

SOMMAIRE

CHAPITRE I: GENERALITES	5
I-1) INTRODUCTION	5
I-2) PRESENTATION DE L'ORGANISME D'ACCEUILLE	5
I-3) CADRE GEOLOGIQUE DE LA ZONE D'ETUDE	7
a) Géologie de la zone d'étude.....	7
b) Gisement des Gantour.....	8
CHAPITRE II: RECONNAISSANCES GEOPHYSIQUE ET GEOTECHNIQUES	9
II-1) RECONNAISSANCE GEOPHYSIQUE	9
- Essai Cross-Hole.....	
II-2) RECONNAISSANCES GEOTECHNIQUES	10
II.2.1) Essais géotechniques	10
II.2.1.1) Prélèvement et préparation des échantillons	10
II.2.1.2) Essais d'identifications des sols	13
a) Analyse granulométrique par tamisage sec	14
b) Analyse granulométrique par sédimentation.....	17
c) Teneur en eau d'un sol	19
d) Masse volumique (pesé hydrostatique).....	19
e) Poids spécifique des grains.....	21
f) Valeur en bleu de méthylène d'un sol V.B.S.....	22
g) Limites d'Atterberg.....	26
🚧 Limite de liquidité par méthode pénétration à cône.....	27
🚧 Limite de plasticité	29
🚧 Indice de plasticité	30
II.2.1.3) Essais mécaniques sur sol	31
a) Essai triaxial.....	31
II.2.1.4) Essais mécaniques sur roche	36
a) Essai Los Angeles.....	36
b) Essai Cerchar (Abrasiveité).....	37
c) Essai de compression simple.....	39
CHAPITRE III : EXPRESSION DES RESULTATS	40
III -1) RESULTATS DES SONDAGES	40
III.1.1) Localisation des sondages	40
III.1.2) Exemple de coupes géologiques des sondages	41
III-2) RESULTATS DE L'ESSAI CROSS-HOLE	42
III-3) RESULTATS DES ESSAIS AU LABORATOIRE	43
III.3.1) Les sols	43
III.3.2) Les Roches	44
III-4) EXEMPLE DES CORELATIONS LITHOLOGIQUES	45
CHAPITRE IV : CONCLUSION	46
Références bibliographiques	47

Liste des figures :

Figure. I.1 : Figure représentatif de la répartition des chiffres d'affaire par secteur d'activité.

Figure. I.2 : Figure représentatif de la répartition des chiffres d'affaire par nature de prestation.

Figure. I.3 : Carte de situation géologique de la zone d'étude (in Frizon de Lamotte et al. 2006)

Figure. I.4 : Géologie et piézométrie régionale (1963) de la Bahira (Combe, 1975).

Figure. II.1 : Principe de l'essai Cross-Hole

Figure. II.2 : Courbe granulométrique du sable phosphaté.

Figure. II.3 : courbe de la limite de liquidité WL.

Figure. II.4 : Courbe de la limite de liquidité tracée à l'aide du logiciel Grapher.

Figure. II.5 : détermination de la valeur de t_{100}

Figure. II.6 : Cercles de Mohr.

Figure. II.7 : Caractéristiques géométriques de la pointe d'un pic d'abrasivité :

1-pointe du pic ; 2-corps du pic.

Figure. II.8 : Usure de l'extrémité de la pointe du pic — Exemple : 1-pointe ; 2-échelle microscopique ; 3-méplat

Figure. III.1 : Implantation des Sondages de reconnaissances sur la carte topographique de Bassin Gantour à Youssoufia (D'après LPEE 2013).

Figure. III.2 : Coupe lithologique du sondage PS9039

Figure. III.3 : Profile des vitesses sismiques (V_p et V_s)

Figure. III.4 : Résultats du coefficient de poisson

Figure. III.5 : Résultats des modules dynamiques et coupe lithologique correspondante

Figure. III.6 : Modélisation 3D des résultats obtenus à partir des sondages carottés

Liste des photos :

Photo. II.1 : Caisse de prélèvement

Photo. II.2 : Echantillon intact prélevé par carottage.

Photo. II.3 : Maziers

Photo. II.4 : Boite métallique

Photo. II.5 : Echantillon remanié

Photo. II.6 : Echantillon en cours de lavage.

Photo. II.7 : Avant décantation

Photo. II.8 : Après décantation

Photo. II.9 : Appareillage de l'analyse granulométrique.

Photo. II.10 : Agitateur mécanique.

Photo. II.11 : Eprouvette de l'essai analyse granulométrique par sédimentation.

Photo. II.12 : Matériel de la pesée hydrostatique.

Photo. II.13 : Pycnomètres.

Photo. II.14 : Cloche à vide.

Photo. II.15 : Appareil de dosage par bleu de méthylène

Photo. II.16 : Papier chromatographique.

Photo. II.17 : Appareil de pénétration à cône (Pénétrromètre).

Photo. II.18 : Cône avant de pénétration

Photo. II.19 : Cône après pénétration

Photo. II.20 : Rouleaux de sol.

Photo. II.21 : Préparation de l'échantillon pour le compactage.

Photo. II.22 : Machine de compactage

Photo. II.23 : installation de l'éprouvette dans la cellule triaxiale.

Photo. II.24 : saturation de l'échantillon.

Photo. II.25 : Machine de Los Angeles.

Photo. II.26 : Machine de l'abrasivité.

Photo. II.27 : l'appareil de compression uni axial.

Liste des tableaux :

Tableau. II.1 : Fraction granulométrique correspondante à chaque essai.

Tableau. II.2 : Résultats du tamisage du sable phosphaté de Khouribga.

Tableau. II.3 : Masses de prise d'essai de la teneur en eau en fonction de la granulométrie.

Tableau. II.4 : Volume du bleu de méthylène injecté (le signe + indique le volume équivalent à l'apparition de l'auréole)

Tableau. II.5 : Résultats de la limite de liquidité du sable phosphaté de Khouribga.

Tableau. II.6 : Valeurs de a , en fonction du type de drainage (suivant la norme indiquée dans la partie bibliographie et références)

Tableau. II.7 : Nombre de boulets à utiliser selon la classe granulométrique.

Tableau. III.1 : Localisation des sondag

CHAPITRE I: GENERALITES

I-1) INTRODUCTION:

Suite à l'épuisement des stocks phosphatés disposés en formations superficielles, l'Office Chérifien des Phosphates (O.C.P) a projeté une exploitation des niveaux lithologiques souterrains. Et afin de mieux contraindre les paramètres géotechniques intervenant dans ce genre d'exploitation, une étude a été confiée au Laboratoire Public d'Etudes et d'Essais (LPEE) pour cerner les propriétés du sol ; objet des travaux d'exploitation.

Pour ce faire une campagne de sondages cumulant 800m de carottes a été réalisée en 2013; dans le but de :

- Etablir des coupes lithologiques; pour définir la structure géologique du gisement.
- Calculer les paramètres géotechniques à travers les essais mécaniques et d'identifications pour caractériser les propriétés intrinsèques des couches et partant prévoir les modalités techniques de leur exploitation, à même d'assurer la stabilité générale de l'ouvrage et d'empêcher les tassements différentiels pouvant créer l'effondrement de l'exploitation.
- Faire une étude géophysique par méthode sismique « Cross Hole » dont le but est de déterminer les modules dynamiques des diverses couches du sous-sol.

Notre projet de fin d'études de la Licence s'inscrit dans ce cadre. Le LPEE à travers sa structure d'accueil le Centre Expérimental du sol (CES) nous a offert une opportunité pour manipuler des essais géotechnique au laboratoire.

Dans notre rapport on a détaillé les buts, principes et les modes opératoires des essais du laboratoire qui ont été demandé et réalisé pendant l'étude.

Durant notre stage, on a effectué les essais de laboratoire sur plusieurs échantillons prélevés de différentes régions du Maroc, et puisque cette étude a été faite en 2013, sur des sols phosphatés, on a travaillé sur un sable phosphaté de Khouribga, du fait qu'il a une nature similaire à celle de la zone d'étude (Youssoufia), pour lequel on a réalisé son analyse granulométrique par tamisage sec, ainsi que ses limites de liquidité, plasticité, et son indice de plasticité, et on a déterminé aussi sa valeur en bleu de méthylène (VBS).

On a effectué aussi d'autres essais sur différents échantillons qu'on va citer seulement le but et le résultat obtenue.

I-2) PRESENTATION DE L'ORGANISME D'ACCUEILLE :

Créé en 1947, le Laboratoire Public d'Essais et d'Etudes (L.P.E.E.) intervient à toutes les étapes de réalisation et d'exploitation des projets. Initialement service de l'administration, le L.P.E.E. est aujourd'hui une entreprise publique au statut de Société Anonyme (S.A.) au capital de 120 000 000 Dirhams, sous tutelle du Ministère de l'Equipement.

Du transport à l'environnement, de l'industrie à l'aménagement du territoire, des barrages aux ouvrages d'art en passant par les bâtiments et l'urbanisme, le L.P.E.E. est présent dans l'ensemble des activités de génie civil assurant ainsi une mission de service public située au carrefour des interventions dans le bâtiment, le génie civil et les industries.

Secteurs d'activités:

Activités de base:

- le sol ;
- les matériaux et structures ;
- les infrastructures de transport ;
- les aménagements hydrauliques et portuaires.

Le L.P.E.E. a ensuite étendu ses activités à:

- l'environnement et la pollution ;
- la métallurgie ;
- l'emballage et le conditionnement ;
- la métrologie et la certification ;
- la prévention des risques naturels.

Le Centre Expérimental des Sols : C.E.S.:

Prestations de reconnaissances, essais in-situ et au laboratoire:

- études de géologie de surface et de géophysique ;
- réalisation d'échantillons de sols dans les sondages mécaniques, mesures de perméabilité, essais pressiométriques, dilatométriques et scissométriques ;
- essais d'identification, oedométriques, de cisaillement et triaxial ;
- essais de cisaillement à grande échelle, de déformabilité et de mesures de contraintes ;
- essais pénétrométriques statiques ou dynamiques ;
- études hydrogéologiques et recherche d'eau souterraine ;
- études de faisabilité et d'exploitation de carrières ;
- essais de pométrie, permittivité, poinçonnement et déchirure sur géosynthétiques.

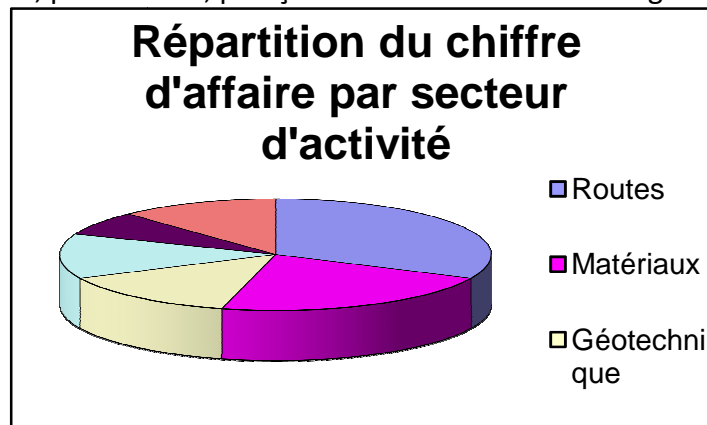


Figure. I.1 : Figure représentatif de la répartition des chiffres d'affaire par secteur d'activité.

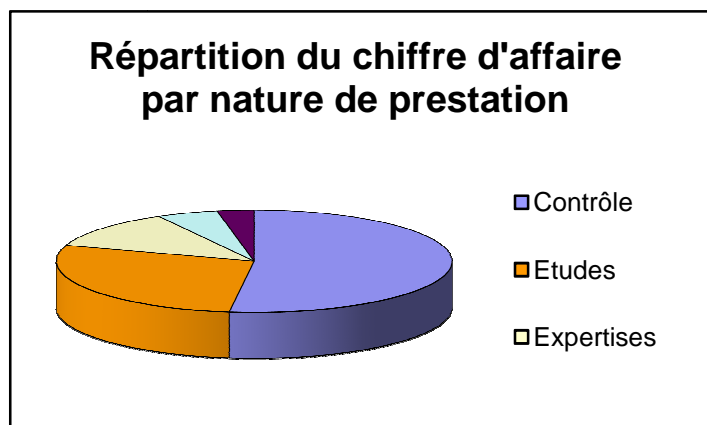


Figure. I.2 : Figure représentatif de la répartition des chiffres d'affaire par nature de prestation.

I-3) CADRE GEOLOGIQUE DE LA ZONE D'ETUDE :

a) Géologie de la zone d'étude :

Notre zone fait partie du Bassin de Ganntour, se dernier s'étend sur environ 130 Km en direction Est-Ouest et sur 20 à 30 Km en direction Nord-Sud. Seule la partie Nord du bassin est reconnue géologiquement à une maille serrée (Figure.1.3).

Il est limité:

- Au Nord par le massif paléozoïque des Rehamna ;
- Au Sud par le massif paléozoïque des Jbilet ;
- A l'Est par les rives d'Oued Tassaout, l'affluent d'Oued Oum er-rabiâ ;
- A l'Ouest par les collines jurassiques des Mouissates ;

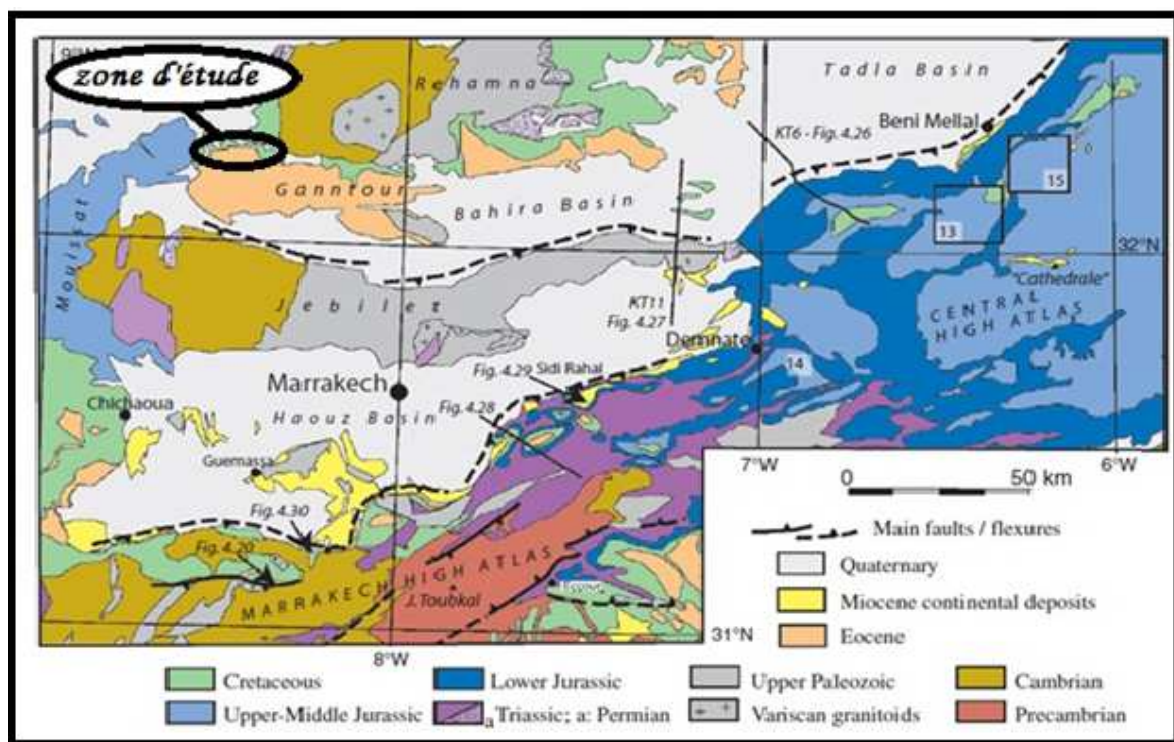


Figure. 1.3 : Carte de situation géologique de la zone d'étude (in Frizon de Lamotte et al. 2006)

La géologie de la région de Youssoufia et Ben Guerir est caractérisée par l'existence des unités suivantes : Le socle primaire est recouvert par des formations de couvertures triasique, Crétacées et Eocènes, antérieures aux premiers mouvements atlasiques. Ces formations affleurent au Nord, s'enfoncent sous la plaine vers le Sud et se terminent en Bissau au Sud contre le socle paléozoïque. Ces formations sont recouvertes par des formations continentales néogènes de remplissage et par des dépôts quaternaires. La couverture triasique n'est représentée que sous la plaine de chemaia à l'extrémité Occidentale de la bahira, dans les jbilat et son Sillon bordier Nord. Le Jurassique bien différencié n'existe qu'à l'Ouest du bassin, dans les Mouissates. Un Crétacé Inférieur continental est connu au Nord-Ouest Youssoufia, et sous la bahira.

