

II.1 Introduction :

Dans ce chapitre on expose les méthodes et les techniques expérimentales utilisées sur un échantillon témoin (non traité) puis sur un ensemble d'échantillon traités et aussi sur le sable utilisé .

Les essais ont été réalisés dans quatre laboratoires différents et qui sont :

le laboratoire de pédagogie du département de génie civil de la faculté de technologie, le laboratoire de recherche de GEO-MATERIAUX de l'université de M'sila et le laboratoire Central des Travaux Publics Antenne de M'sila (L.C.T.P).

le laboratoire de pédagogie du département biologie de l'université de M'sila

Ce programme est réparti d'essais en deux parties :

a. Sol témoin (non traité) :

a.1. Essais d'identifications :

- Paramètres d'état :
 - La teneur en eau (NA 5209, NF P 94-050).
 - Le poids volumique sec et humide (NA5210, NF P 94-053).
- Analyse granulométrique.
 - par tamisage (NF P 94-056).
 - par sédimentométrie (NA5251, NF P 94-057).
- Limites d'Atterberg (NA1613, NF P 94-051).
- Essai au bleu de méthylène (NA1948, NF P 94-068).

a.2. Les essais mécaniques :

- Proctor normal (NA 5262, NF P 94-093).
- Proctor modifié (NA 5262, NF P 94-093).
- Essai C.B.R. immédiat et après imbibition (NA 5252, NF P 94-078)
- Gonflement libre (NF P 94-090-1).
- Cisaillement direct (NF P 94-071-1)

b. Sable de dunes

b.1. Les essais d'identifications :

- Analyse granulométrique par tamisage (NF 18-304)
- Equivalent de sable (NF P 18-598)
- La masse volumique (NF P 18-554)

c. Sol traité :**c.1 Essais mécaniques :**

- Essai C.B.R. immédiat et après imbibition.
- Gonflement libre.
- Cisaillement direct

N.B : Les procédures expérimentales suivies dans chaque type d'essai ont été conformes au tant que possible aux méthodes d'essais en vigueur.

- on a effectué en plus une analyse chimique de Léau utilisée dans l'ensemble des essais effectués et les résultats sont représentés ci-dessous.

Tableau II.1: Résultats de l'analyse chimique de l'eau.

Composition	Symbole	Valeurs
Dureté (mg/l)	/	1,48
Calcium (mg/l)	Ca	0,4
Magnésium (mg/l)	Mg	1,08
Chlorures (mg/l)	cl	21,3
Sodium (mg/l)	Na	227
Potassium (mg/l)	K	0,03
Phosphore (mg/l)	p	0,05
Conductivité (μs/cm)	CE	1981
pH	PH	8,7

II.2 Sol non traité :**II.2.1 Essais d'identifications**

Ils comportent les essais d'identification physique et minéralogique permettant de déterminer les paramètres décrits ci-après, avec entre parenthèses la norme algérienne compatible à la norme française .

a. Paramètres d'état :

Ils comportent :

❖ La teneur en eau (NA 5209, NF P 94-050) :

C'est le rapport de la masse de l'eau contenue dans le sol après l'évaporation lors de l'étuvage (m_w) sur la masse des grains solides (m_d), exprimé en pourcentage :

$$W(\%) = \frac{m_w}{m_d} \times 100$$

L'essai est effectué sur échantillon intact ramené directement du site.

❖ Les poids volumiques humide et sèche (NA5210, NF P 94-053) :

La masse volumique humide (γ_h) : c'est le quotient (rapport) de la masse humide (m_h) du sol par le volume (V) qu'il occupe (y compris les fluides interstitiels : air + eau). Dans ce cas, l'utilisation d'un carottier a été préconisée, qui consistait au respect des étapes de la norme.

La masse volumique sèche d'un sol (γ_d) : c'est le quotient (rapport) de la masse des grains solides (m_s) du sol par le volume (v) qu'il occupe.

