des sols non saturés est mieux représenté par l'emploi de deux composantes de contraintes, la contrainte totale nette ($\sigma - u_a$) et la succion ($u_a - u_w$) comme variables d'état indépendantes.

Une relation de contrainte au cisaillement pour les sols non saturés a été proposée par Fredlund et Morgenstern (1977) sous la forme suivante:

$$\tau_f = c' + (\sigma - u_a)_f \operatorname{tg} \varphi' + (u_a - u_w)_f \operatorname{tg} \varphi^b \quad (6)$$

Avec :

c' : cohésion effective

$(\sigma_f - u_a)_f$: contrainte normale nette à la rupture

$(u_a - u_w)_f$: succion matricielle à la rupture.

φ' : angle de frottement interne associé à $(\sigma_f - u_a)_f$.

φ^b : angle relative à la contrainte de cisaillement et à la succion matricielle $(u_a - u_w)_f$.

Dans le cas des sols non saturés, la représentation graphique est tridimensionnelle (figure 7).

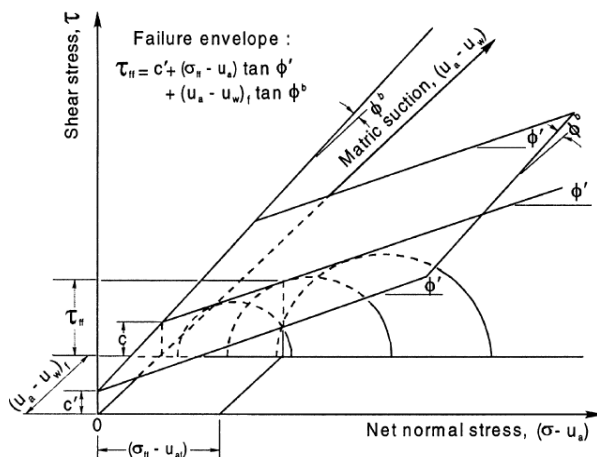


Fig. 7 : Enveloppe de rupture Mohr- Coulomb pour les sols non saturés.(D'après Fredlund et al., 1993).

Le plan frontal représente le cas limite des états saturés où la succion matricielle est nulle. L'enveloppe de Mohr-Coulomb étendue à la rupture peut être plane ou curviligne. L'intersection de l'enveloppe de rupture avec l'axe des contraintes au cisaillement donne la cohésion c' . La résistance au cisaillement est proportionnelle aux variables d'états, sa variation avec la contrainte normale nette est caractérisé par l'angle de frottement φ' , cependant, sa variation avec la succion est représentée par un nouvel angle noté φ^b :

$$\varphi^b = \operatorname{Arc} \operatorname{tg} \left(\frac{\Delta \tau}{\Delta s} \right) \quad (7)$$

avec : s : la succion ($s = u_a - u_w$)

Dans cette étude, on a utilisé l'essai de cisaillement direct pour déterminer les caractéristiques mécaniques de différents types de sols (sable de dune, argile E2 et mélange argile-sable), cas d'essai non consolidé non drainé noté UU, la vitesse de cisaillement est de 0,5 mm/min.

Les sols sont testés à des teneurs en eau variables ($w < w_{\text{opt}}$, $w = w_{\text{opt}}$, $w > w_{\text{opt}}$ et w_{sat}).

IV.1 Préparation des échantillons

Les échantillons sont préparés par un compactage statique ($\gamma_d = 18,2 \text{ kN/m}^3$, forme prismatique $6 \times 6 \times 2 \text{ cm}^3$).

IV.1.1 Etat du sol saturé

Les échantillons des mélanges argile-sable sont préparés à des teneurs en eau de compactage selon les paramètres de Proctor Normal de chaque type de sol. Lorsque l'échantillon est mis dans la boîte de cisaillement, il est inondé immédiatement sous la seule pression du piston. Après saturation et stabilisation du gonflement, qui durera généralement plusieurs jours (5-7 jours) (Chen, 1988), l'essai de cisaillement commence.