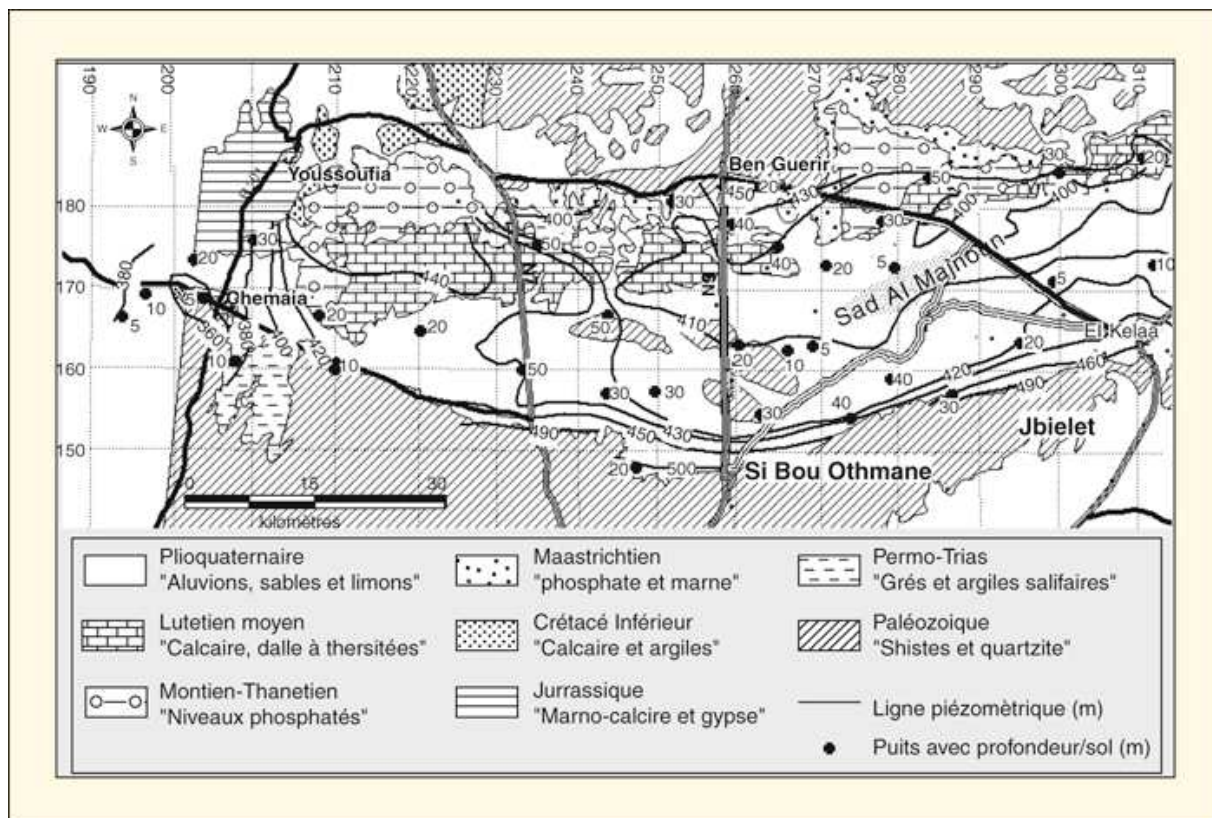


Figure. I.4 : Géologie et piézométrie régionale (1963) de la Bahira (Combe, 1975).

b) Gisement des Gantour :

Le gisement des Gantour situé plus au Sud comprend: la zone de Youssoufia en exploitation depuis les années 30, la zone de Benguerir qui entrerait en activité en 1977 et les zones de Djenane El Kheil-Elouata, de Nzalet El Hararcha et de la Tassaout. On rencontre par ailleurs d'autres zones phosphatières plus isolées aux Meskala et entre Essaouira et Marrakech.

Le gisement de Youssoufia, situé à 70 km de Safi est constitué de trois couches séparées par des intercalations calcaires dont seule la première, qui a une épaisseur de 1,5 m à 2,30 m, est aujourd'hui exploitée.

La zone phosphatière de Benguerir occupe la partie centrale du gisement des Gantour (à 200 km de Casablanca et 160 km de Safi). Les phosphates de Benguerir s'étalent sur 12000 ha et se caractérisent par une sédimentation abondante groupant 23 niveaux phosphatés dans lesquels on peut distinguer deux faisceaux: un faisceau 11 à 23 dont la teneur prépondérante dépasse 60%. Et un faisceau 1 à 10 comportant une couche épaisse de très faible teneur (Oualalou, 1973)

CHAPITRE II :

RECONNAISSANCES GEOPHYSIQUE ET GEOTECHNIQUES

II-1) RECONNAISSANCE GEOPHYSIQUE :

- Essai Cross-Hole :

Objectif de l'essai :

L'objectif principal de l'essai cross-Hole est de déterminer les paramètres géodynamiques du sol (Le module de Young (E), le module de cisaillement (G), et le coefficient de poisson (ν)), ceci en calculant les vitesses de propagations des ondes sismiques de compression (Ondes P) et de cisaillement (Ondes S), entre plusieurs forages.

Principe de l'essai :

L'essai est en général réalisé depuis la surface jusqu'au fond des forages avec un pas variable suivant les objectifs de l'étude mais typiquement de 1, 2 ou 3 m. On réalise la mesure entre une sonde sismique émettrice placée dans un forage « émetteur » et une ou plusieurs sondes réceptrices placées à la même profondeur dans les forages « récepteurs ».

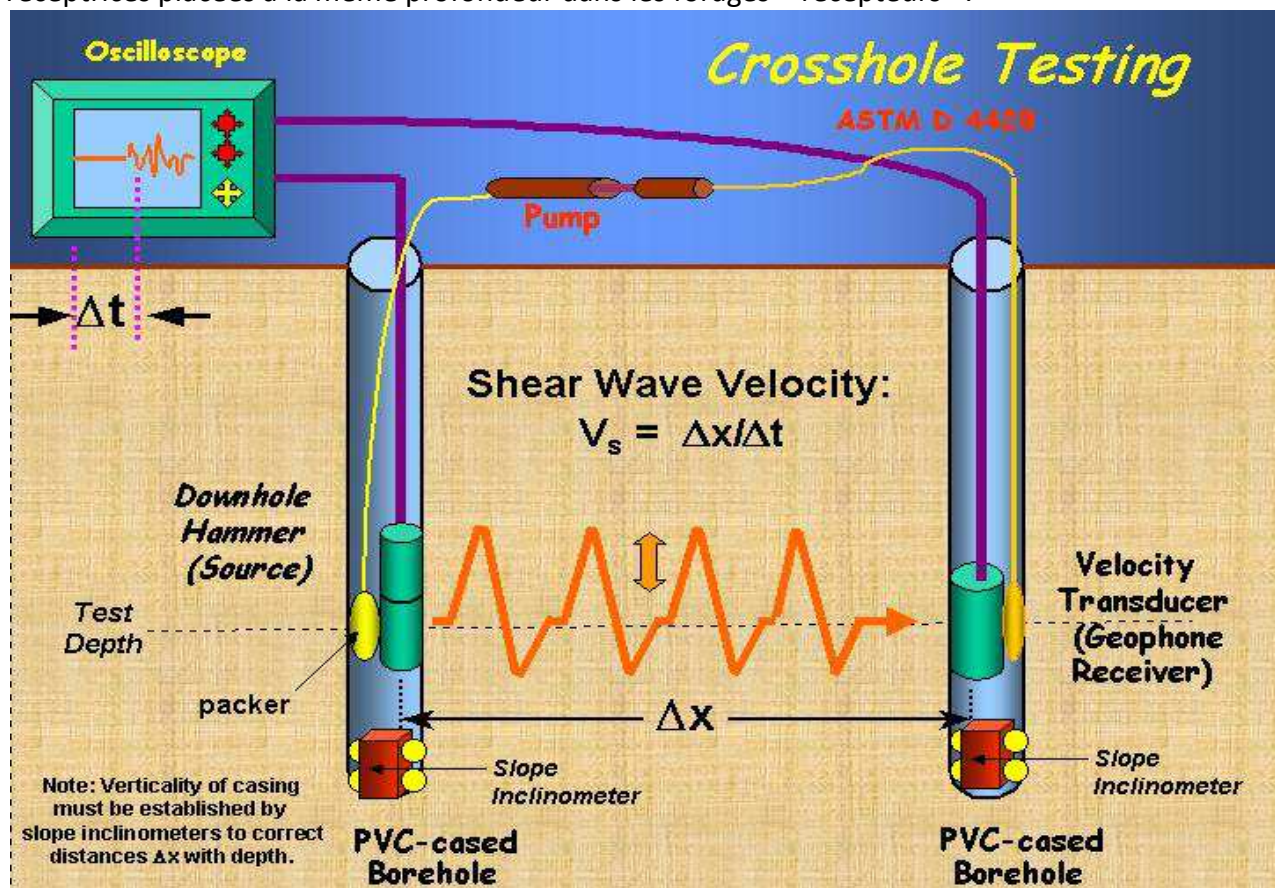


Figure. II.1 : Principe de l'essai Cross-Hole

Les mesures sont effectuées à différents niveaux de profondeur, typiquement tous les mètres ou tous les deux ou trois mètres, afin d'obtenir une coupe des vitesses des ondes P et S en fonction de la profondeur. Les paramètres géodynamiques sont ensuite calculés en utilisant les relations suivantes:

$$\text{Coefficient de Poisson, nombre sans unité : } \nu = (V_p^2 - 2V_s^2) / 2 (V_p^2 - V_s^2)$$

$$\text{Module d'Young, exprimé en MPa : } E = 2 \rho V_s^2 (1 + \nu)$$

$$\text{Module de cisaillement, exprimé en MPa : } G = \rho V_s^2$$

V_p et V_s sont respectivement les vitesses des ondes de compression et de cisaillement et sont exprimées en mètre par seconde (m/s). Le calcul de E et de G nécessite de connaître la masse volumique ρ des terrains traversés, soit en la mesure *in-situ*, soit en laboratoire à condition que les échantillons doivent être intacts, afin de garder leurs caractéristiques initiales.

II-2) RECONNAISSANCES GEOTECHNIQUES :

II-2.1) Essais géotechniques :

L'étude géotechnique des sols passe par deux stations cruciales :

La première comprend des essais sur le terrain de prélèvement (forages, puits...) on les appelle *les essais in-situ*, ces essais permettent de tester le comportement mécanique des sols dans leurs conditions naturelles, on peut les classer selon le type de résultat qu'ils permettent d'obtenir :

- Caractérisation des sols à la limite de la rupture mécanique ce sont les pénétromètres statiques et dynamiques qui sont propices pour donner ce type de résultat.
- Caractérisation des sols entre le comportement de repos et la rupture mécanique (relation contrainte-déformation), pour ce type de résultat on utilise le pressiomètre, le scissomètre et les essais à la plaque, qui sollicitent le sol de son état de repos jusqu'à la rupture (valeur limite).

La deuxième station, comprend des études géotechniques qui se font en laboratoire, et qu'on distingue 3 familles différentes d'essais :

- Essais d'identification des sols
- Essais mécanique sur les sols
- Essais mécaniques sur les roches

II.2.1.1) Prélèvement et préparation des échantillons :

Prélèvement des échantillons :

Le prélèvement des échantillons est une étape intermédiaire mais indispensable, et il en existe plusieurs techniques qui sont toutes normalisées et dépendent du type d'essai à effectuer :

- Prélèvements dans des puits, fouilles tranchées ou galeries;
- Prélèvements grâce à un sondage carotté ;
- Prélèvements manuels de blocs ;
- Prélèvements manuels à l'aide de boîtes ;

- Prélèvements à la tarière.

Les échantillons remaniés subissent un prélèvement simple par une pelle ou truelle pour les sols de faible profondeur, et sont ramenés du terrain au laboratoire dans des sacs plastiques.

Les échantillons intacts sont prélevés par carottage, des profondeurs moyennes à importantes, et sont ramenés dans des Maziers (**Photo. II.3**), des boîtes métalliques (**Photo. II.4**) ou ils sont paraffinés (**Photo. II.2**) afin de garder ces caractéristiques initiales.

Les propriétés mesurées sur ces échantillons sont celles qui se rapprochent le plus de la condition in situ (en place).



Photo. II.1 : Caisse de prélèvement



Photo. II.2 : Echantillon intact prélevé par carottage.



Photo.II.3 : Maziers



Photo.II.4 : Boite métallique



Photo. II.5 : Echantillon remanié

Préparation des échantillons :

Avant d’entamer les essais géotechniques, il faut laver les échantillons afin de d’éliminer les impuretés, car leur présence nous induira à des erreurs lors de l’interprétation des résultats. (Photo)

On prélève les échantillons et on les pèse en fonction du type d’essai qu’on veut réaliser.

On pèse d’abord les échantillons à l’état humide afin de déterminer leur teneur en eau après étuvage. Pour cela on les place dans une étuve à 105° C pendant 24 heures s’il s’agit d’un matériau peu sensible à la chaleur, ou dans une étuve à 50° C pendant 8 à 12 heures si le matériau est sensible à la chaleur (s’il contient des matières organiques par exemple).

Ensuite on lave notre échantillon avec de l’eau, et on le brosse sur des tamis dont l’ouverture dépend du type d’essai qu’on veut réaliser, le tamis doit être équipé d’un fond pour recueillir le passant si nécessaire.

Chaque essai lui correspond une fraction granulométrique (après lavage), sur laquelle l’essai peut être réalisé, comme l’indique le tableau. I.1 ci-dessous :

Essai	Granulométrie	Sédimentométrie	Limites d’Atterberg	Poids spécifique (γ_s)	Equivalent de Sable	VBS
Ouverture du tamis	Refus 80 μ m	Passants 80 μ m	Passants 400 μ m	Passants 2 mm	Passants 5 mm	Passants 5 mm

Tableau. II.1 : Fraction granulométrique correspondante à chaque essai.



Photo. II.6: Echantillon en cours de lavage.

Après récupération de l'échantillon, on le laisse se décanter et on le siphonne pour le réintroduire dans l'étuve pendant 24 heures, afin de commencer les essais après.



Photo. II.7 : Avant décantation



Photo. II.8 : Après décantation

II.2.1.2) Essais d'identifications des sols :

L'identification d'un sol, consiste à déterminer les paramètres (nature, état, comportement mécanique) du sol par des analyses et essais conventionnels normalisés, réalisés sur des échantillons.

Les essais d'identification des sols sont les suivants :

- La teneur en eau d'un sol ;
- La masse volumique ;
- Le poids spécifique des grains (γ_s);
- L'analyse granulométrique ;

- L'analyse granulométrique par sédimentation ;
- La Valeur au Bleu de méthylène d'un Sol (V.B.S.) ;
- L'équivalent de sable ;
- Les limites d'Atterberg.

a) Analyse granulométrique par tamisage à sec :

But de l'essai

L'essai consiste à déterminer les différentes fractions granulométriques d'un sol après brassage à l'eau et séchage dans l'étuve, ce fractionnement est réalisé à l'aide d'une série de tamis superposés et de mailles carrés de dimension décroissante du haut vers le bas (100, 80, 63, 50, 40, 31.5, 25, 12.5, 10, 5, 2.5, 2, 1, 0.8, 0.63, 0.315, 0.2, 0.08 mm)(Photo. II.9). On pèse successivement le refus cumulé sur chaque tamis, la masse de refus cumulée sur chacun des tamis est enfin rapportée à la masse totale sèche de l'échantillon soumis à l'essai.