La masse volumique sèche peut être obtenue comme le rapport du poids volumique humide par l'unité plus la teneur en eau ($\gamma_d = \gamma_h / (1 + w)$).



Figure II.1 : Détermination du poids volumique humide.

b. Analyse granulométrique :

Elle a pour but de déterminer la distribution des particules qui forment le squelette des sols en vue de leur classification et elle s'effectue en deux opérations successives et complémentaires :

❖ Analyse granulométrique par tamisage (NF P 94-056) :

Le tamisage sous l'eau (par voie humide) pour les particules de dimensions $\geq 80\mu\text{m}$ (0.08mm).

C'est l'ensemble des opérations aboutissant à la séparation selon leur grosseur des éléments constituant un échantillon, en employant des tamis à maille carrée afin d'obtenir une représentation de la répartition de la masse des particules à l'état sec en fonction de leur dimension.

L'essai consiste à séparer les grains agglomérés d'une masse connue de matériau par brassage sous l'eau, à fractionner ce sol, une fois séché, au moyen d'une série des tamis et à peser successivement le refus cumulé sur chaque tamis. La masse de refus cumulé sur chaque tamis est rapportée à la masse totale sèche de l'échantillon soumis à l'analyse (figure II.2).

❖ Analyse granulométrique par sédimentométrie (NA5251, NF P 94-057) :

Les particules inférieures à 80 microns séparées du reste du sol par tamisage sont mises en suspension dans de l'eau additionnée d'une défloculation. Les particules sédimentent à différentes vitesses en relation avec leur taille. Au moyen d'un densimètre est mesurée l'évolution dans le temps de la masse volumique de la solution et de la profondeur d'immersion de l'appareil. La distribution pondérale de la taille des particules est calculée à partir de ces données (figure II.3).



Figure II.2 : Appareillage de l'analyse granulométrique par tamisage.



Figure II.3 : Appareillage de l'analyse granulométrique par sédimentométrie.

c. Limites d'Atterberg : (NA1613 , NF P 94-051):

Les limites d'Atterberg sont des caractéristiques géotechniques conventionnelles d'un sol qui marquent les seuils entre :

- Le passage d'un sol de l'état liquide à l'état plastique : limite de liquidité (WL),
- Le passage d'un sol de l'état plastique à l'état solide : limite de plasticité (Wp).

Ces limites ont pour valeur la teneur en eau du sol à l'état de transition considérée, exprimée en pourcentage de masse de la matière première brute. La différence $I_p = W_L - W_p$ qui définit l'étendue du domaine plastique, est particulièrement importante, c'est l'indice de plasticité [13]. L'indice de plasticité permet d'apprécier la quantité et le type d'argiles présentes dans un échantillon. Il définit donc l'argilo site de l'échantillon (Figure II.4).



Figure II.4 : Appareillage de limites d'Atterberg

d. Essai au bleu de méthylène (NA1948, NF P 94-068) :

L'essai est réalisé sur la fraction 0/0.08 mm, il consiste à déterminer la quantité de bleu de méthylène nécessaire à la saturation des particules argileuses en suspension dans l'eau et en permanence agitation.

La valeur au bleu de méthylène constitue un paramètre d'identification permettant de mesurer la surface spécifique des particules solides contenues dans les sols fins et de déterminer l'activité de leur fraction argileuse.

