



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
La République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de L'Enseignement Supérieur & la Recherche Scientifique
جامعة عبد الحميد بن باديس – مستغانم
Université Abdel Hamid Ben Badis – Mostaganem
كلية العلوم والتكنولوجيا
Faculté des Sciences et de la Technologie
قسم الهندسة الميكانيكية
Département Génie Mécanique



MEMOIRE DE FIN D'ETUDE MASTER ACADEMIQUE

Filière : Travaux publique

Spécialité : V.O.A

Thème

Etude de la résistivité électrique d'un sol fin

Présenté par :

- ❖ ATREUCH Souraya
- ❖ ZERROUKI Hadja

2019 devant le jury composé de :

Président	Mr BENDANI Karim	Université de Mostaganem
Examineur	Mm LAREDJ Nadia	Université de Mostaganem
Encadreur	Mm MOSTEFA Fouzia	Université de Mostaganem

Année Universitaire : 2018 / 2019

Remerciements

Nous adressons tout d'abord nos plus vifs remerciements à Mr BEN DANI Karim Professeur au département de Génie Civil de l'Université Abdelhamid Ibn Badis Mostaganem,

Nous tenons à exprimer notre profonde gratitude et reconnaissance à Madame LAREDJ Nadia, Professeur au département de Génie Civil de l'Université Abdelhamid Ibn Badis Mostaganem pour avoir accepté d'examiner ce travail ; et l'aide qu'elle nous a apporté, pour ces conseils judicieux et sa pleine disponibilité. Nous remercions Mme MOSTEFA Fouzia M.A.A pour ces encouragements et son aide pour l'aboutissement de ce travail. Nous la remercions aussi pour ses conseils, lectures et remarques judicieuses qui nous ont aidés lors de la rédaction de cette mémoire.

Nous remercions aussi Mr KHELIFA, Ingénieure de laboratoire à l'Université Abdelhamid Ibn Badis Mostaganem pour sa grande contribution à l'élaboration de ce travail.

Nous devons exprimer toute nos reconnaissances aux techniciens du laboratoire LAFARGE LCO pour leurs patiences et leurs collaborations.

Nous adressons un très grand merci à ns chers parents, frères, sœurs et toutes nos proches familles, pour leur soutien et encouragement au cours de toutes ces années, surtout dans les moments difficiles.

Table des Matières

Remerciements

Résumé

Liste des abréviations

Liste des symboles

Liste des figures

Liste des tableaux

Introduction générale

Partie 1 : Étude bibliographique

Introduction générale

CHAPITRE I : Généralités sur les sols

I.1 Introduction

7

I.2 Définitions d'un sol

7

I.3 Minéralogie et la chimie des sols

10

I.3.1 Les sols fins

11

I.3.1.1 Les argiles

11

I.3.1.2 Les limons

13

I.3.2 Les marne

13

I.4 Les propriétés de sol

14

I.4.1 Propriétés physiques de sol

14

I.4.1.1 La texture

14

I.4.1.2 La structure

15

I.4.1.3 Porosité n

16

I.4.1.4 L'indice des vides e

16

I.4.1.5 Le degré de saturation S_r

16

I.4.1.6 La teneur en eau $W\%$

17

I.4.1.7 La perméabilité du sol

17

I.4.1.8 Surface spécifique S_{spe}

18

18

I .4.1.9 Coefficient d'échange cationique CEC	18
I.4.2 Propriétés chimiques du sol	18
I .4.2.1 le double couche électrique	20
I .4.2.2 Réaction chimique du sol le pH	20
I.4. 3 Propriétés mécanique des sols	20
I.5 Conclusion	21
Chapitre II : La mesure de la résistivité électrique	22
II.1 : Introduction	22
II.2 Propriétés électriques des milieux poreux	22
II.2.1 Définitions de la résistivité électrique	22
II.2.2 La conductivité électrique	23
II.2.3 Mesure de la résistivité électrique	23
II.2.3.1 Mesure en laboratoire	23
II.2.3.2 Mesure in situ	24
II.3 L'électricité dans le sol	26
II.4 Facteurs d'influence des propriétés électriques des sols	26
II.4.1 Conductivité volumique	27
II.4.1.1 La concentration ionique de la solution du sol	27
II.4.1.2 La teneur en eau	27
II.4.1.3 La température	27
II.4.2 Conductivité surfacique	28
II.4.3 Modélisation du comportement électrique des sols	28
II .5 Conductivité électrique dans un sol argileux	29
II.6 Conclusion	30
Partie 2 : Etude expérimentale	31
CHAPITRE III : Identification et caractérisation du sol étudié	32
III.1 Introduction	32
III.2 Identification et localisation du site	32
III. 3 Caractérisation des sols	34
III.3.1 Caractéristiques physiques	34
III.3.1.1 Calcul des Poids volumiques	34

III.3.1.2 Teneur en eau W%	35
III.3.1.3 Degré de saturation S_r	36
III.3.1.4 Analyse granulométrique	37
III.3.1.5 Limites d'Atterberg	39
III.3.2 Caractéristique chimique	41
III.3.2.1 Dosage des carbonates $CaCO_3$	41
III.3.2.2 La conductivité électrique	42
III.3.2.3 Mesure de la surface spécifique par l'essai d'absorption de bleu de méthylène	43
III.3.2.4 La teneur en matière organique	44
III.3.2.4 Potentiel hydrogène (pH)	45
III.3.2.5 Composition chimique du sol de Bordjia	46
III.4 Conclusion	47
CHAPITRE IV : Variation de la teneur en eau du sol en fonction de la résistivité après le traitement électrocinétique	
IV.1 Introduction	48
IV.2 Protocole expérimental	48
IV.2.1 Préparation des échantillons	48
IV.2.2 Dispositif expérimental	48
IV.2.3. Procédure du traitement électrocinétique	50
IV.3 Mesure des propriétés physiques du sol	51
IV.4 Variation des paramètres physiques à la fin du traitement électrocinétique	51
IV.4.1. Variation de la plasticité et la teneur en eau	52
IV.4.2 Variations de l'écoulement électroosmotique	53
IV.4.3 Variation de la résistivité électrique du sol	53
IV.4.4 Variation de la conductivité électrique du sol	54
IV.5 Conclusion	55
Conclusion générale	
Perspectives	
Références bibliographiques	