IV.1.2 Etat du sol non saturé

Pour la préparation des échantillons, les mêmes étapes ont été suivies pour le cas saturé que pour les sols non saturés, sauf que les échantillons sont cisailés à des teneurs en eau qui sont :

- Teneur en eau du côté sec de l'optimum ($w\% = w_{\text{opt}}\% - 5\%$) ;
- Teneur en eau optimale ($w_{\text{opt}}\%$) ;
- Teneur en eau du côté humide de l'optimum ($w\% = w_{\text{opt}}\% + 5\%$) .

VI.2. Effet de l'ajout de sable dunaire sur la résistance au cisaillement

D'après les résultats montrés sur la figure 8, on peut tirer les constatations suivantes :

- l'ajout de sable améliore les caractéristiques mécaniques des sols stabilisés ;
- l'augmentation de l'angle de frottement interne est notable (plus de 100 %) pour un pourcentage de sable de 45 %. Par exemple pour une teneur en eau optimale, l'angle de frottement de pic passe de 16 degrés (E2 + 0 %) à 34 degrés (E2 + 45 %). Sachant que l'angle de frottement de sable de dune mesuré est de 43 degrés ;
- les mêmes constatations qu'on peut tirer pour la cohésion.

VI.3. Effet de la succion sur la résistance au cisaillement.

Après avoir effectué les essais de cisaillement, on s'intéresse à la mesure de la succion matricielle par la méthode du papier filtre (ASTM) sur les échantillons cisailés (figure 9). Les résultats de la variation de quatre paramètres (teneur en eau initiale, contrainte verticale, résistance au cisaillement et succion matricielle) sont données dans le tableau 6. Les conclusions, que l'on peut tirer de cette étude sont les suivantes :

- la succion mesurée à la fin de l'essai de cisaillement augmente avec la contrainte verticale (tableau 7), ceci peut s'expliquer par l'effet de la contrainte de confinement qui empêche la dilatation de l'échantillon au moment du cisaillement ;
- la résistance au cisaillement augmente d'une manière proportionnelle avec la succion matricielle ;
- pour un pourcentage de sable de 45 %, la succion matricielle est réduite d'environ 50 % (tableau 6). Cependant, la résistance au cisaillement augmente, celui-ci étant attribué à l'augmentation de l'angle de frottement du mélange, ce qui compense cette réduction ;
- les résultats du sol E2 + 0 % sont analysés par une représentation tridimensionnelle dont l'axe des abscisses représente les succions matricielles, l'axe des ordonnées les contraintes verticales appliquées et l'axe des Z les contraintes de cisaillements maximale (figure 10).