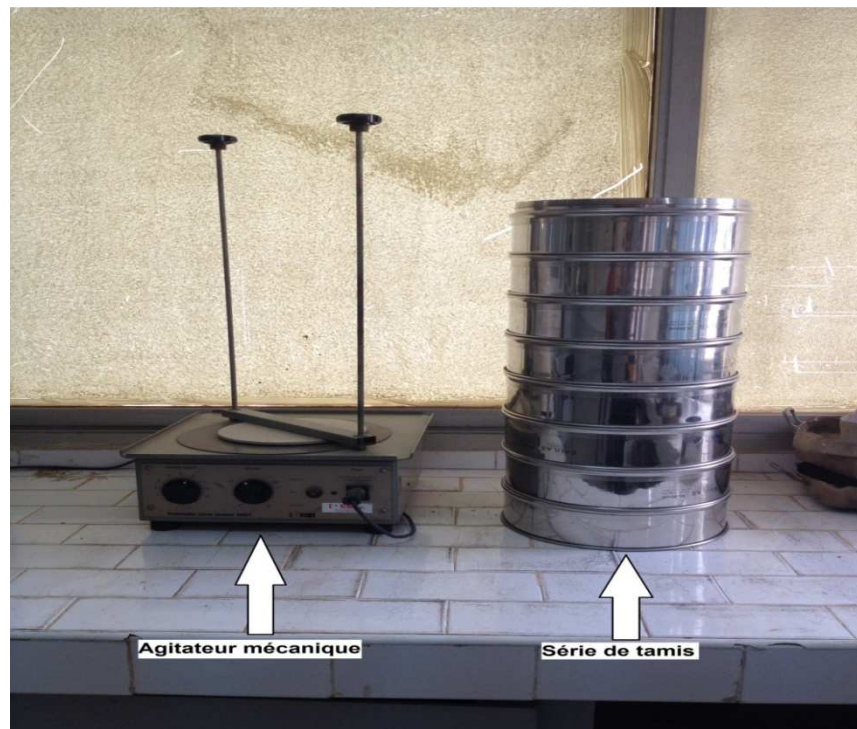


Photo.II.9 : Appareillage de l'analyse granulométrique.

L'échantillon doit avoir été préparé selon les prescriptions des paragraphes « Prélèvements et préparation des échantillons ».

Mode opératoire :

Le choix du plus grand tamis, le nombre et la dimension des autres tamis à utiliser lors de l'essai dépend de la nature des matériaux, de leur état, et de l'objectif fixé à l'analyse granulométrique.

On prend une prise d'essai de notre échantillon en suivant les normes indiquées dans le tableau ci-dessous, et on verse sur les tamis toute en agitant soit manuellement ou mécaniquement à l'aide d'un vibro-tamis, la colonne de tamis. On prend le refus du premier tamis, on le verse dans un récipient et on le pèse, ensuite on passe au tamis suivant, on ajoute son refus à celui du précédent dans le même récipient et on pèse le total. Cette opération se répète pour tout les tamis qui suivent jusqu'à dernier tamis de la colonne.

Expression des résultats :

Les résultats qu'on a obtenus après la réalisation du tamisage sur un sable phosphaté de Khouribga sont présentés dans le tableau comme suit :

Masse à l'état de la prise d'essai : M1 = 1376,1 g

Masse sèche après étuvage : M2 = 1273,2 g

Ouverture tamis (mm)	Masse refus cumulés Ri (g)	% refus cumulés : $\frac{100 \cdot Ri}{M2}$	% tamisats cumulés : $100 \cdot \frac{(1 - Ri)}{M2}$
100,000			
80,000			
63,000			
50,000			
40,000			
31,500			
25,000			
20,000			
16,000			
12,500 (<i>Dm</i>)			100
10,000	1,700	0	100
8,000			
6,300			
5,000	16,30	1	99
4,000			
3,150			
2,500	64,50	5	94
2,000	89,20	7	93
1,600			
1,250			
1,000	217,2	17	83
0,800			
0,630	309,3	24	76
0,500			
0,400			
0,315	469,3	37	63
0,250			
0,200	585,7	46	54
0,160			
0,100			
0,080	919,6	72	28

Tableau. II.2 : Résultats du tamisage du sable phosphaté de Khouribga.

Après l'opération de tamisage, on a tracé la courbe granulométrique, en abscisse on a les ouvertures des tamis en mm et en ordonnées le pourcentage des passants (**Figure. II.2**) :

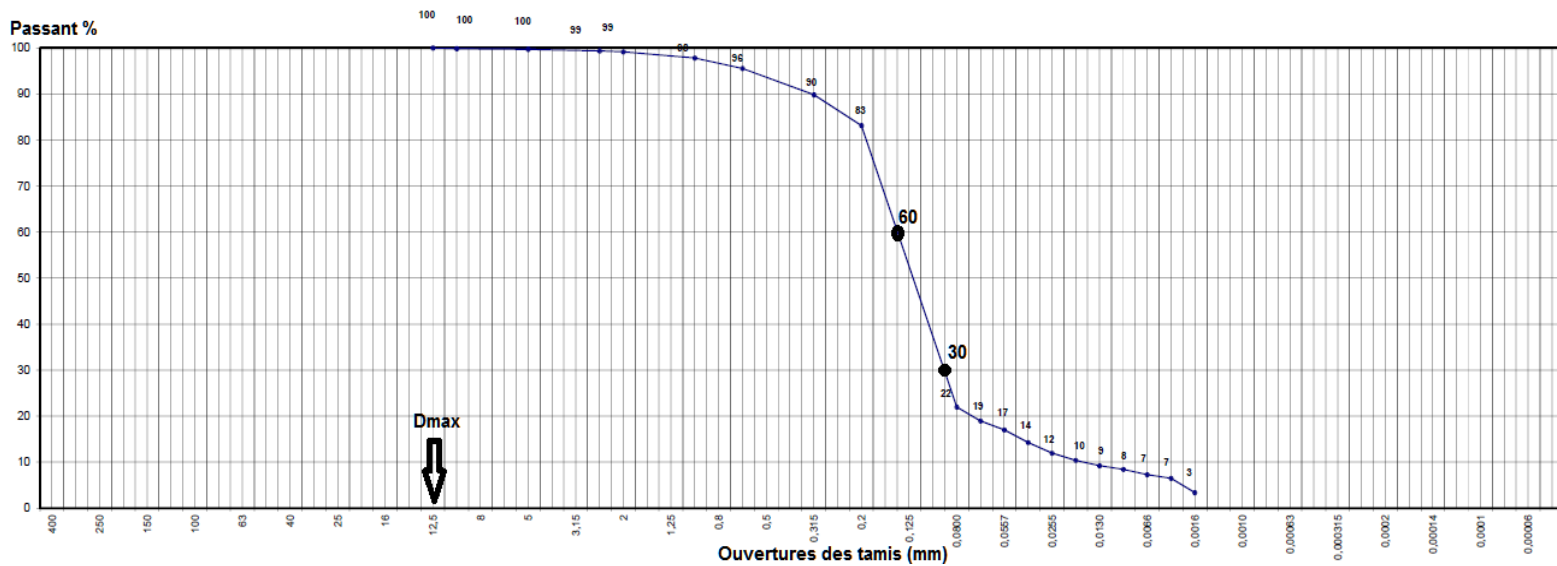


Figure. II.2 : Courbe granulométrique du sable phosphaté.

Cette courbe va nous permettre de calculer les coefficients suivants :

- Coefficient de Hazen ou d'uniformité **Cu** :

$$Cu = \frac{D_{60}}{D_{10}}$$

Ce coefficient nous permet de savoir si la granulométrie est étalée ou serrée :

- Si **Cu < 2** : la granulométrie est serrée.
- Si **Cu > 2** : la granulométrie est étalée.

Pour notre échantillon (le sable phosphaté) on a trouvé :

$$Cu = \frac{0,1437}{0,01925} = 7,46$$

Donc on peut conclure que notre échantillon a une granulométrie étalée.

- Coefficient de courbure **Cc** :

$$Cc = \frac{(D_{30})^2}{D_{60} \cdot D_{10}}$$

Ce coefficient vient en complément de Cu dans la classification des sols, afin de déterminer si la granulométrie est bien graduée ou mal graduée (un sol est mal gradué si une fraction de grains prédomine) :

- Si **Cc < 3** : bien graduée.
- Si **Cc < 1** ou **Cc > 3** : mal graduée.

Pour notre échantillon on a trouvé :

$$Cc = \frac{(0,091)^2}{0,1437 \times 0,01925} = 2,99$$

Donc on peut conclure que notre échantillon a une granulométrie bien graduée.



b) Analyse granulométrique par sédimentation :

But de l'essai :

L'essai consiste à classer la fraction granulométrique inférieure à 80 μm d'un sol, en fonction de la vitesse de décantation des particules fines à très fines, qui est donnée par la loi de stocks, outre, cette vitesse dépend du diamètre des particules et de la viscosité du fluide.

Mode opératoire :

La prise d'essai est de la fraction granulométrique inférieure à 80 μm , récupérée avec son eau de lavage dans un bac, on laisse les particules se décante, une fois redevenue clair, on siphonne l'eau de bac sans entrainer les particules fines.

On introduit le bac et son contenu dans une étuve, toute en faisant attention de la sensibilité du sol à la chaleur.

Après étuvage, on prend 70 à 90 g de l'échantillon sec, le mettre dans un bêcher de 1 litre, on y ajoute une solution d'imbibition composé de 60 ml à 5% d'Hexametapohosphate de Sodium ($\text{Na}_6(\text{PO}_3)_6, 10\text{H}_2\text{O}$) et 440 ml d'eau distillée, préparée et conservée à l'abri de la lumière depuis moins d'un mois, l'imbibition a pour but la dispersion des éléments de l'échantillon, et dure 15 heures, puis on continue la dispersion de notre échantillon par une agitation mécanique qui dure 3 min avec une vitesse d'agitation au minimum 10 000 tr/min (**Photo. II.10**).



Photo. II.10 : Agitateur mécanique.

Immédiatement après l'agitation on verse notre échantillon dispersé dans une éprouvette et compléter jusqu'à 2000 ml par l'eau distillée, par cette même eau, on remplit une éprouvette témoin de 2000 ml, et y plonger le thermomètre et le densimètre.

A l'aide d'un agitateur manuel, on agite vigoureusement verticalement la suspension, afin d'avoir une concentration uniforme sur toute l'éprouvette, en retirant l'agitateur on déclenche le chronomètre, juste après le déclenchement du chronomètre on plonge le densimètre dans la suspension et on prend les lectures depuis le début de l'essai au temps suivants : 30 s, 1 min, 2min, 5min, 10min, 20min, 40min, 80min, 240min, 1440min. Les trois premières lectures de 30s, 1min et 2min, sont faites sans retirer le densimètre du mélange (**Photo. II.11**).

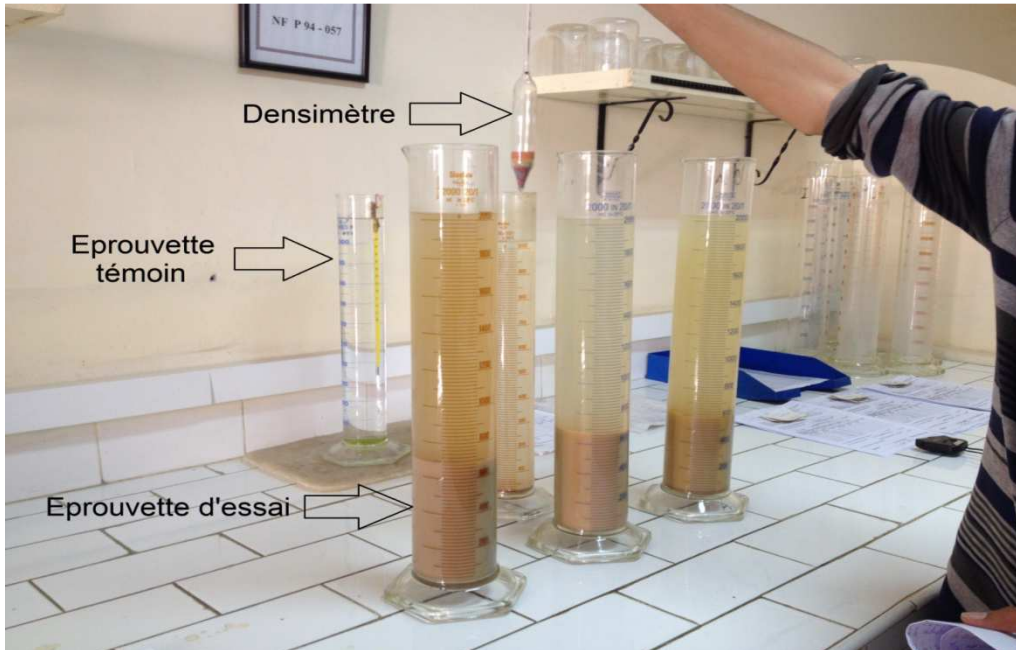


Photo. II.11 : Eprouvette de l'essai analyse granulométrique par sédimentation.

Expression des résultats :

Pour chaque série de lectures, on calcul le pourcentage pondéral d'éléments inférieurs ou égaux à D (diamètre équivalent des plus grosses particules non encore sédimentées) contenus dans la suspension à l'instant t :

$$P = \frac{Vs}{m} \times \frac{\rho_s}{\rho_s - \rho_w} \times \rho_w \times \left[\frac{\rho_t}{\rho_w} - 1 \right]$$

Avec :

P : pourcentage massique (par rapport à la masse de la prise d'essai à l'état sec) des particules de diamètre inférieur ou égal à D (le diamètre équivalent des plus grosses particules non sédimentées).

Vs : volume de la suspension.

m : masse de sol sec prélevée sur le tamisât à 80µm.

ρs : masse volumique des particules solides (par convention 2700 kg / m³).

ρw : masse volumique de l'eau distillée.

ρt : masse volumique de la suspension au temps définie ci-après.

Calcul de la masse volumique de la suspension :

$$\rho_t = R_c \times \rho_w = (R + C_t + C_m + C_d) \times \rho_w$$

Avec : R_c : la lecture corrigé du densimètre à l'instant t.

R : La lecture du densimètre à l'instant t.

C_t : La correction due aux variations de la température en cours d'essai.

C_m : La correction due au ménisque.

C_d : La correction due au défloculant.

C_t , C_m , et C_d étant des facteurs obtenus lors de l'étalonnage de l'appareillage.

c) Teneur en eau d'un sol:

La teneur en eau pondérale d'un sol (W) est le quotient de la masse de l'eau interstitielle (m_w) par la masse des grains solides (masse de matériau sec) noté (m_d).

$$W = \frac{m_w}{m_d}$$

On distingue aussi La teneur en eau dite naturelle lorsque les conditions de prélèvement, de transport et de conservation de l'échantillon n'ont entraîné aucune modification de celle-ci.

La perte d'eau d'un échantillon de sol est déterminée par étuvage. On pèse l'échantillon avant étuvage (m_1) et après étuvage (m_2) et on calcule la différence des masses : humide (m_1) et sèche (m_2), afin d'obtenir la masse d'eau libérée (m_w).

La masse du matériau sur lequel on doit faire l'essai est choisi en fonction de la dimension de ces éléments, et elle doit être supérieur ou égal aux valeurs du tableau. I.2 suivant :

Dm (mm)	0,4	0,5	0,63	0,8	1	5	6,3	8	10
Masse (g)	20	50	100	150	0,2	0,3	0,4	0,5	0,8

12,5	16	20	25	31,5	40	50	63	80	Dm > 80
1,2	2	3	5	8	12	20	30	50	$6 \cdot 10^{-6} \cdot Dm^{3,66}$

Tableau. II.3 : Masses de prise d'essai de la teneur en eau en fonction de la granulométrie.

La température de l'étuvage est fixée en 50 °C pour les sols qui sont sensible à la température élevée (qui contiennent la matière organique), et 105°C pour les sols qui le ne sont pas.

d) La masse volumique :

La masse volumique d'un sol (ρ) est par définition, le rapport de sa masse (m) sur son volume (V), y compris les fluides qu'il contient.

$$\rho = \frac{m}{V}$$

La masse de l'échantillon est déterminé par pesage, pour le volume il existe deux méthodes :

- **Méthode géométrique :**

On calcule le volume à partir des données géométriques de la trousse coupante ou du moule qui contient l'échantillon.