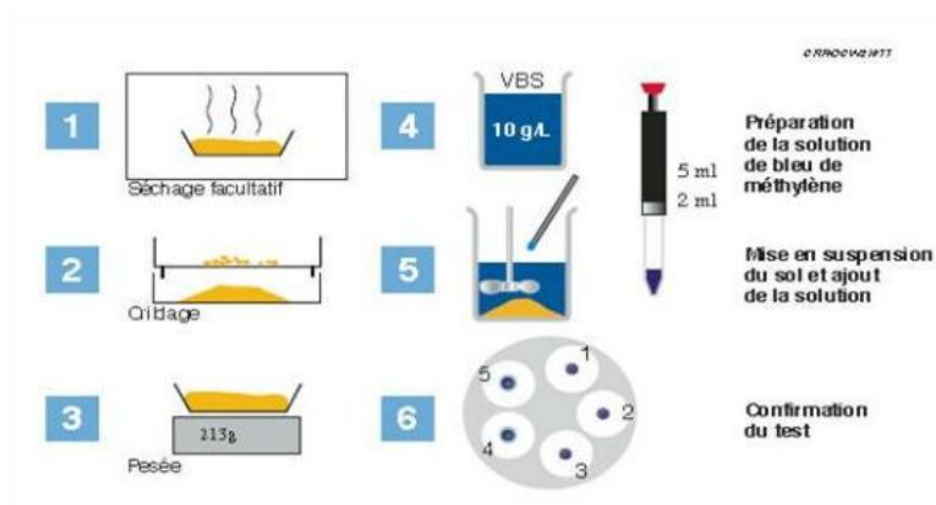


Figure II.5 : Les étapes de l'essai au bleu de méthylène.

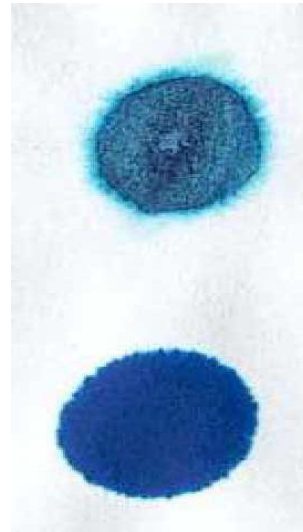


Figure II.6 : Valeurs de bleu de quelques sols.

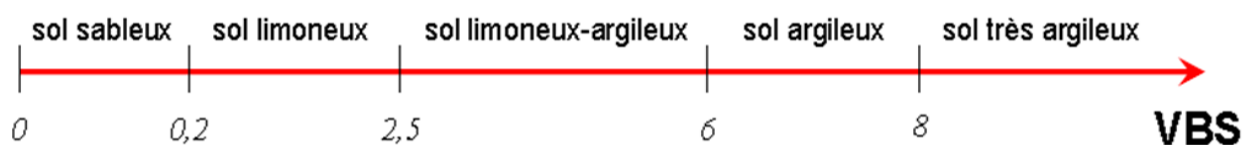


Figure II.7 : La valeur de bleu VBS est la quantité de bleu méthylène absorbé.

II.2.2. Essais mécaniques :

a. Essai Proctor normal et modifié (NA 5262, NF P 94-093) :

L'essai Proctor est un essai de compactage exécuté en laboratoire qui a pour but de déterminer l'influence de la teneur en eau (w exprimée en %) d'un matériau sur sa compactibilité (exprimée par la masse volumique sèche γ_d en g/cm^3 ou en kg/m^3).

• Conditions d'essai :

Résultats :

Les résultats sont traduits sous forme d'un graphique reprenant, en abscisse la teneur en eau au compactage et en ordonnée la masse volumique sèche [20].

- Énergie de compactage (Exprimée en kNm/m^3) =

$$\frac{\text{Hauteur de chute} \times \text{poides de la dame} \times \text{Nb de coups} \times \text{Nb de couches}}{\text{volume total du moule}}$$

- **Mode opératoire de la machine :**

- Faire choix du matériel (moule, la masse de dame) en se référant à la norme Le choix du moule est défini par la taille des grains Le choix de l'énergie de compactage est défini par l'utilisation envisagée du sol.
- Placer la moule avec le sol dans la machine.
- Fermer les portes sécurités de la machine.
- Régler la masse de dame et le nombre des coups et les couche selon la norme d'essai.



Figure II.8 : Appareil essai Proctor.