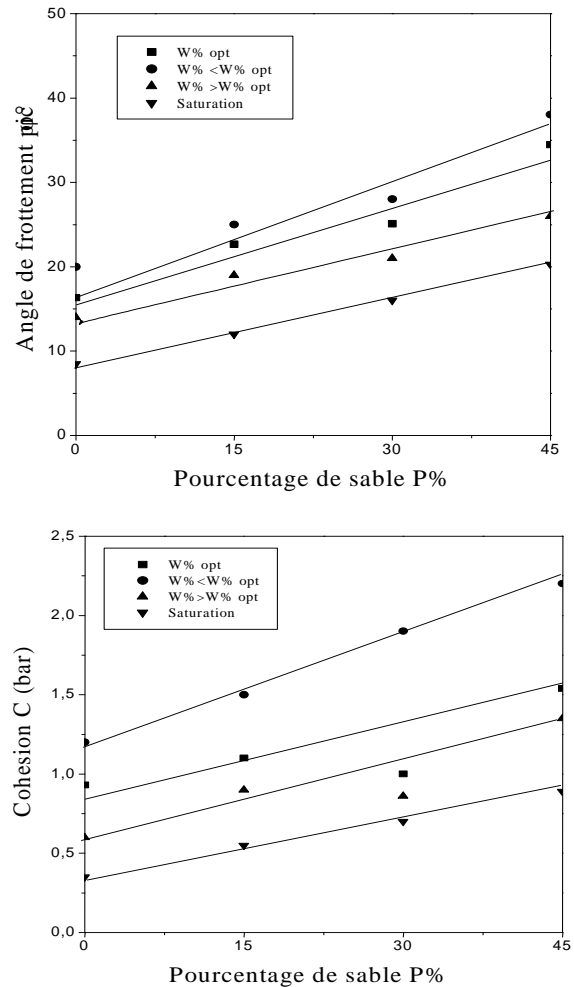


Fig. 8 : Effet de l'ajout de sable sur les paramètres mécaniques

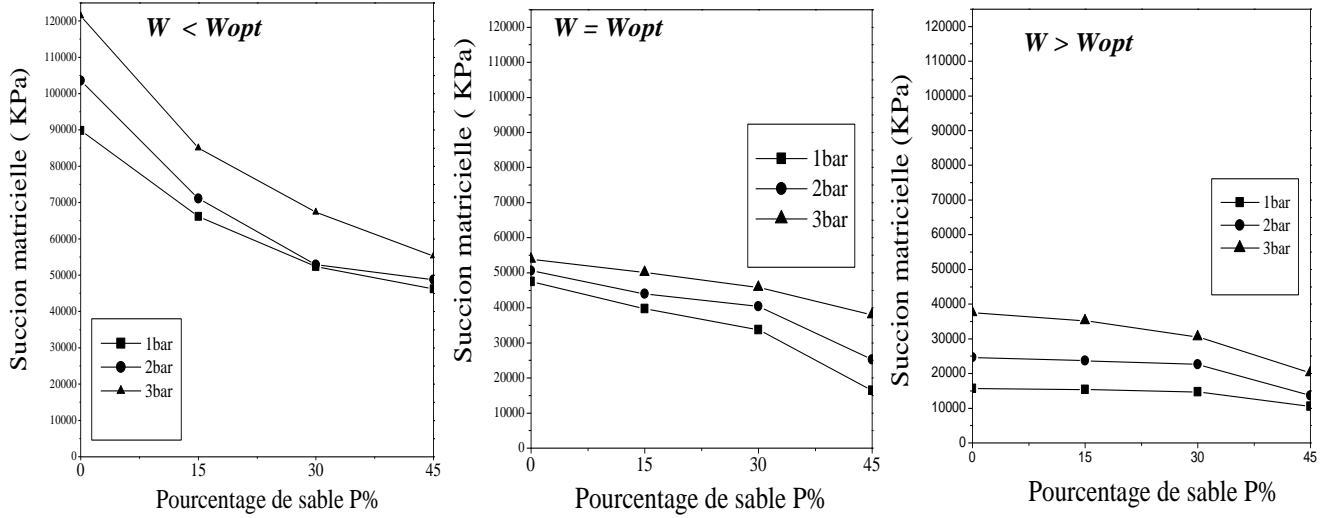


Fig. 9 : Influence de l'ajout de sable sur la succion matricielle (ASTM).

Tableau 7 : Variation de la résistance au cisaillement en fonction de la succion

| Echantillon | w (%) | $\sigma_1 = 100\text{kPa}$ | | $\sigma_2 = 200\text{kPa}$ | | $\sigma_3 = 300\text{kPa}$ | |
|-----------------|-------|----------------------------|---------|----------------------------|----------|----------------------------|----------|
| | | τ (kPa) | s (kPa) | τ (kPa) | s (kPa) | τ (kPa) | s (kPa) |
| E2 +0 % | 10 | 159 | 89876,9 | 198 | 103609,6 | 232 | 121392,4 |
| | 15 | 124 | 47482,7 | 151 | 50559,2 | 185 | 53835,1 |
| | 20 | 100 | 15625,6 | 135 | 24687,1 | 175 | 37485,7 |
| E2 +15 % | 08,50 | 193 | 66168,3 | 271 | 71090,2 | 290 | 85056,9 |
| | 13,50 | 150 | 39685,8 | 183 | 43958,1 | 227 | 50107,8 |
| | 18,50 | 130 | 15326,1 | 168 | 23647,3 | 200 | 35214,3 |
| E2 +30 % | 07,00 | 237 | 52405,8 | 267 | 52877,9 | 318 | 57323,1 |
| | 12,00 | 150 | 33769,5 | 193 | 43409,5 | 245 | 49838,8 |
| | 17,00 | 143 | 14652,7 | 185 | 22659,5 | 254 | 30514,4 |
| E2 +45 % | 05,25 | 258 | 46222,1 | 361 | 48777,6 | 375 | 55303,1 |
| | 10,25 | 233 | 16478,8 | 336 | 25253,8 | 353 | 38013,6 |
| | 15,25 | 215 | 10568,5 | 285 | 13598,5 | 315 | 20156,9 |