- *Méthode par pesés ou immersion dans l'eau :*

On prend un échantillon de forme simple, et d'une masse comprise entre 0,1 et 0,5 Kg, on le pèse (m_1), puis on le couvre par la paraffine qu'on connaît sa masse volumique ($\rho_{\text{paraffine}} = 0,88 \text{ g/Cm}^3$), ensuite on pèse tout l'ensemble (m_2) pour déterminer la masse du paraffine et donc on peut conclure par la suite son volume :

$$V_{\text{paraffine}} = (m_2 - m_1) / \rho_{\text{paraffine}}$$

Ensuite on immerge l'échantillon paraffiné dans un bassin rempli d'eau et on pèse sa masse (m_p), le but de cet opération, est de déterminer le volume de l'échantillon avec paraffine qui est donné par la relation suivante :

$$V (\text{échantillon} + \text{paraffine}) = \frac{\text{masse eau déplacée}}{\rho_{\text{eau}}} = \frac{m_2 - m_p}{\rho_{\text{eau}}}$$

Pour calculer ensuite le volume de l'échantillon sans paraffine, donc on a comme résultat :

$$V \text{ échantillon} = V (\text{échantillon} + \text{paraffine}) - V \text{ paraffine}$$

$$V \text{ échantillon} = \frac{m_2 - m_p}{\rho_{\text{eau}}} - \frac{m_2 - m_1}{\rho_{\text{paraffine}}}$$

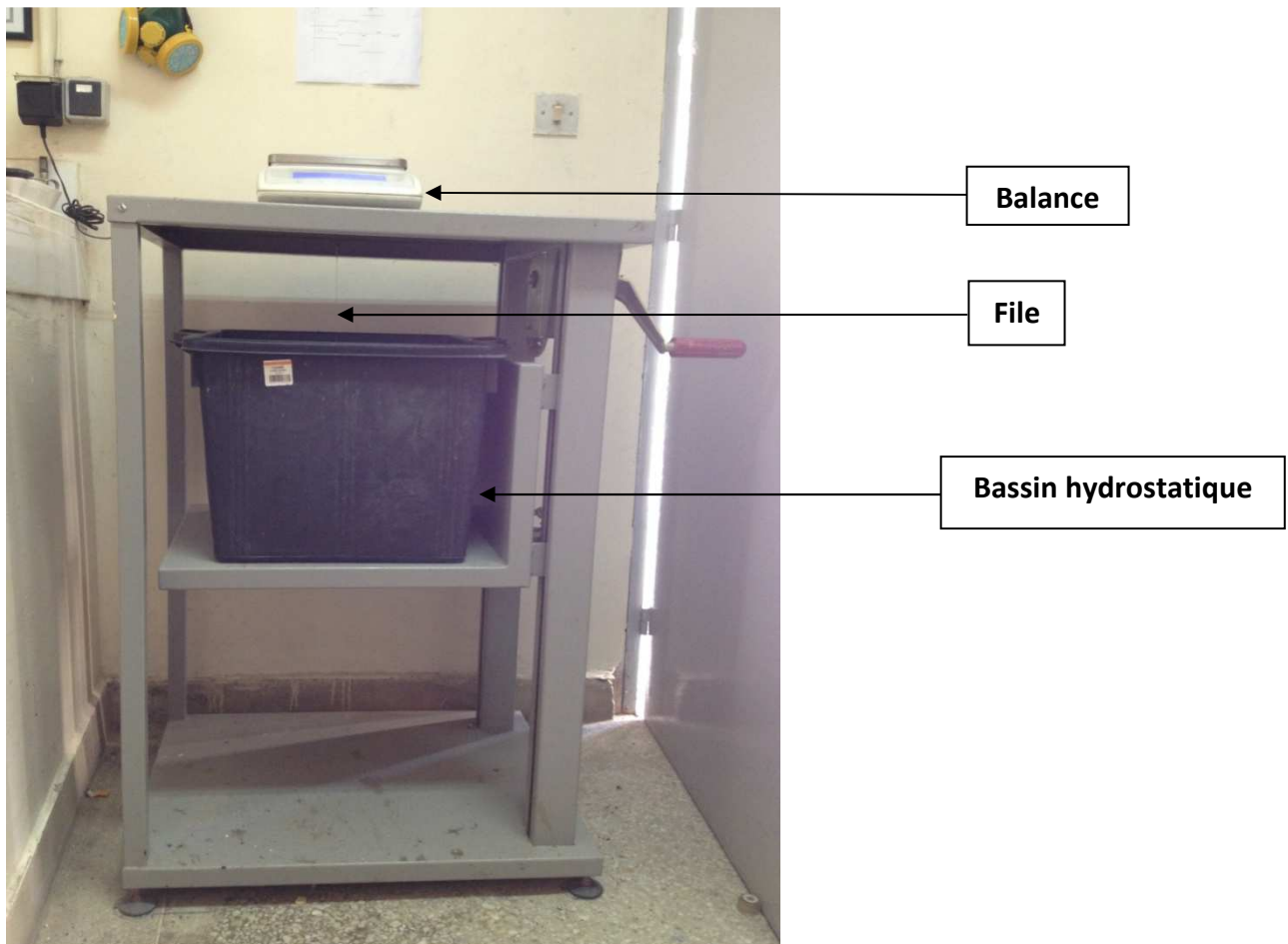


Photo. II.12 : Matériel de la pesée hydrostatique.

e) *Le poids spécifique des grains (γ_s) :*

But de l'essai :

L'intérêt de cet essai est de déterminer le poids spécifique (γ_s) propre du squelette solide d'un sol, à l'aide d'un pycnomètre à eau. (Photo. II.11), la prise d'essai qui est la fraction granulométrique inférieure à 2 mm, peut être faite sur les échantillons remaniés ainsi que les intacts.

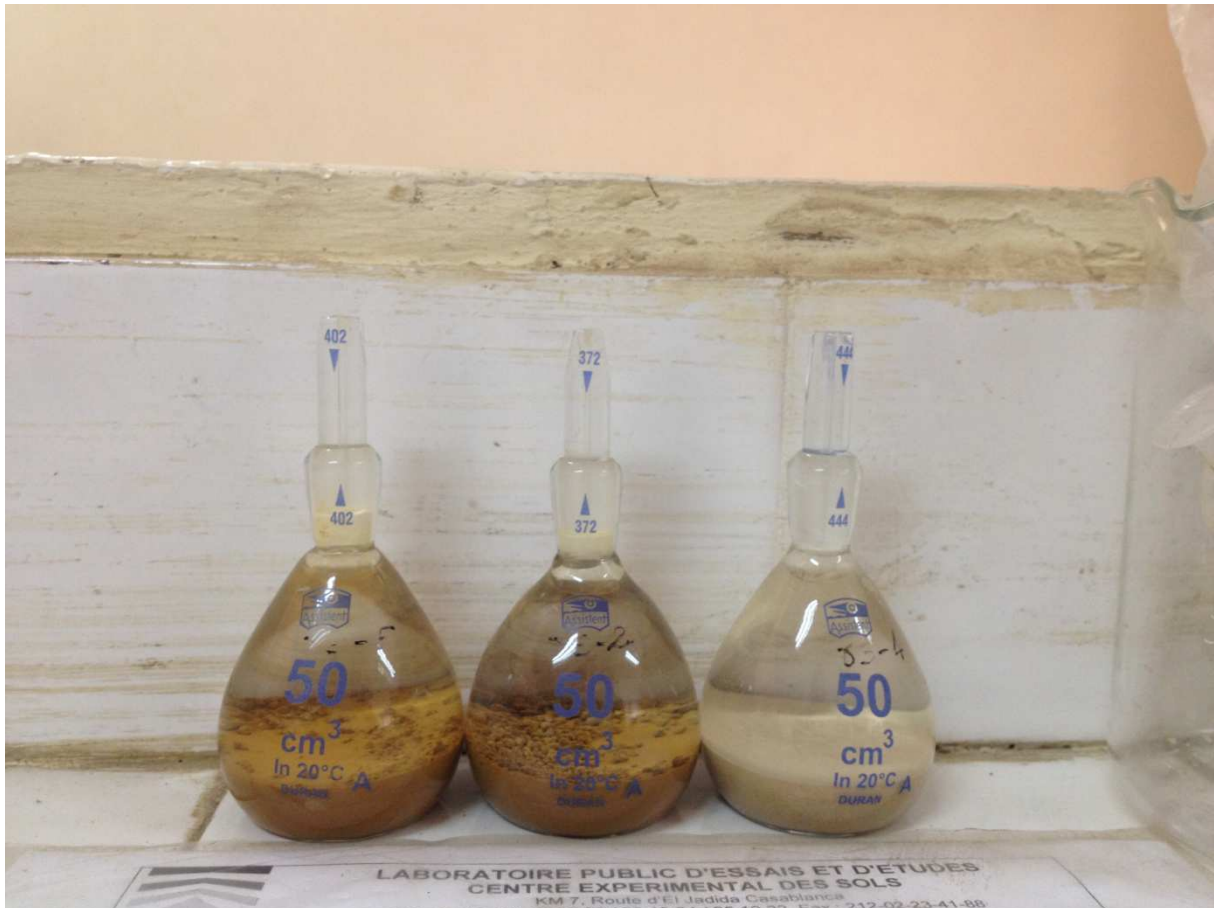


Photo. II.13 : Pycnomètres.

Mode opératoire :

La prise d'essai est 25 g de la fraction granulométrique 2 mm, on la met dans une tare d'une masse connue et on l'introduit dans une étuve. Il faut faire attention si le sol est sensible à la chaleur ou non pour savoir sous quelle température on doit l'étuver.

Après étuvage, on prend un pycnomètre, débarrassé de toutes particules adhérentes à sa surface extérieure, et on le pèse avec son bouchon à l'état vide pour savoir sa masse propre (m_1), ensuite on met notre prise d'essai dedans et on pèse (m_2), ensuite on complète par l'eau distillée et on élimine l'air emprisonné dans les vides, on appelle cette étape le désaéragé, pour ceci on a le choix entre deux méthodes selon la nature du sol s'il est sensible à la chaleur, donc on procède au désaéragé par la cloche à vide (Photo. II.14).



Photo. II.14 : Cloche à vide.

S'il n'est pas sensible à la chaleur on désaéragé par ébullition.

Après le désaéragé qui dure 30 min, on pèse l'ensemble (m3), puis le pycnomètre est vidé, nettoyé et remplie d'eau distillée, après 30 min on pèse encore l'ensemble (m4).

Expression des résultats :

$$\rho_s = \frac{\rho_w \cdot (m_2 - m_1)}{(m_4 + m_2 - m_1 - m_3)}$$

Avec : ρ_s : Masse volumique des grains solides.

ρ_w : Masse volumique de l'eau.

m1 : Masse du pycnomètre vide.

m2 : Masse du pycnomètre contenant la prise d'essai.

m3 : Masse du pycnomètre, du sol et d'eau.

m4 : Masse du pycnomètre remplie d'eau.

f) Valeur en Bleu de Méthylène d'un Sol (V.B.S) :

Objectif de l'essai :

Le but de l'essai est de déterminer par dosage la quantité de bleu de méthylène adsorbé par un sol, cette quantité est rapportée par proportionnalité directe à la fraction 0/50 mm du sol.

La valeur de bleu du sol (V.B.S), est directement liée à la surface spécifique des particules constituant le sol. Etant donné que dans un sol c'est avant tout la surface des particules contenues dans sa fraction argileuse ($\leq 2\mu m$) qui détermine sa surface spécifique, on peut considérer alors que la valeur de bleu de méthylène (V.B.S), exprime globalement la quantité et la qualité (activité) de la fraction argileuse contenue dans ce sol.

Mode opératoire :

La prise d'essai est faite sur la fraction granulométrique 5 mm :

- S'il s'agit d'un sol argileux à très argileux : on prend 30 g à 60 g.
- S'il s'agit d'un sol moyennement à peu argileux : on plus que 60 g.

On a 3 prises d'essais :

- La première prise d'essai de masse mh1 est introduite dans le récipient de 3 000 cm³, mise en suspension dans (500 ± 10) cm³ d'eau déminéralisée et dispersée à l'aide de l'agitateur à ailettes (vitesse (700 ± 100) tr/min et positionné à 5 mm environ du fond du récipient) durant 5 min au minimum jusqu'à la disparition de toute agglomération de particules de sol.
- La deuxième prise d'essai de masse mh2, est utilisée pour déterminer la teneur en eau de chacune des prises d'essai.
- La troisième prise d'essai de masse mh3 est conservée dans l'éventualité où l'essai doit être renouvelé.

La prise d'essai étant mise en suspension comme décrit précédemment, procéder au dosage de bleu de méthylène comme indiqué ci-après :

On procède à des injections successives par pas de 5 cm³ à 10 cm³ (selon l'argilosité du sol) de solution de bleu de méthylène dans une suspension de sol maintenue en agitation avec une vitesse (400 tr/min ± 100 tr/min), et on prélève périodiquement des gouttes de la suspension que l'on dépose sur un papier chromatographique. Les injections sont poursuivies jusqu'à l'apparition d'une auréole périphérique bleu clair, de largeur millimétrique, On peut considérer que l'adsorption du bleu sur les particules est terminée et que c'est l'excès de bleu de méthylène qui apparaît dans l'auréole, l'essai est dit alors positif.



Photo. II.15 : Appareil de dosage par bleu de méthylène



Photo. II.16 : Papier chromatographique

À partir de ce moment, laisser se poursuivre l'adsorption du bleu dans la solution et effectuer des taches, de minute en minute, sans ajout de solution, si l'essai redevient négatif à la cinquième tache ou avant, procéder à de nouvelles injections de bleu avec des pas de 2 cm^3 à 5 cm^3 , selon l'argilosité du matériau, en lieu et place des pas de 5 cm^3 à 10 cm^3 introduits précédemment.

Chaque addition est suivie des taches effectuées de minute en minute. Ces opérations sont renouvelées jusqu'à ce que l'essai reste positif pour cinq taches consécutives. Le dosage est alors terminé et l'on détermine le volume total (V) de la solution de bleu qui a été nécessaire pour atteindre l'adsorption totale.

Dans tous les cas, le volume V doit être supérieur à 10 cm^3 . Si le volume V est inférieur à 10 cm^3 , l'essai doit être recommencé avec une prise d'essai de masse supérieure.

Expression des résultats :

Les calculs à exécuter sont :

- Teneur en eau de l'échantillon soumis à l'essai (0/5 mm) :

$$w = \frac{mh2 - ms2}{ms2}$$

- Masse sèche de la prise d'essai :

$$m_o = \frac{mh1}{1 + w}$$

- Masse de bleu introduite (solution à 10g/l) :

$$B = V \times 0,01$$

- Valeur de bleu de méthylène (V.B.S) :

➤ Pour les matériaux dont le Dmax est inférieur à 5 mm, l'expression du résultat est :

$$VBS = \frac{B}{m_o} \times 100$$

➤ Pour les matériaux dont Dmax est supérieur à 5 mm, l'expression du résultat est :

$$VBS = \frac{B}{m_o} \times C \times 100$$

VBS est exprimée en grammes de bleu pour 100g de matériau sec.

C étant la proportion de la fraction 0/5 mm dans la fraction 0/50 mm du matériau sec.

Avec : **VBS** est la valeur de bleu de méthylène d'un sol. Elle s'exprime en grammes de bleu pour 100 g de la fraction 0/50 mm du sol étudié.

Dmax est la dimension maximale des plus gros éléments contenus dans le sol.

mh1 est la masse humide de l'échantillon constituant la première prise d'essai (exprimée en grammes).

mh2 est la masse humide de l'échantillon prévu pour être séché, constituant la deuxième prise d'essai (exprimée en grammes).

mh3 est la masse humide de l'échantillon constituant la troisième prise d'essai (exprimée en grammes).

ms2 est la masse de l'échantillon après séchage, correspondant à la deuxième prise d'essai (exprimée en grammes).

B est la masse de bleu introduite dans la solution (solution à 10 g/l).

V est le volume de la solution de bleu utilisée (exprimé en centimètres cubes).
C est la proportion de la fraction 0/5 mm dans la fraction 0/50 mm du matériau sec.
w est la teneur en eau, exprimée en valeur décimale.

Ordre de grandeurs :

VBS < 0,1 : Sol insensible à l'eau ;
0,2 ≤ VBS < 1,5 : Sol Sablo limoneux, sensible à l'eau ;
1,5 ≤ VBS < 2,5 : Sol Sablo argileux ;
2,5 ≤ VBS < 6 : Sol limoneux;
6 ≤ VBS < 8 : Sol argileux;
VBS ≥ 8 : Sol très argileux.