- b. Essai de portance C.B.R (NA 5252, NF P 94-078) :**

L'essai consiste à mesurer les forces à appliquer sur un poinçon cylindrique pour le faire pénétrer à vitesse constante dans une éprouvette de matériau. Les valeurs particulières des deux forces ayant provoqué deux enfoncements conventionnels sont respectivement rapportées aux valeurs des forces observées sur un matériau de référence pour les mêmes enfoncements, l'indice recherché est défini conventionnellement comme étant la plus grande valeur, exprimée en pourcentage, des deux rapports ainsi calculés.

- **Essai C.B.R immédiat :**

Placer l'éprouvette sur la presse en position centrée par rapport au piston de poinçonnement et on procède au poinçonnement de la manière suivante :

Approcher la face supérieure de l'éprouvette vers le piston, à l'aide des dispositifs prévus sur la presse jusqu'à ce que le piston vienne affleurer le matériau.

Régler la mise à zéro du dispositif dynamométrique et celle du comparateur mesurant l'enfoncement du poinçon (figure II.9).

Noter les efforts de poinçonnement correspondant aux enfoncements suivants : 0,625 ; 1,25 ; 2 ; 2,5 ; 5 ; 7,5 ; 10 et 12.5 mm.

- **Résultats :**

Les efforts correspondant à des enfoncements de 2.5 mm et de 5 mm sont rapportés aux valeurs de 13.35 et 19.93 KN, qui sont les valeurs des contraintes à ces mêmes enfoncements pour un matériau de référence. L'indice CBR (exprimé en %) est défini comme étant la plus grande des deux valeurs suivantes :

$$\begin{aligned} &= \frac{\text{Effort de pénétration à 2.5 mm d'enfoncement (KN)} \times 100}{13,35} \\ &= \frac{\text{Effort de pénétration à 5.0 mm d'enfoncement (KN)} \times 100}{19,93} \end{aligned}$$

- **Essai C.B.R après imbibition :**

Après quatre (4) jours d'immersion (± 2 h) on mesure la hauteur de gonflement Δh indiquée par le comparateur, on extrait l'ensemble hors du bac d'immersion en observant un temps d'égouttage de 15 minutes puis on dépose le trépied, le comparateur, les surcharges et le disque de gonflement (figure II.10).

La valeur de déformation de l'éprouvette g , exprimé en pourcentage :

$$g(\%) = \left(\frac{\Delta h}{h} \right) \times 100$$

Δh Est le gonflement mesuré à la fin de la période d'immersion (exprimée en cm) ;

h Est la hauteur initiale de l'éprouvette avant mise en eau (exprimée en cm).

On suivra la même procédure que celle de la détermination de l'indice C.B.R immédiat



Figure II.9 : Appareil de poinçonnement (essai C.B.R).



Figure II.10 : Imbibition des échantillons (essai C.B.R)

c. Essai de gonflement libre (NF P 94-090-1) :

L'essai de gonflement libre est issu directement des procédures traditionnelles de l'essai œdométrique.

Après montage dans la bague œdométrique, l'éprouvette est imbibée et autorisée à gonfler sous le poids du piston. Une fois le gonflement stabilisé, le chargement s'effectue par paliers selon un taux d'accroissement approprié jusqu'à stabilisation des déformations sous chaque palier. La pression de gonflement correspond à la charge nécessaire pour ramener l'éprouvette à sa hauteur initiale.

L'avantage de cette méthode est qu'elle nécessite une seule éprouvette et permet d'obtenir, outre la pression de gonflement et le gonflement libre, la courbe de compressibilité du sol saturé (après gonflement).



Figure II.11 : Appareil œdométrique

d. Essai de cisaillement direct : (NF P 94-071-1)

L'essai a été réalisé selon les prescriptions de la norme NF P 94-071-1.

L'essai s'effectue sur une éprouvette de sol placée dans une boîte de cisaillement constituée de deux demi-boîte indépendantes, dans notre cas le but est de déterminer l'effort de cisaillement. L'échantillon de sol est préparé selon les caractéristiques optimums et sous l'énergie de Proctor (normal et modifié), l'essai adopté pour le cisaillement est non consolidé non drainé (UU) avec une vitesse de 1 mm/min et une course de 6 mm de déplacement horizontal on utilisant la boîte de cisaillement carrée (36 cm²), on a pu diviser le contenu du moule Proctor en trois parties représentatives des trois couche du moule (la couche 1 représente la couche supérieure, la couche 2 représente la couche intermédiaire et enfin la couche 3 représente la couche de fond).