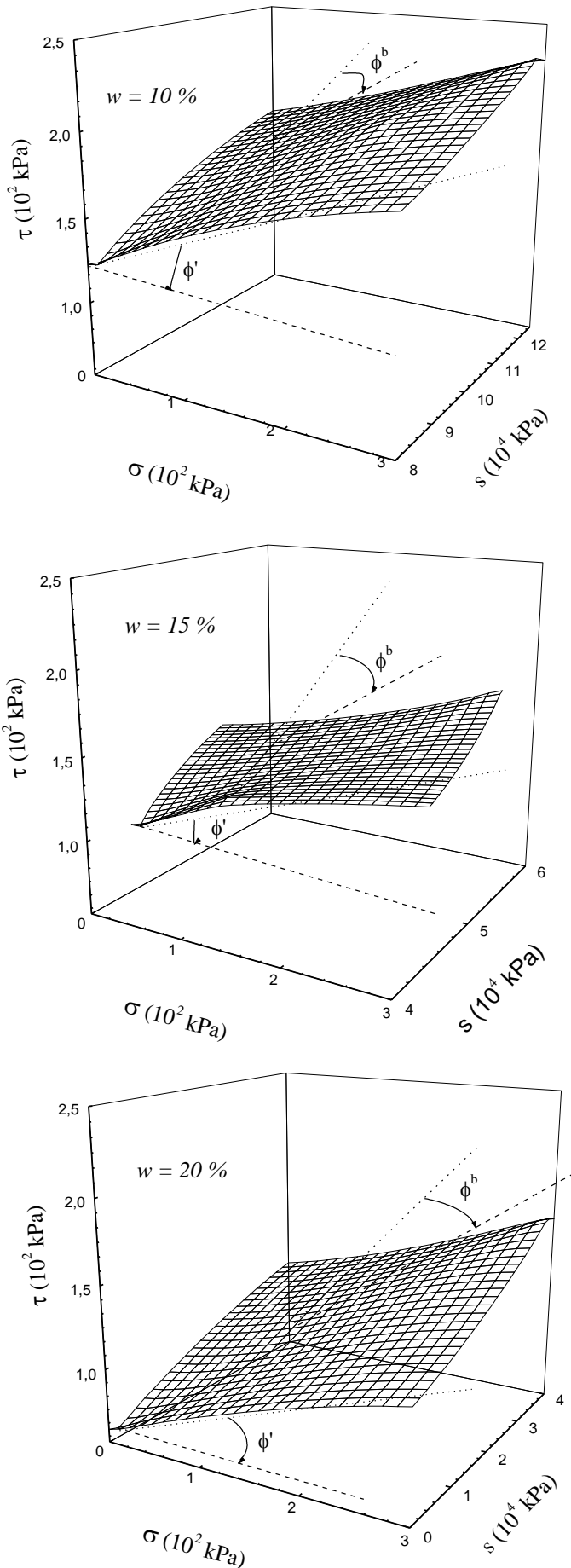


Fig.10 : variations de s , de σ et de τ en fonction des teneurs en eau initiales de l'argile E2

VII. Conclusions

Le mouvement alterné retrait-gonflement des sols argileux de la région de Laghouat provoque des dommages importants. Des dommages peuvent être aussi causés par la perte de résistance du sol, quand une hydratation inattendue survient, qui mène souvent à des glissements de terrains imprévisibles.