Pour notre échantillon on a trouvé les résultats suivants :

- Diamètre maximale des plus gros éléments contenus dans le matériau (Dmax) : 12,5 mm ;
- Proportion de la fraction 0/5 mm contenue dans le matériau noté (C) : 99 % ;
- Masse humide de l'échantillon constituant la première prise d'essai notée (mh1) : 67,047 g ;
- Masse humide de l'échantillon constituant la deuxième prise d'essai notée (mh2) : 194,544 g ;
- Masse sèche de l'échantillon constituant la deuxième prise d'essai notée (ms2) : 180 g ;
- Teneur en eau notée W : 8,08 % ;
- Masse sèche de la prise d'essai notée m0 : 62,034 g ;

Résultats du dosage :

Volume solution injecté	25	25	10	10	10	10
Résultat du test	-	-	-	-	-	+

Tableau. II.4 : Volume du bleu de méthylène injecté (le signe + indique le volume équivalent à l'apparition de l'auréole)

- Volume totale de la solution de bleu utilisé : $V = 90 \text{ cm}^3$;
- Masse de la solution de bleu utilisé : $B = V \times 0.01 = 0.9 \text{ g}$;
- Valeur de bleu (exprimée en gramme de bleu pour 100g de matériau sec :

$$VBS = 100 \times C \times B / m_0 = 1,43$$

Donc on peut conclure d'après la VBS trouvée qui est égale à 1,43, que c'est un sol sableux.

g) Limites d'ATTERBERG :

Les limites d'Atterberg sont des paramètres géotechniques permettant d'identifier un sol et à caractériser son état grâce à son indice de consistance. On peut considérer quatre états caractérisant la consistance des sols fins. Pour des teneurs en eau décroissante:

- l'état liquide:
 - Consistance très faible ;

- Aspect d'un fluide ;
- Les particules glissent facilement les unes sur les autres.
- L'état plastique:
 - Consistance plus importante ;
 - Le sol se déforme largement sans se rompre, et garde sa déformation après suppression des contraintes ;
 - Couches adsorbées partagées entre les particules.
- L'état solide : (avec retrait)
 - Le sol retrouve sa forme initiale après suppression des contraintes (petites déformations élastiques)
- L'état solide : (Sans retrait)
 - Contact entre les particules du sol en chassant l'eau adsorbée.

Les limites d'Atterberg sont:

- la **limite de liquidité** WL : qui représente le passage entre l'état liquide et plastique ;
- la **limite de plasticité** WP : qui représente le passage entre l'état plastique et solide. Ces limites permettent de calculer l'indice de plasticité noté I_p .



Limite de liquidité par méthode pénétration à cône :

But de l'essai :

L'essai consiste à mesurer l'enfoncement d'un cône, à l'aide d'un pénétromètre (**Photo. II.15**), après un temps fixé, sous son propre poids dans un échantillon de sol remanié.



Photo. II.17: Appareil de pénétration à cône (Pénétrromètre).

Mode opératoire :

La prise d'essai est faite sur la fraction granulométrique $400\mu m$

Après tamisage par voie humide sur tamis de $400\mu m$, l'eau de lavage et le tamisat sont recueillis dans un bac, on laisse décanter les particules, après on siphonne l'eau clair, l'eau excédentaire est évaporée à une température ne dépassant pas $50\text{ }^{\circ}\text{C}$.

On règle l'horizontalité du socle, en s'assurant que la pointe du cône est propre et lisse.

On malaxe sur une plaque de marbre lisse, la totalité du tamisat préparé afin d'obtenir une pâte homogène et presque fluide.

On remplit le récipient avec une partie de cette pâte au moyen d'une spatule, en prenant soin de ne pas emprisonner des bulles d'air, ensuite on met le récipient en place sous le cône en ajustant la position de la pointe du cône approximativement au centre de la surface.

On libère le cône et on le laisse s'enfoncer pendant $5\text{ s} \pm 1\text{ s}$ puis le bloquer, et on note sa nouvelle position. (**Photos .II.16 et II.17**).

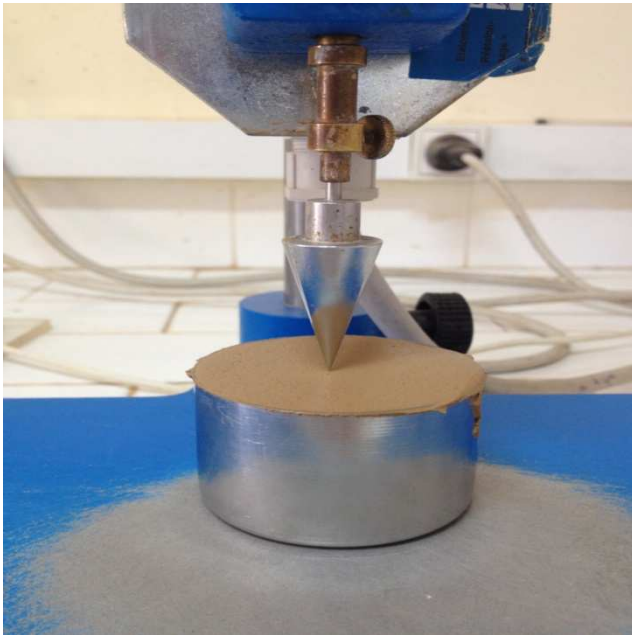


Photo .II.18 : Cône avant de pénétration

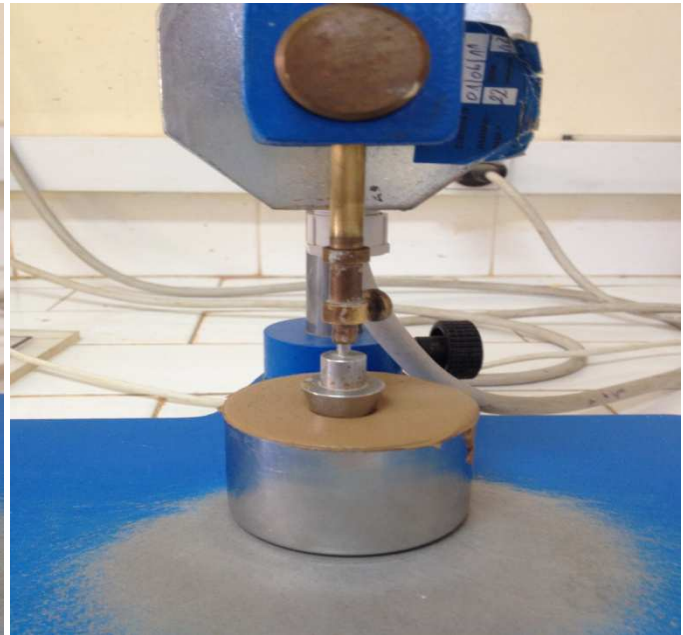


Photo .II.19 : Cône après pénétration

Cette opération est effectuée au moins quatre fois sur la même pâte mais avec une teneur en eau différente pour chaque essai, les enfoncements du cône doivent encadrer 17 mm, être situés dans l'intervalle 12 mm à 25 mm, et l'écart entre deux valeurs consécutives doit être compris entre 2 mm et 5 mm inclus.

Expression des résultats :

La limite de liquidité WL, est la teneur en eau du matériau qui correspond conventionnellement à un enfoncement de 17 mm du cône, elle est déterminée à partir de la droite moyenne ajustée sur les couples de valeurs mesurées enfoncement-teueur en eau. (**Figure .II.3**).

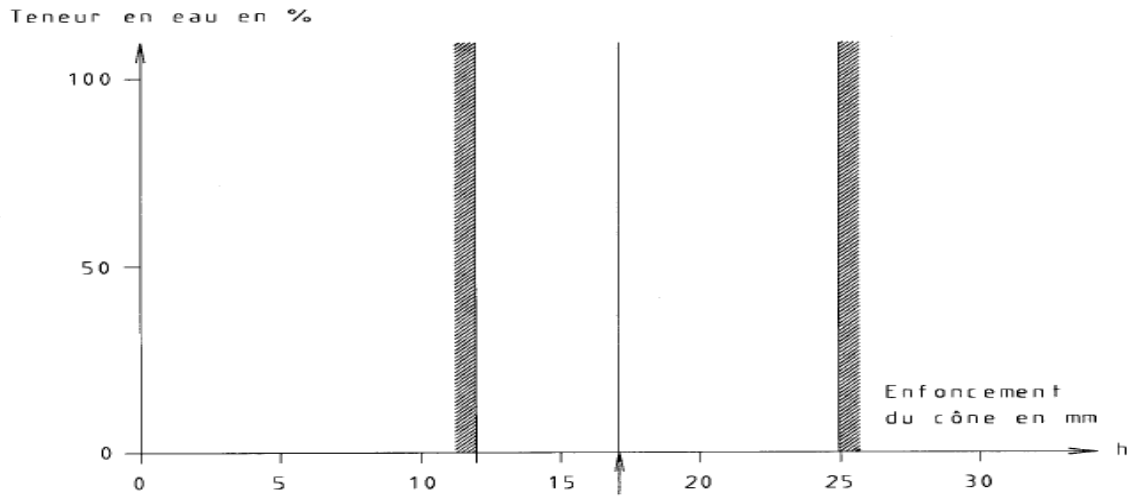


Figure. II.3 : courbe de la limite de liquidité W_L



Limite de plasticité :

On prélève une portion d'échantillon afin de former une boule. Celle-ci est roulée à la main sur la plaque de marbre dans le but d'obtenir un rouleau qui est aminci progressivement jusqu'à ce qu'il atteigne 3mm de diamètre (**Photo. II.18**). Au moment où il atteint 3 mm de diamètre, le rouleau doit mesurer environ 10cm de long. La limite de plasticité est atteinte lorsque simultanément le rouleau se fissure et que son diamètre est de $3\text{mm} \pm 0.5\text{mm}$.

Une fois les fissures apparues, le centre du rouleau est prélevé et placé dans une boîte de Piétri afin de mesurer sa teneur en eau. C'est cette teneur qui représente la limite de plasticité W_p .



Photo. II.20: Rouleaux de sol.

Indice de plasticité I_p :

$$I_p = WL - WP$$

L'indice de plasticité permet de définir l'étendue du domaine plastique d'un sol, c'est le paramètre le plus couramment utilisé pour caractériser l'argilosité d'un sol. Plus cet indice est grand plus le sol est plastique et argileux.

Ordre de grandeurs :
 $0 < I_p \leq 12$: sol faiblement argileux ;
 $12 < I_p \leq 25$: Sol moyennement argileux ;
 $25 < I_p \leq 40$: Sol argileux ;
 $I_p > 40$: Sol très argileux.

Les résultats des limites d'Atterberg qu'on a pu obtenir après la réalisation des essais sont présentés dans le tableau ci-dessous :

	Limite de liquidité				Limite de plasticité au rouleau
Etuvage à 105°C	NF P 94 – 052 -1				NF P 94 - 051
Enfoncement (mm)	12,00	16,00	20,00	24,00	NON MESURABLE
N° de la tare	B13	161	261	148	
Masse totale humide mh (g)	35,168	37,347	35,053	36,037	
Masse totale sec ms (g) (1 ^{ere} pesée)	32,168	33,944	31,326	32,536	
Masse totale sec ms (g) (2 ^{ème} pesée)	32,156	33,932	31,213	32,536	
Masse de la tare mt (g)	17,434	18,213	18,142	17,724	
Masse de l'eau me (g)	3,00	3,403	3,127	3,489	
Masse du sol sec ms (g)	14,734	15,731	13,784	14,824	
Teneur en eau (%)	20,365	21,635	22,688	23,542	

Tableau. II.5 : Résultats de la limite de liquidité du sable phosphaté de Khouribga.

A partir de ce tableau on a tracé à l'aide du logiciel Grapher (Demo version), la courbe Teneur en eau en fonction de l'enfoncement en (mm), présenté dans la figure ci-dessous :

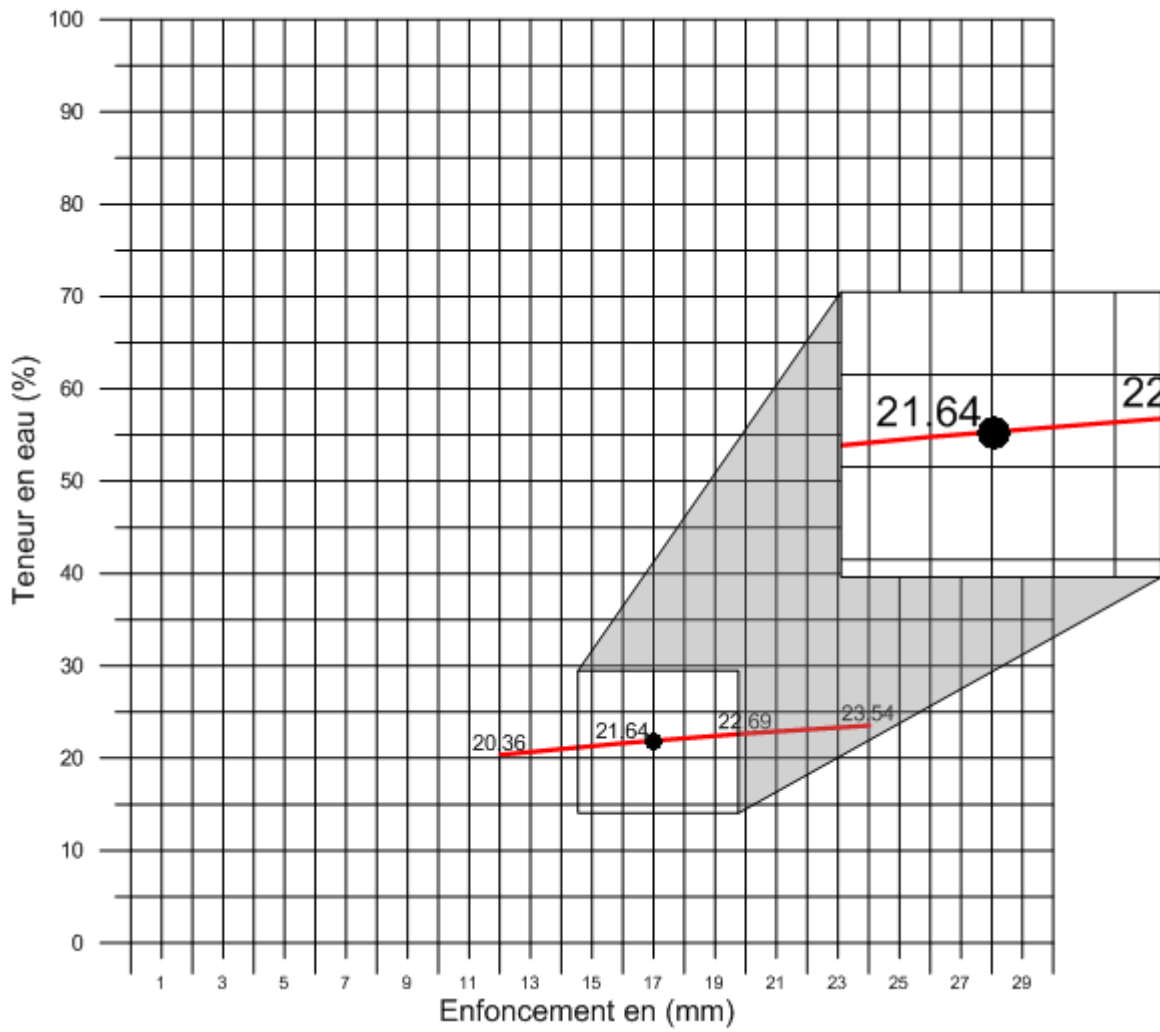


Figure. II.4 : Courbe de la limite de liquidité tracée à l'aide du logiciel Grapher.

A partir de cette courbe qu'on a tracée, on peut bien identifier la teneur en eau correspondante à un enfoncement du cône égale à 17 mm, qui est la limite de liquidité :

$$W_L = 21,64 \%$$

La limite de plasticité est non mesurable, car il s'agit d'un sable, et par conséquent on ne peut pas calculer son indice de plasticité.

II.2.1.3) Essais mécanique sur sol

a) Essai triaxial :

Objectif de l'essai :

Le présent essai permet d'identifier les caractéristiques intrinsèques du sol en coordonnées effectifs (c' et ϕ').

L'essai comporte 3 types suivant l'objectif à atteindre : UU

- Essai non consolidé non drainé (UU) correspond au comportement à court terme du sol en place ;
- Essai consolidé drainé (CD) correspond au comportement à long terme ;

- Essai consolidé non drainé (CU) traité dans notre cas.

La réalisation d'un essai consolidé non drainé avec mesure de pression interstitielle (CU+u) comporte le cisaillement d'au moins trois éprouvettes provenant du même échantillon, préparée dans les mêmes conditions et soumis à des pressions de consolidations différentes.