Figure II.12 : Appareille de cisaillement direct.

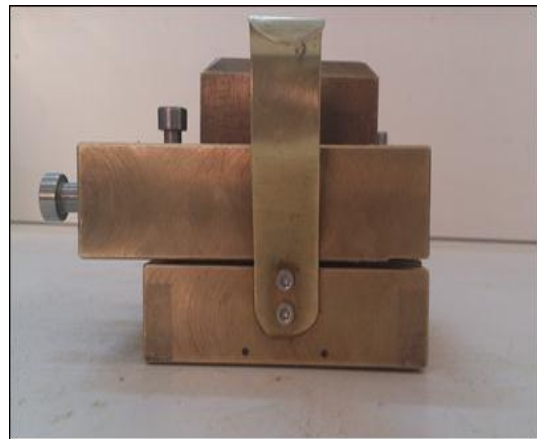


Figure II.13 : Boîte de cisaillement

II.2.3 Les essais d'identifications :(du sable)**a. Analyse granulométrique par tamisage (NF 18-304)**

On peut définir l'analyse granulométrique par tamisage comme l'ensemble des opérations aboutissant à la séparation selon leur grosseur des éléments constituant échantillon, en employant des tamis à maille carrée afin d'obtenir une représentation de la répartition de la masse des particules à l'état sec en fonction de leur dimension.

❖ But de l'essai :

La granulométrie ou analyse granulométrique s'intéresse à la détermination de la dimension des grains et la granularité concerne la distribution dimensionnelle des grains d'un granulat.

L'analyse granulométrique a trois buts :

- Déterminer les dimensions des grains.
- Déterminer les proportions de grains de même dimension (% pondéral).
- En déduire le Module de finesse (MF).

b. Equivalent de sable (NF P 18-598)

Essai d'équivalence de sable est spécifique aux sols grenue, il nous permette de mettre en évidence la proportion relative de poussière fine nuisible argileux dans les sols ou les agrégats fins : il est effectuée sur des éléments de diamètre (2 mm) son importance est capital car la présence des éléments fins peut modifier le comportement rhéologique du matériaux et pour pouvoir interpréter correctement les résultats et les indispensable de répète l'essai au moins deux fois. Il est essentiel pour le choix et le contrôle.

Les valeurs de l'équivalent de sable indiquent la nature du sable en fonction du moyen de mesure et permettent d'apprécier la qualité.

❖ But de l'essai

L'équivalent de sable a pour but d'apprécier la qualité d'un sol sablonneux en évaluant la proportion relative des poussières fines ou des éléments argileux dans ce sol par rapport aux éléments sableux.



Figure II.14: Premier étape de l'essai équivalent de sable.



Figure II.15: Deuxième étape de l'essai équivalent de sable.

c. La masse volumique apparente**❖ L'état lâche**

C'est la masse de l'unité de volume apparent du corps, c'est-à-dire du volume constitué par la matière du corps et les vides qu'elle contient.



Figure II.16 : L'essai de la masse volumique apparente

❖ L'état compact

La masse volumique à l'état compact et la masse du matériau par unité de volume après compactage y compris les vides restants entre les grains, Elle est souvent supérieure à la masse volumique à l'état lâche. Même procédure que celle à l'état lâche après remplissage du récipient (avec compactage).

II.3 Sol traité :

Le même processus que les essais précédents (sans traitement), mais cette fois-ci en ajoutant des teneurs en sable de dune : de 5% ; 10% ; 15% ; 20% ; 25% et 30% et pour les essais suivants :

- Essai C.B.R. immédiat et après imbibition.
- Gonflement libre.
- Cisaillement direct.