L'effet de l'ajout de sable de dune entraîne une réduction progressive des paramètres de gonflement. La réduction est de l'ordre de 65 % pour le potentiel de gonflement et plus de 85% pour la pression de gonflement pour un pourcentage de sable ajouté égale à 45 % ; L'ajout de sable aux sols expansifs augmente la résistance de cisaillement dans les deux états, saturé et non saturé. Ce qui est une bonne indication concernant la capacité portante des sols stabilisés ;

La succion est inversement proportionnelle au pourcentage de sable de dunes ajoutés, dû au changement de la structure à l'intérieur de la matrice argileuse traduite par l'augmentation des dimensions des pores et, par conséquent, par l'augmentation de rayon des ménisques interface eau-air ;

L'ajout de sable a le même effet pour le potentiel de gonflement que pour la succion. La succion et le gonflement sont deux phénomènes qui dépendent de la structure de sol ;

La succion dans le sol agit comme une pression de confinement isotrope. Donc, l'augmentation de la succion conduit à une augmentation de la résistance au cisaillement. Ce résultat est en bon accord avec plusieurs auteurs (Zerhouni, 1991 ; Fredlund et Rahardjio, 1993).

Enfin, vu l'abondance de sable de dune comme matériau local à des prix raisonnables au niveau de la région, la technique de stabilisation par ajout de sable de dune s'impose comme une alternative efficace et économique pour le traitement des argiles gonflantes. Par ailleurs, d'après les résultats obtenus, on peut avancer que la stabilisation par l'ajout de sable de dunes devient significative pour des pourcentages au-delà de 30% de la masse du sol stabilisé, entraînant une réduction de potentiel de gonflement et une amélioration globale de la résistance mécanique.

VIII. References

- [1] Aitchison G.D., Relationship of moisture, stress and effective stress functions in unsaturated soils". Pore Pressure and Suction in Soils, *Butterworth: Londres*, 1961, pp. 47-52.
- [2] Amraoui N., Etude de l'infiltration dans les sols fins non saturés, Thèse de docteur de l'I.N.P.L .Ecole nationale supérieure de Géologie de Nancy, 1996, 325 pages.
- [3] Bengraa L. Hachichi A., Bourokba S., Benaissa A., Stabilisation des argiles gonflantes par ajout de sable de carrière, application aux sols d'Oran , *2^{ème} Journées d'études sur les sols gonflants* , Tlemcen., Algérie 13-14, novembre,2005. pp.129-139.
- [4] Bishop A.W., The measurement of pore pressure in the triaxial test in pore pressure and suction in soils, *Butterworths , London*. 1960
- [5] Bouzid F., Etude de l'aspect physico-chimique des caractéristiques mécaniques d'une argile gonflante : Bentonite, Thèse de Magister (Université des Sciences et de la technologie Houari Boumediene Alger.1997, 112 pages
- [6] Chen F.H., Foundations on expansive soil, *Developments in Geotechnical Engineering*, vol 54. *Elsevier Publishing Co*. Amsterdam, 1988, 464 pages.
- [7] Croney D., Coleman J.D., Black, W.P.M., The movement and distribution of water in soil in relation to highway design and performance, *Highway research Board, Special Report N° 40*, 1958, pp.223-254. Washington .
- [8] Fleureau J.M . , Taibi S. , Soemitro R . , et Indarto., Prise en compte de la pression interstitielle négative du sol dans l'estimation du gonflement , *Sympo. Inter. De la mécanique des sols*, Tlemcen, 1990, pp. 2-14.
- [9] Fredlund D.G., Morgenstern N.R., Stress states variables for unsaturated soils". *J. Geotech. Engng. and Found. Div.,ASCE*, vol.103, 5. 1977 ,pp.447-465.
- [10] Fredlund D.G., Rahardjio H., Soil Mechanics for unsaturated soils ,*Wiley-Interscience Publication*, New York : John Wiley & Sons , 1993 ,517p.
- [11] Gueddouda M.K., Lamara M., abou-bekr N., Goual I. Caractérisation et stabilisation des sols expansifs, effet de l'association sel+sable sur les paramètres de gonflement, *Col. Int. Sols et Matériaux à problèmes*. Tunis. 09-11 février 2007, pp. 27-34.
- [12] Hachichi A., Benaissa A., Bourokba S., Boudia M., Etude de la stabilisation chimique des sols gonflants de la région d'Oran, *Proc. 13th C.R.A. L'implication de la géotechnique dans le développement des infrastructures en Afrique*. Marrakech. Marco. 8-11 Dec .2003, pp 371-379.
- [13] Hachichi A & Fleureau J.M., Caractérisation et stabilisation de quelques sols gonflants d'Algérie, *Revue Française de Géotechnique*, N° 86, 1999, pp 37-51.
- [14] Holtz W.G & Gibbs H.J. Engineering properties of expansive soils. *Trans of ASCE*, vol. 121,1956, pp 641-679.
- [15] Kaoua F., Derriche Z, et Laradi N. Contribution à l'étude de la stabilisation des sols gonflants par ajout de sable. *Algérie Equipement. Revue Technique de l'Ecole National des Travaux Publiques*, N° 15. Septembre 1994.pp.12-15.
- [16] Lamara M., Gueddouda M.K., Goual I. Stabilisation des sols gonflants par ajout de sable de dune, cas de la région de Laghouat. *2^{ème} Journées d'études sur les sols gonflants*. Tlemcen, Algérie, 13-14 / novembre /2005, pp.129-139.
- [17] Lamara M., Gueddouda M.K., Benabed B. Stabilisation physico-chimique des sols expansifs. *Revue française de Géotechnique*, N° 115, 2^{ème} trimestre 2006, pp 25-34.
- [18] Lambe T.W. A mechanistic picture of shear strength in clay. *Proc. Of the ASCE conf.on Shear oh Cohesive Soils*, Colorado, 1960, pp 555-580.
- [19] Mouroux P., Margon P.,Pinte, J.C. La construction économique sur sols gonflants, *manuels et méthodes n° 14*, B.R.G.M, 1988.France.
- [20] Ranganatham B.V & Satyanarayana B. A rational method of preding swelling potential for compacted expansive clays. *Proc of the 6th I.C.S.M.F.E*. Montreal.1965.
- [21] Seed H.B., Woodward R.J., Lundgren R. Prediction of swelling potential for compacted clays . *Journal of the soil Mechanics and foundations division. ASCE*, vol 88, N° SM4, 1962.pp.107-131.