Pour chaque éprouvette : l'essai comporte trois étapes :

- La préparation et l'installation de l'éprouvette dans la cellule triaxiale
- Saturation
- Consolidation
- Le cisaillement

Mode opératoire :

Préparation de l'échantillon :

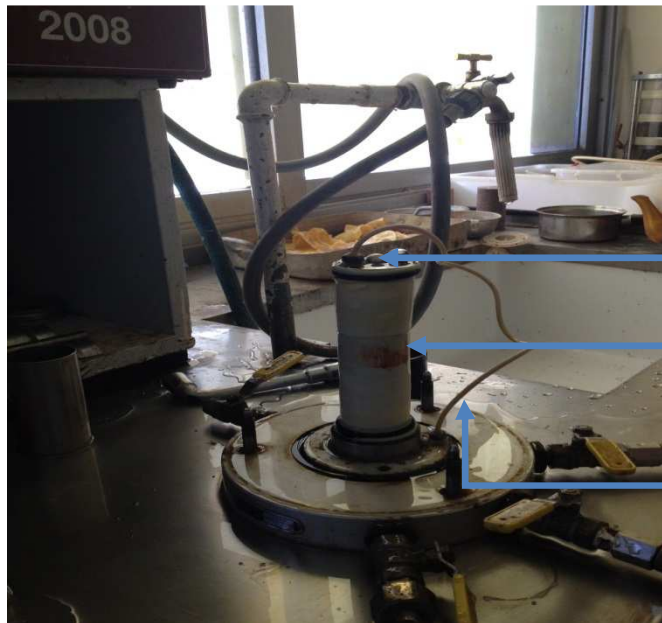
Avant la préparation d'un échantillon remanié, il faut tout d'abord évaluer la quantité qu'il faudra ajouter pour l'essai, en fait le volume de l'éprouvette d'essai est déjà connu suivant la norme, il suffit de rajouter la masse adéquate pour que la densité de l'échantillon dans l'éprouvette après compactage soit identique à celle en place.



Photo. II.21 : Préparation de l'échantillon pour le compactage.

Photo. II.22 : Machine de compactage

Ensuite l'éprouvette est mise à l'intérieur de la cellule triaxial pour la prochaine phase, enveloppée par une membrane étanche entre deux embases (inférieures et supérieures) pour le drainage (**Photo. II.21**).



Embase supérieur
 éprouvette d'essai recouverte
 par une membrane étanche
 Circuit de drainage

Photo. II.23 : installation de l'éprouvette dans la cellule triaxiale.

On remplit la cellule de l'eau pour exercer la contrainte latérale pour les prochaines phases. L'éprouvette est prête pour la phase de la saturation.

Saturation des éprouvettes :

On applique sur la cellule (notons que le circuit de drainage ayant été fermé) la pression σ_c (pression de la cellule) et une contre pression U_{cp} (**Photo. II.22**)



Capteur de U_{cp}
 Circuit Assurant la contre pression

Photo. II.24 : saturation de l'échantillon.

En général :

$$\sigma_c = \frac{2}{3}\sigma'_{v0} + U_{c0}$$

U_{cp} doit être inférieure à σ_c d'au moins 20kPa, pour que l'éprouvette ne soit pas immergée.

Lorsque ces valeurs ne sont pas connues on prend $\sigma_c=50\text{kPa}$ et $U_{cp}=30\text{kPa}$

- On règle le circuit de contre pression à la valeur u_{cp} ;
- On ouvre le drainage ;
- On attend environ 30min pour obtenir la stabilisation de l'écoulement du liquide circulant dans l'éprouvette sous cet état initial ;

- Le degré de saturation doit être supérieur ou égale à 99%.

La consolidation

Phase pour laquelle l'échantillon est soumis à une pression de confinement, la valve de drainage étant ouverte.

- On trace le diagramme de la variation du volume (Δv) en fonction de la racine du temps comme l'indique la **figure. II. 4**.
- On déduit la valeur de t_{100} qui correspond à la fin de la consolidation (**Fig. II. 4**).

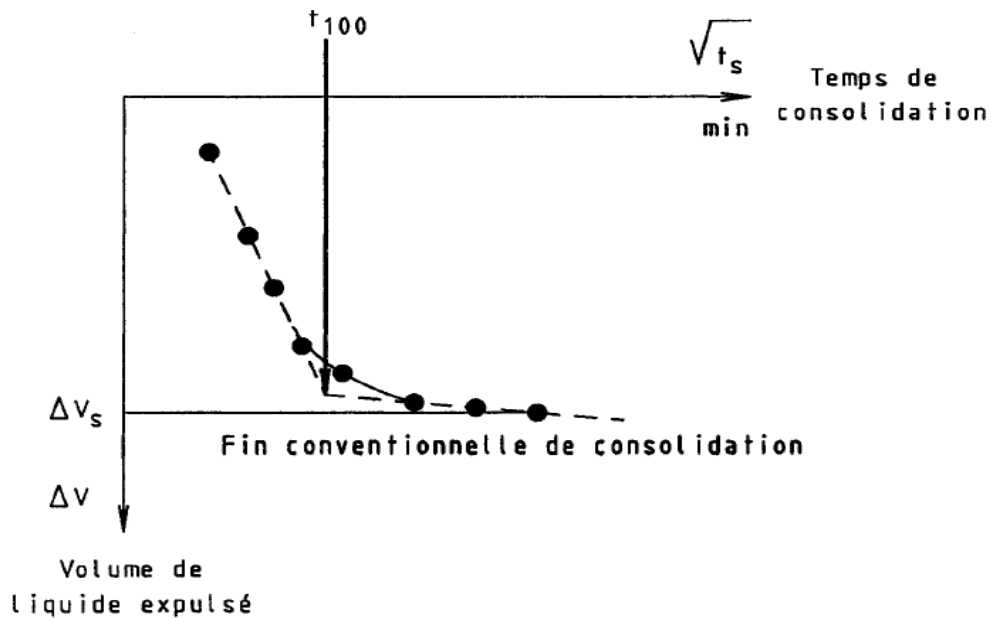


Figure. II.5 : détermination de la valeur de t_{100}

➤ *cisaillement non drainé avec mesure de U :*

A la fin de la consolidation, les circuits de drainage sont fermés et le cisaillement commence aussitôt avec une vitesse d'écrasement ne dépassant pas la vitesse maximale évaluée par :

$$V_{\max} = \frac{H_0 - \mathcal{E}f}{a \cdot T_{100}}$$

Avec :

a est donné dans le tableau.II.3

$\mathcal{E}f$: est la déformation à la rupture présumée, en l'absence de l'information, adoptant $\mathcal{E}f = 3\%$ pour les sols raides et $\mathcal{E}f = 6\%$ pour les autres cas ;

T_{100} : la valeur de la durée de la consolidation déduite de la **Figure. II.4** la valeur minimale prise en compte est de 10 min ;

* H_0 : est la hauteur initiale de l'éprouvette.

a			
Drainage aux deux extrémités avec drain latéral	Drainage aux deux extrémités sans drain latéral	Drainage à une extrémité avec drain latéral	Drainage à une extrémité sans drain latéral
2,3	2,1	1,8	0,53

Tableau. II.6 : Valeurs de a, en fonction du type de drainage (suivant la norme indiquée dans la partie bibliographie et références)

Toutes les éprouvette d'un même essai sont cisailées, si possible, à la même vitesse.

On effectue la mesure des paramètres suivants pour chaque prise d'essai :

- Force axiale : F_i
- Déplacement axiale : ΔH_i
- Pression dans la cellule : σ
- Pression interstitielle : u_i

On trace les cycles de Mohr et on en déduit les paramètres intrinsèques du sol à long terme (c' et ϕ') figure. II.5 ci-dessous :

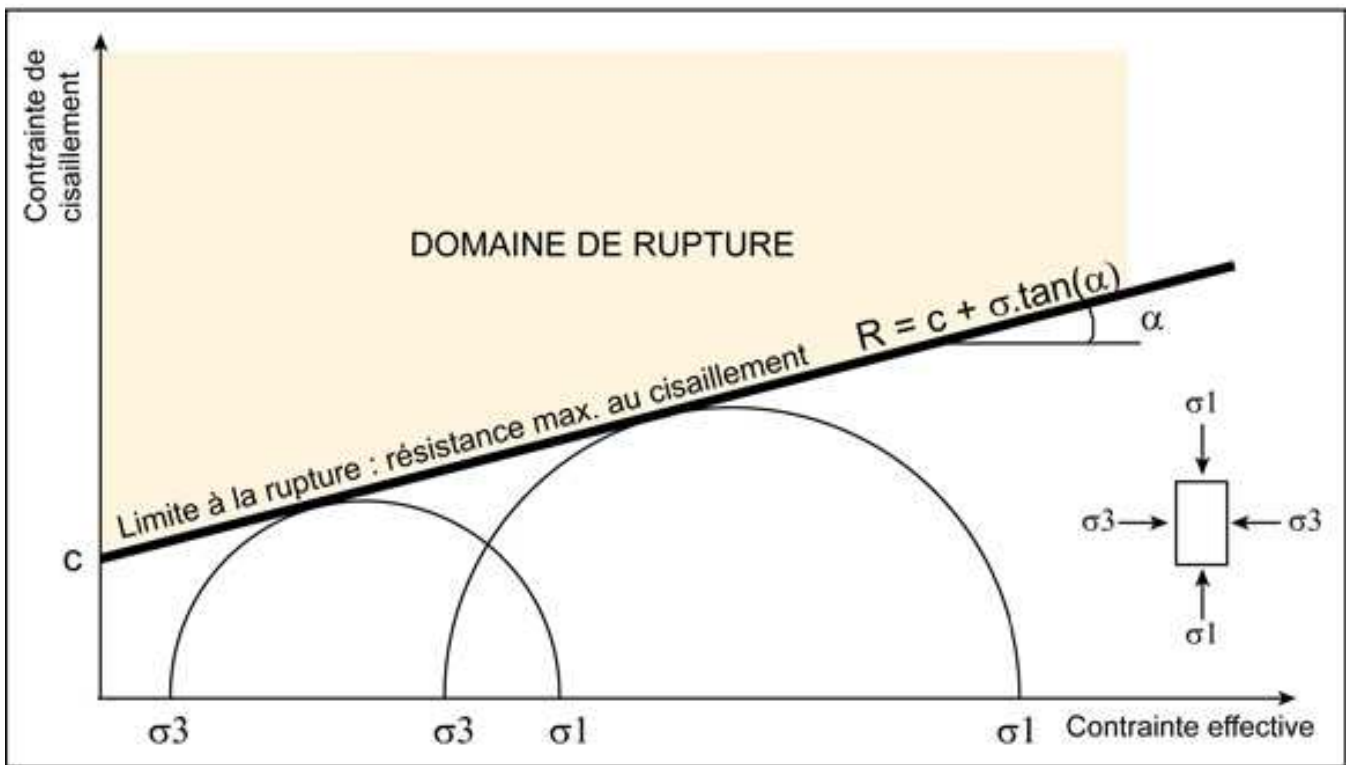


Figure. II.6 : Cercles de Mohr.

II.2.1.4) Essais mécanique sur roche :

a) Essai Los Angeles :

Le présent essai a pour but de mesurer la résistance à la fragmentation par chocs des éléments d'un échantillon de granulats.

Il s'applique aux granulats d'origine naturelle ou artificielle utilisés dans le domaine du bâtiment et du génie-civil.

Principe :

L'essai consiste à mesurer la quantité d'éléments inférieurs à 1,6 mm produit en soumettant le matériau aux chocs de boulets, normalisés, dans la machine Los Angeles (**Photo. II.23**)



Photo. II.25 : Machine de Los Angeles.

La granularité du matériau soumis à l'essai est choisie parmi les six classes granulaires et le nombre de boulets varie suivant les classes granulaires conformément aux indications du tableau.II.4 ci-dessous :

Classes granulaires (mm)	Nombre de boulets
4-6,3	7
6,3-10	9
10-14	11
10-25	11
16-31,5	12
25-50	12

Tableau. II.7 : Nombre de boulets à utiliser selon la classe granulométrique.

Les boulets, de 47mm ± 1mm diamètre pesant entre 420 g et 445 g, sont en acier

La masse de l'échantillon pour essai sera 5000 g ± 5g

La machine subit à 500 rotations, sauf pour la classe 25-50mm où l'on effectue 1000 rotations, à une vitesse comprise entre 30tr/min et 33tr/min.

Le coefficient Los Angeles vaut :

$$La = \frac{m}{5000} * 100$$

Avec:

m : la masse des éléments dont le diamètre est inférieur à 1,6mm après essai

b) Essai Cerchar (Abrasive) :



Photo. II.26 : Machine de l'abrasivité.

La présente norme concerne l'essai de rayure avec une pointe à l'aide d'une machine d'Abrasive (**Photo. II.24**), dont le résultat est exprimé par l'indice d'Abrasive au pic AIN, qui indique l'aptitude d'une roche à user un outil qui la raye.

L'essai consiste à :

- Pratiquer une rayure sur l'échantillon de roche au moyen d'une pointe en acier (**Figure. II.6**) soumis à un effort constant (70kN) orthogonal à la surface de l'échantillon de roche en effectuant un déplacement de 1cm.
- Mesurer la longueur **d** de la pointe subissant un frottement lors du déplacement sous la contrainte normale qui s'est maintenu constante (**Figure .II.7**)

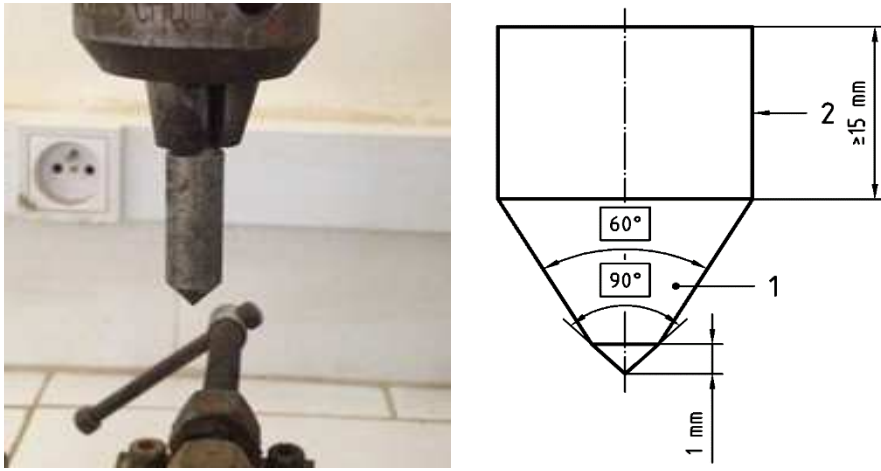


Figure. II.7 : Caractéristiques géométriques de la pointe d'un pic d'abrasivité :
1-pointe du pic ; 2-corps du pic.

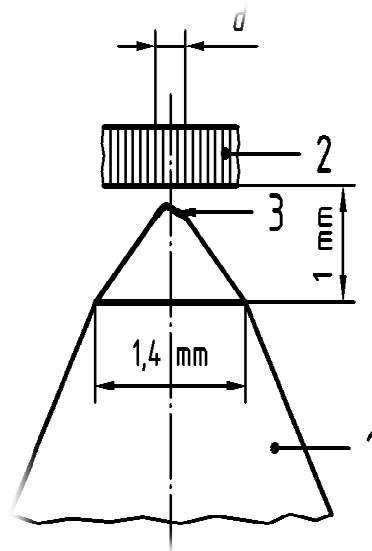


Figure .II.8: Usure de l'extrémité de la pointe du pic — Exemple : 1-pointe ; 2-échelle microscopique ; 3-méplat

La détermination de la longueur d'abrasion de la pointe du pic nécessite un stéréo-microscope. L'indice d'Abrasivité au pic est calculé conventionnellement, pour chaque rayure, par la formule suivante :

$$AIN=10^{-2} \cdot d$$

Où :

d est la longueur du méplat exprimée en micromètre (*Figure .II.7*).

c) *Résistance en compression simple :*

Objectif de l'essai

L'essai a pour but de déterminer la résistance d'un échantillon de roche en compression uniaxiale, il s'effectue sur une éprouvette cylindrique à section transversale circulaire placée dans la machine de compression uni axial (*Photo. II.25*).

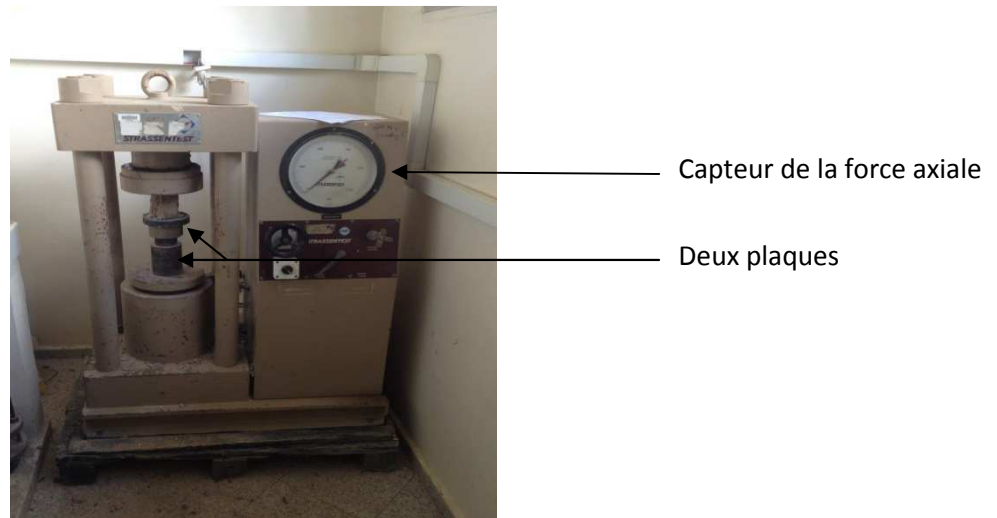


Photo. II.27 : l'appareil de compression uni axial.

Mode opératoire :

L'éprouvette de l'essai obtenue par carottage et sciage doit avoir la forme d'un cylindre droit avec un élanement compris entre 2 et 2,5. Les extrémités de l'éprouvette doivent être planes parallèles entre elles et orthogonales à l'axe de l'éprouvette. Le diamètre de l'éprouvette doit être relié à la taille du plus gros grain ou du plus gros cristal présent dans la roche par un rapport d'au moins 10% et être supérieur ou égale à 40mm.

Un effort de compression croissant est appliqué dans l'axe de l'éprouvette, jusqu'à la rupture de cette dernière.

On place l'éprouvette entre les deux plaques et on fait augmenter l'effort axial de manière constamment croissante, en continuant sans à-coup jusqu'à la rupture.

La vitesse de chargement doit être adaptée à la résistance de la roche de telle manière que la rupture de l'éprouvette ait lieu entre 5 et 30min après le début de chargement

La résistance en compression uniaxiale σ_c , est exprimée conventionnellement par le rapport entre la force appliquée lors de la rupture de l'éprouvette et l'aire de sa section transversale déterminée avant essai :

$$\sigma_c = \frac{F_{\max}}{A}$$

Avec: $A = \frac{\pi D^2}{4}$

Le résultat est exprimé en Mpa, avec trois chiffres significatifs.

CHAPITRE III : *EXPRESSION DES RESULTATS*

III-1) RESULTATS DES SONDAGES :

III.1.1) Localisation des sondages :

Plusieurs sondages de reconnaissance ont été réalisés par le Laboratoire Public d'essais et d'études dans la zone de YOUSOUFIA, identifiés dans le tableau ci-dessous, et implantés sur la carte de la figure II.8, présentés ci-après :

N	X	Y	Z	Gisement	Profondeur (m)
P6493	219750,25	234750,14	420,8	MZINDA	51.00
P6511	216746,52	182346,38	428,94	MZINDA	50.04
P6525	214719,63	186313,84	408,11	MZINDA	41.20
PS 9017	247577,44	178947,26	451,65	LOUTA	53.20
PS 9106	252988,9 1	77096,5	444,85	LOUTA	57.00
PS 9039	242607,47	179010,18	431,15	LOUTA	56.75
S 641	231250,7 1	78751,35	487,35	RECETTE 6	120.00
S 645	226249,64	178249,75	487,1	RECETTE 6	125.30
S819	236749,96	177750,03	463,42	RECETTE 6	124.03
S 815	234750,14	177749,97	504,14	RECETTE 6	127.00

Tableau.III.1 : Localisation des sondages (coordonnées de Lambert).

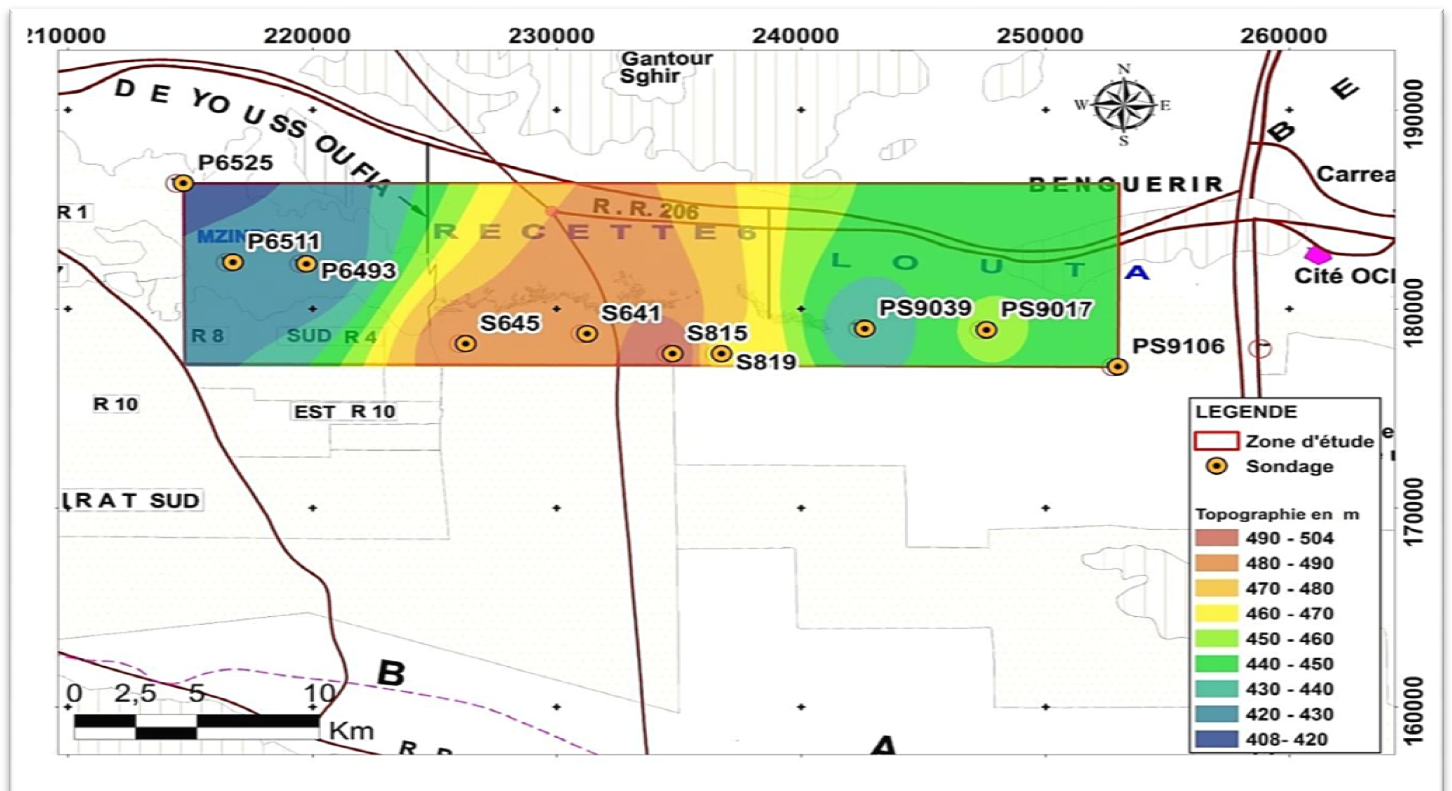


Figure. III.1: Implantation des Sondages de reconnaissances sur la carte topographique de Bassin Gantour à Youssoufia (D'après LPEE 2013).

III.1.2) Exemple de Coupes géologiques des sondages :

Dans le but de mieux cerner la distribution des faciès phosphatés de la zone minière de Youssoufia, des coupes géologiques ont été réalisées et qui se répartissent comme suit : « 3 coupes géologiques des sondages carottées au niveau de la zone Mezinda », « 3 coupes géologiques des sondages carottées au niveau de la zone El Louta », « 4 coupes géologiques des sondages carottées au niveau de la zone minière Bouchane ».

La **Figure. II.9** montre un exemple d'un log stratigraphique du sondage *PS9039*, implanté dans la zone de LOUTA.

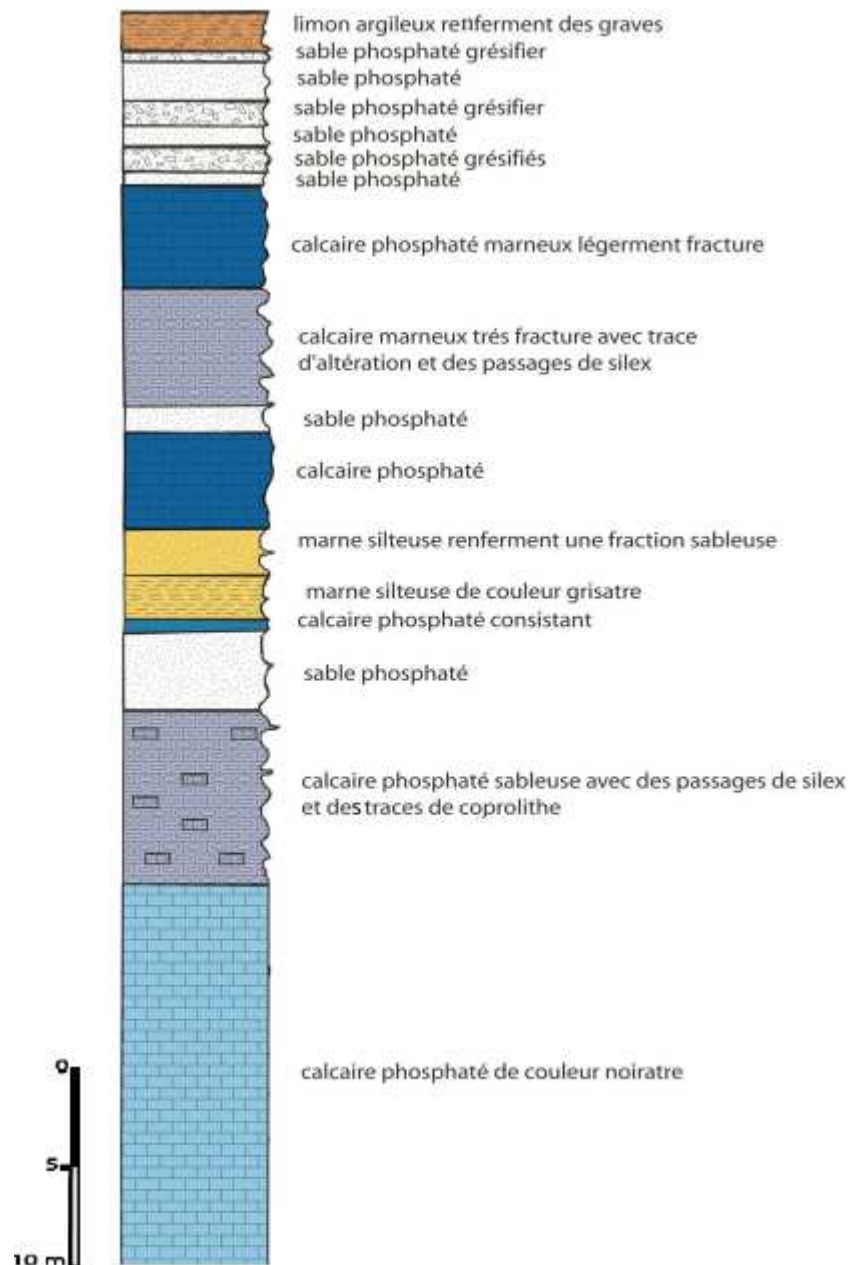


Figure. III.2 : Coupe lithologique du sondage PS9039

III-2) RESULTATS DE L'ESSAI CROSS-HOLE :

L'essai Cross Hole est une diagraphie sismique qui permet de déterminer les vitesses sismiques V_p et V_s pour chaque couche de terrain à une profondeur donné.

Dans notre cas cet essai réalisé généralement sur 2 Sondages :

- ✚ P9039 à une profondeur varie de (1 à 25 m «El Louta »)
- ✚ P9017 à une profondeur varie de (1 à 20 m «El Louta »)

Les résultats obtenus à partir des mesures des vitesses sismiques V_s et V_p ainsi qu'aux modules dynamiques (Module de Young, Module de Poisson, Module de cisaillement, Module de compression) ont permis de mettre en évidence des hétérogénéités dans la série sédimentaire.

Le Sondage PS 9039 :

Le graphe de la **Figure. II.11**, Représente les mesures de coefficient de poisson effectué au niveau de sondage PS9039, ce dernier permet de caractériser la contraction de la matière perpendiculairement à la direction de l'effort appliqué.

Dans notre cas les valeurs de coefficient de poisson sont toujours inférieures à 0,50 montrant que notre sol soit compressible.

Le graphe de la **Figure. II.12**, Représente les mesures du module de cisaillement et du module de Young obtenues à partir de l'essai Cross Hole. On observe une bonne similarité entre l'ensemble des courbes :

- ✚ de 0 à 8 m : les valeurs sont représentées sous forme d'une droite, montrant des valeurs faibles qui ne dépasse pas 0,50 GPa : **Figure. II.1** ;
- ✚ de 8 à 20 m : une augmentation très important a été enregistrée au niveau du module de compression et le module de cisaillement qui atteint des valeurs de l'ordre de 2,500 GPa : **Figure. II.10**.

Cette variation est due généralement à des changements des propriétés géo-mécaniques des terrains caractérisant le passage d'un contexte friable très déformé (Sable phosphaté, Limon tufacé renferment des graves de calcaire) à un contexte rigide avec un taux de déformation faible (calcaire marneux) montré dans la coupe lithologique **Figure. II.9**.

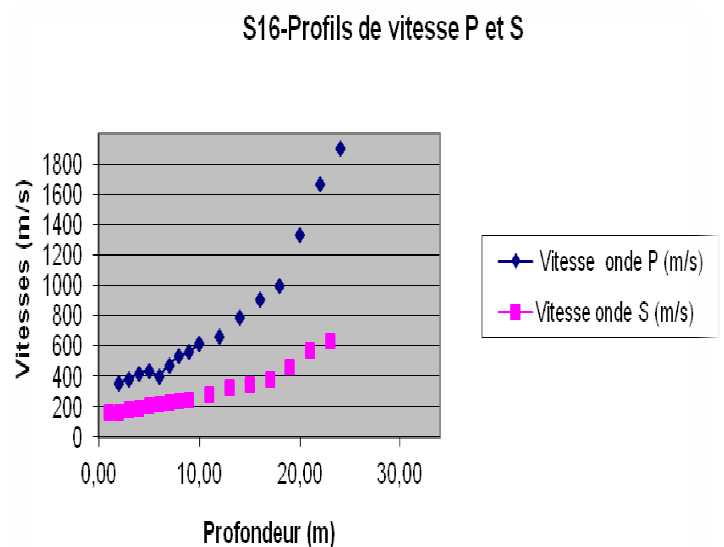
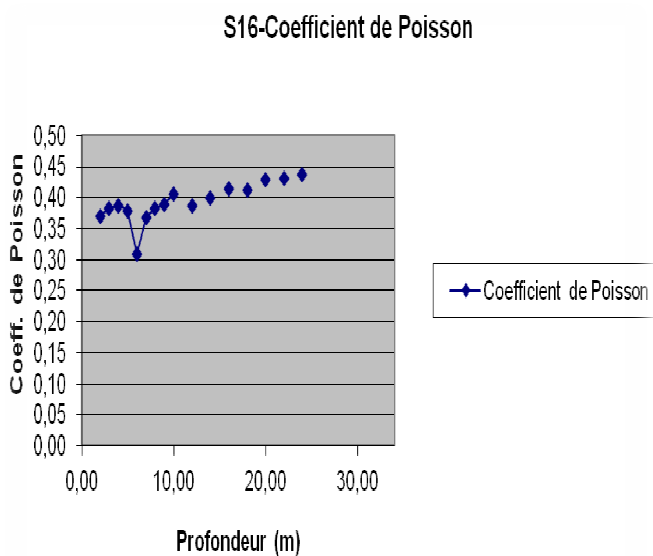


Figure. III.3 : Profile des vitesses sismiques (V_p et V_s)