- [22] SErratrice J.F., Soyez B. Les essais de gonflements. *Bulletin des laboratoires des ponts et chaussées*.204.Juillet –Août 1996, réf .4082, pp 65-85.
- [23] Skempton A.W. The collaidal activity of clays *Proceedings of the Third International Conférence on Soil Mechanics and Foundations Engineering*, vol.1, 1953, pp 57-61.
- [24] Snethen D.R. Characterization of expansive soils using suction data. *Proc. of the 4th. I.C.E.S. Denver*, 1980, pp. 54-75.
- [25] Terzaghi K . Theoretical Soil Mechanis. John Wiley & Sons,Inc. NewYork, 1943,510p.
- [26] Van Genuchten M.TH., A closed form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 44, 1980 , 892-898.
- [27] Vijayvargiya V.N., Ghazzaly D.I., Prediction of swelling potential for natural clays, *Proc. of the 3rd, I.C.E.S., Haifa*, 1973 , pp. 227-236.
- [28] Williams A.B., Donaldson G.W. Developements related to building on expansive soils in South Africa , 1973-1980 . *Proc. 4th Int. Conf. On Expansive Soils, Denver*, vol. 2, 1980, pp. 834-844.
- [29] Zerhouni M.I. Comportement mécanique des sols non saturés. Thèse soutenue à l'E.C.P. (Paris). Le 8 juin 1991.

- ES_P : Equivalent de sable à piston (NF P 8-598)
- τ : Contrainte de cisaillement
- σ : Contrainte normale
- S : Succion matricielle
- u_a : Pression de l'air
- u_w : Pression de l'eau

Liste des notations

- A : Acivité [= Ip/C₂]
- w_L : Limite de liquidité (NF P 94-050)
- w_P : Limite de plasticité (NF P 94-050)
- w_R : Limite de retrait (XP P 94-060-1)
- I_p : Indice de plasticité
- Sst : Surface spécifique totale (déduite de la formule de Tran Ngoc Lan , 1977)
- V_B : Valeur de bleu de méthylène (NF P 94-068)
- C₁ : Pourcentage de grains inférieur à 1 μm
- C₂ : Pourcentage de grains inférieur à 2 μm
- γ_d : Poids volumique sec maximale (NF P 94-093)
- w_{opt} : Teneur en eau optimal (NF P 94-093)
- Z : Profondeur d'enlèvement des échantillons
- ES_V : Equivalent de sable visuel (NF P 18-598)