Figure. III.4 : Résultats du coefficient de poisson

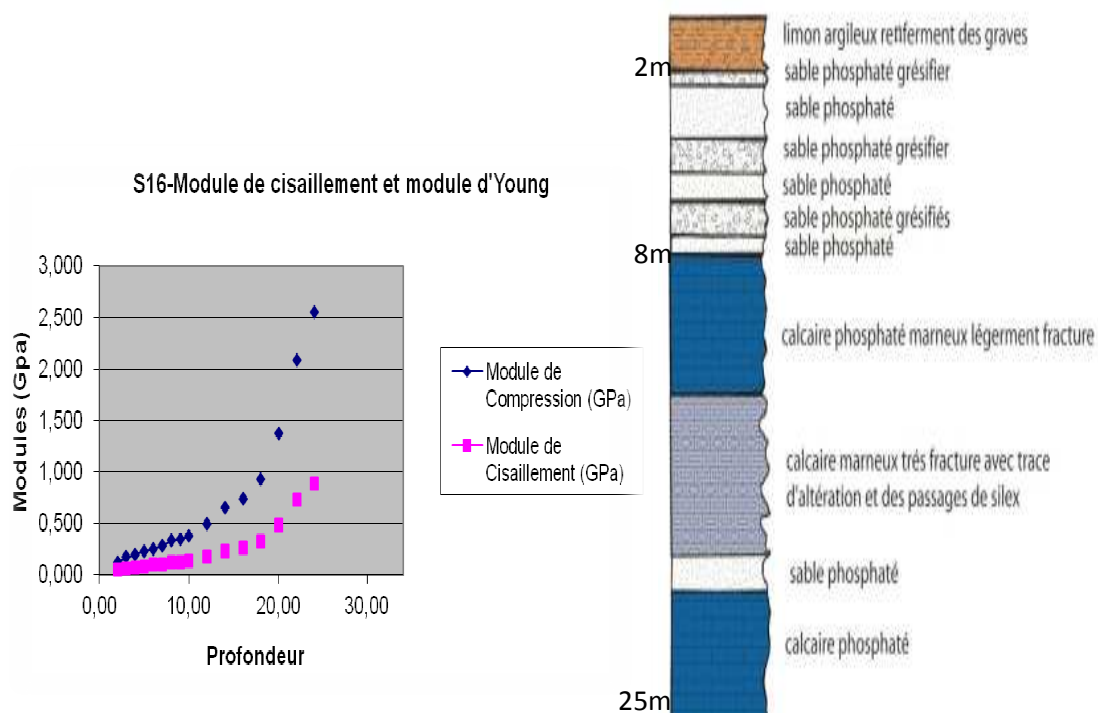


Figure. III.5: Résultats des modules dynamiques et coupe lithologique correspondante

Résultats mesuré au niveau du sondage PS9039

III-3) RESULTATS DES ESSAIS AU LABORATOIRE :

Dans le but de définir les caractéristiques intrinsèques des différents faciès traversés une série d'essai géotechnique a été réalisée par le Laboratoire Public d'Essais et d'Etudes, sur des échantillons prélevés à partir des sondages de type carottés sous forme de caisses, les résultats de ces essais sont résumés de la manière suivante :

III.3.1) Les sols :

↳ Les sables phosphatés :

- ❖ Une granulométrie comportant :
 - 4 % (<2 μm)
 - 6 à 7% (20 μm à 2 μm)
 - 12 à 46 % (80 μm à 20 μm)
 - 21 % à 76 % de fines (< 80 μm)
 - 41 % à 68 % de sable (2mm à 80 μm)
 - 2 % de graves (> 2 mm)
 - 12.5 à 16 mm (D max)
- ❖ Une limite de liquidité de : $22 < WL < 31$ %
- ❖ Une limite de plasticité de : $WP = 17$
- ❖ Une plasticité de : $IP = 14$
- ❖ Triaxial CU+U: Contrainte effective : Une cohésion de 10 Kpa
- : Un angle de frottement de 28°

↳ Les Marnes argileuses:

- ❖ Une granulométrie comportant :
 - 7 à 15% (<2 μm)

- 15 à 25% (20 µm à 2 µm)
- 18 à 52 % (80 µm à 20 µm)
- 48 à 84% de fines (< 80 µm)
- 15 à 32 % de sable (2mm à 80 µm)
- 1 à 20 % de graves (> 2 mm)
- 6.3 à 31.5 mm (D max)
- ❖ Une limite de liquidité de : 49 <WL< 54 %
- ❖ Une limite de plasticité de : 27 <WP <30 %
- ❖ Une plasticité de : 19<IP <27
- ❖ Triaxial CU+U: Contrainte effective : Une cohésion de 19 à 29 Kpa
: Un angle de frottement de 18° à 23°

↳ Les Marnes siliceuses:

- ❖ Une granulométrie comportant :
 - 19 % à 54 % de fines (< 80 µm)
 - 13 % à 64 % de sable (2mm à 80 µm)
 - 6 % à 61% de graves (> 2 mm)
 - 25 à 50 mm (D max)
- ❖ Une limite de liquidité de : 22<WL< 52 %
- ❖ Une limite de plasticité de : WP =24 %
- ❖ Une plasticité de : IP =28 %
- ❖ Triaxial CU+U: Contrainte effective : Une cohésion de 12 à 22 Kpa
: Un angle de frottement de 20° à 21°

III.3.2) Les Roches:

• Les calcaires marneux:

- Densité 1.8 à 1.93 (t/m³)
- Porosité 20.42 à 32.44 %
- Absorption 10.59 à 18.04 %
- Compression simple 12 à 13.5 Mpa
- Essai cerchar (Abrasivité) 0.4 (AIN)

↳ Les calcaires

- Densité 1.92 à 2.05 (t/m³)
- Porosité 24.73 à 23.53 %
- Absorption 11.46 à 12.9 %
- Compression simple 6 à 21.1 Mpa
- Essai cerchar (Abrasivité) 0.3 (AIN)

↳ Les calcaires phosphatés:

- Densité 1.46 à 2.25 (t/m³)
- Porosité 23.03 à 30.15 %
- Absorption 11.7 à 19.98%
- Compression simple 5.3 à 18 Mpa
- Essai cerchar (Abrasivité) 0.4 (AIN)

↳ Les silex:

- Densité 2.11 à 2.51 (t/m³)
- Porosité 1.62 à 1.90 %
- Absorption 0.65 à 2.88 %
- Essai cerchar (Abrasivité) 5.5 à 6 (AIN)

III-4) EXEMPLE DE CORELATIONS LITHOLOGIQUES :

Afin de mieux cerner les caractéristiques géologiques de la zone d'étude, des corrélations ont été élaborées à partir des sondages carottés montrant un aperçu profond et plus ou moins continue en tout ce qui concerne la lithologie de la zone d'étude et la variation des couches lithologiques suivant un axe dressé par les sondages de reconnaissance ainsi implantés (*figure . II.13*).

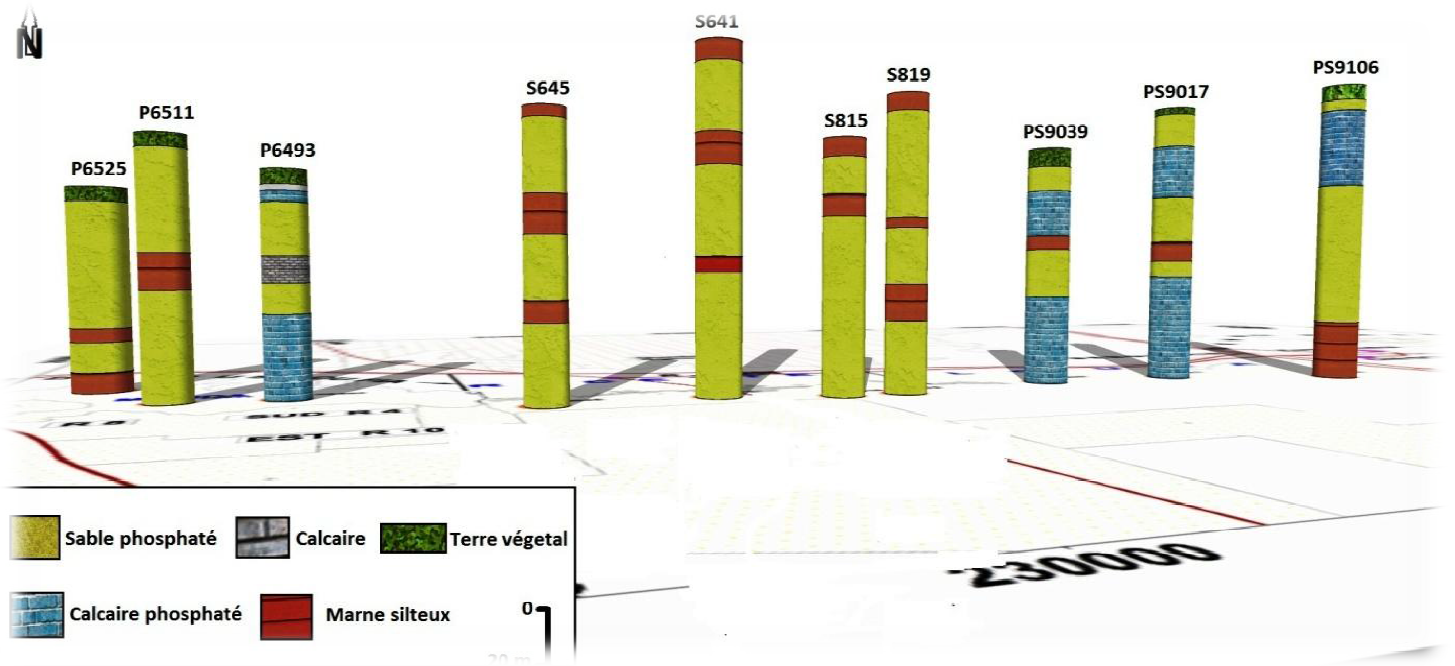


Figure. III.6: Modélisation 3D des résultats obtenus à partir des sondages carottés

Analyse :

Les secteurs de Louta et de Mezinda présentent des faciès lithologiques communs, composé de cailloux de calcaire phosphaté, du sable phosphaté à passées grésifiées et du marne silteuse jaunâtre.

Le secteur de le RECETTE 6 présente des faciès lithologique composées de : sables fins grisâtres phosphatés et les marne à chert blanc, et l'absence du calcaire phosphaté.

Interprétation :

D'après les résultats des sondages et suivant la corrélation ainsi réalisée on peut dire, à partir de nos connaissances vis-à-vis le domaine de la géologie, que :

La couche du calcaire phosphaté soit biseauté dans la zone de "recette 6 ", ce phénomène est d'origine sédimentaire (biseaux stratigraphiques) et non pas tectonique puisque il s'agit d'un bassin sédimentaire qu'a subit des phases de progression et régression marines ce qui explique le dépôt des séries sédimentaires en parallèle aux phases de progression et l'érosion progressif en rapport avec la phase de régression marines, en outre la genèse des séries phosphatées, est régit par les conditions de formation suivantes : milieu peu profond, calme sans activités tectoniques (ce qui favorise d'ailleurs l'hypothèse postulée auparavant) et extrêmement confiné.

Les corrélations stratigraphiques ainsi précisées servent d'aide à la décision lors de la planification de l'exploitation du gisement phosphaté. Elles permettent au géologue de suivre l'extension des couches de phosphate du gisement, de mettre en évidence des anomalies dans leur évolution spatio-temporelle (variations d'épaisseur, présence d'intercalations "stériles", changements de faciès, etc..) et de prévoir des dérangements géologiques d'origine sédimentaire ou tectonique.

CHAPITRE IV : *CONCLUSION*

L'étude de La caractérisation géotechnique des formations phosphatées des gisements de Youssoufia (Mezinda, El Louta, Bouchane), qu'a été faite par le Laboratoire Public d'Essais et d'Etudes en 2013 a passée par plusieurs étapes :

- La campagne de sondages carottés réalisés dans les différentes exploitations a permis de dresser des logs lithologiques détaillés et d'établir des corrélations par identité de faciès en tenant compte des variations latérales et verticales, liées aux conditions paléogéographiques de dépôt.
- La campagne géophysique réalisé au niveau de deux sondages a été utile pour la détermination des modules dynamiques qui varient en fonction de la nature lithologique. Pour les sables phosphatés, on remarque un coefficient de poisson qui est généralement inférieur à 0.50 révélant un sol parfaitement compressible, friable avec un taux de déformation très important indiqué par le module de Young et le module de cisaillement. Pour les calcaires le coefficient de poisson demeure inférieur à 0,50 dans ce cas notre sol est qualifié comme un sol compressible, rigide avec un taux de déformation faible.
- Les résultats des essais d'identification et des essais mécaniques réalisés au laboratoire montrent de bonnes caractéristiques mécaniques pour les sables phosphatés, ce qui n'est pas le cas des marnes argileux dont la caractérisation géotechnique mérite d'être approfondie par la présence des argiles qui peuvent provoquer des risques de gonflement et de tassement (il doit y avoir par exemple un essai oedométrique qui permet d'évaluer le taux du tassement et du gonflement).

Références bibliographiques :

- Norme Française _P94-050 Teneur en eau.
- Norme Française _P94-054 Masse volumique des particules.
- Norme Française _P94-052-1 Limite d'atterberg pénétration à cône.
- Norme Française _P94-056 Granulométrie.
- Norme Française _P94-057 Sédimentométrie.
- Norme Française _P94-430-1 Abrasivité roche.
- Norme Française _P94-077 Compression uniaxial.
- Norme Française _P94-074 Triaxial.
- Norme Française _P18_573 Los angeles.
- Ressources en Eau du Maroc (Tome 2. Plaines et bassins du Maroc atlantique EDITIONS DU SERVICE GEOLOGIQUE DU MAROC, RABAT 1975) ; 2.17. PLATEAU DES GANNTOUR ET PLAINES DE LA BAHIRA ET DE LA TESSAOUTEVAL ;
- **Boujo A. (1976)** : Contribution à l'étude géologique du gisement de phosphate crétaé éocène des Gantour Maroc occidental ; Sci. Géol. Mem. 43 .227 ; p. 43.

Résumé :

Le présent rapport concerne l'étude de la zone de Youssoufia qui entre dans le cadre de la caractérisation géotechnique du bassin minier des Gantours, pour des buts précisés par l'Office Chérifien des Phosphates.

Cette étude a été faite en plusieurs étapes, allant d'une campagne des sondages carottés, passant par une diagraphie sismique (Essai Cross-Hole), et finissant par des essais géotechniques du laboratoire, pour enfin évaluer sa caractérisation géotechnique afin de mieux cerner les propriétés des sols à partir desquels l'OCP peut préciser le mode d'exploitation le plus approprié pour chacun des types des couches phosphatées.

Dans notre rapport, on s'est focalisé sur les points suivants :

- Une présentation de l'organisme d'accueil et ses activités ;
- La situation et la géologie de la zone d'étude ;
- L'essai Cross-Hole (Diagraphie sismique) ;
- Les différents essais géotechniques qui ont été effectués lors de l'étude, et qu'on a détaillé leurs principes, buts et modes opératoires.
- Expression des résultats des essais, obtenus par le LPEE en 2013, ainsi que leurs interprétations et discussions qu'on a pu réaliser, à l'aide de notre encadrant.
- Une idée générale à propos des apports de ces essais au terme de la géotechnique.

Durant notre stage on a eu l'occasion d'effectuer les tâches suivantes :

- Savoir l'organisation, les activités ainsi que sa présence dans le marché et les appels d'offres qui concerne le Laboratoire Public d'Essais et d'Etudes ;
- Manipuler, le maximum possible, des essais disponibles dans le laboratoire ;
- Rassembler tous les informations concernant la zone d'étude, et faire quelques interprétations qu'on a mentionnées dans notre rapport.
- Faire une sortie au terrain qui a duré 15 jours, pour assister, voire et manipuler les essais in-situ qu'on n'a pas introduit dans notre rapport mais qu'on a désiré de les citer sur ce modeste résumé, et parmi ces essais :

- ❖ la tomographie électrique qu'on a pu manipuler nous même, il s'agit d'une prospection électrique qui a pour objectif la détection des cavités souterraines (Karst), dans le projet de la construction de l'autoroute El Jadida - Safi ;
- ❖ Le Géo-Radar, qu'on a pu manipuler avec la société Géo-Atlas qui travaille en collaboration avec le LPPE dans le projet de la construction de l'autoroute El Jadida – Safi, il s'agit d'une prospection du sous-sol, par des ondes électromagnétique (Ondes Radio), c'est une méthode très précise, sauf qu'elle a comme défaut, une prospection sur de faibles profondeurs (15m maximum, avec l'antenne émetteur des ondes de fréquence 200 MHz), et une forte sensibilité des terrains marneux et argileux, qui représentent un obstacle face à la prospection des ondes électromagnétiques ;
- ❖ Sondages destructives et carottés ;
- ❖ Pressiomètre, qui est un essai géotechnique in-situ, qui nous permet de déterminer les caractéristiques mécaniques du sol ;

Ce stage, au sein du LPEE, nous a été une opportunité, pour acquérir les capacités suivantes :

- Un esprit de l'analyse et de l'interprétation ;
- Un esprit du travail en groupe ;
- Un esprit de la recherche scientifique.