Liste des figures

CHAPITRE I : DES GENERALITES SUR LE SOL

Figure (I.1) : La différente classe granulométrique	8
Figure (I.2) : Volume (%) des constituants solides du sol (fraction minérale et organique) et de l'espace poral (occupé par l'air et l'eau). (Aude Locatelli, 2013).	9
Figure (I.3) : Structure du cristal de kaolinite (http://pubs.usgs.gov)	11
Figure (I.4) : Structure du cristal de montmorillonite (http://pubs.usgs.gov)	12
Figure (I.5) : Structure du cristal illite (http://pubs.usgs.gov)	13
Figure (I.6) : Représentation schématique de la double couche électrique et de l'évolution du potentiel électrique en fonction de la distance des particules	19

CHAPITRE II : La résistivité électrique des sols

Figure (II.1) : Mesure à quatre électrodes de la résistivité électrique du sol	24
Figure (II.2) Dispositif Wenner	25
Figure (II.3) Dispositif Schumberger	25
Figure (II.4) Dispositif Palmer	25
Figure (II .5) : Distribution de courant dans un sol homogène	26

CHAPITRE III : Identification et caractérisation du sol étudié

Figure (III.1) : Situation géographique de Bordjia (BNEDER.2015)	33
Figure (III.2) : Processus de préparation du sol	33

Figure (III.3) : Essai d'étuvage du sol	34
Figure (III.4) : Essai granulométrique du sol (fraction granulaire > 80 µm.)	35
Figure (III.5): Essai sédimentométrie	37
Figure (III.6) : Courbe granulométrique du sol	38
Figure (III.7) Essai de limite atterberg (appareil de Casa grande)	39
Figure (III.9): Classification des sols fins, diagramme de plasticité (abaque de Casa grande)	41
Figure (III.10) Essai de la conductivité de sol	42
Figure (III.11) Essai de bleu méthylène	43
Figure (III.12) : Essai de la matière organique	45
Figure (III.13) : Mesure le PH	45

CHAPITRE IV : Variation de la teneur en eau du sol en fonction de la résistivité après le traitement électrocinétique

Figure(IV.1) : Modèle du dispositif expérimental	49
Figure (IV.2) : Schéma descriptif du dispositif de traitement électrocinétique	50
Figure (IV.3) : Histogramme de variation de teneur en eau	51
Figure (IV.4): courbe d'évolution du flux électroosmotique au cours du temps	52
Figure (IV.5): histogramme de variation du flux électroosmotique	53
Figure (IV.6): Relation entre la résistivité et la teneur en eau	53
Figure (IV.7): Courbe de relation entre la conductivité et la teneur en eau	54
Figure(IV.8) : Le résultat d'après l'essai	55

Liste du tableau

Chapitre I : DES GENERALITES SUR LES SOLS

Tableau (I.1) : classification des sols selon le diamètre 14

Chapitre III : Identification et caractérisation du sol étudié

Tableau(III.1) : Localisation et coordonnées géographiques du périmètre 33

Tableau (III.2) : Les propriétés physique du sol 36

Tableau (III.3): Résultats des limites d'atterberg 40

Tableau (III.4) : Teneur en CaCO₃ de quelques sols 42

Tableau (III.5) : Résultats de l'essai de bleu méthylène 43

Tableau (III.6) : Classement des sols en fonction du VBS 44

Tableau (III.7) : Les différents types de sols en fonctions de la teneur en matières organiques 44

Tableau(III.8) : Propriétés physiques du sol étudié 46

Tableau(III.9) : Composition chimique des deux sols étudiés 47

Liste du tableau

Chapitre I : DES GENERALITES SUR LES SOLS

Tableau (I.1) : classification des sols selon le diamètre 14

Chapitre III : Identification et caractérisation du sol étudié

Tableau(III.1) : Localisation et coordonnées géographiques du périmètre 33

Tableau (III.2) : Les propriétés physique du sol 36

Tableau (III.3): Résultats des limites d'atterberg 40

Tableau (III.4) : Teneur en CaCO₃ de quelques sols 42

Tableau (III.5) : Résultats de l'essai de bleu méthylène 43

Tableau (III.6) : Classement des sols en fonction du VBS 44

Tableau (III.7) : Les différents types de sols en fonctions de la teneur en matières organiques 44

Tableau(III.8) : Propriétés physiques du sol étudié 46

Tableau(III.9) : Composition chimique des deux sols étudiés 47

Résumé

Parmi les propriétés physiques des sols qui peuvent être mesurées par des méthodes de prospection superficielles, la résistivité électrique occupe une place importante car elle est liée à l'ensemble des propriétés macroscopiques des sols, granularité, humidité, quantité de sels en solution qui jouent un rôle majeur en pédologie. La cartographie de cette propriété constitue donc un outil très intéressant pour connaître les variations spatiales des principales caractéristiques du sol.

Les méthodes électriques par courant continu en géophysique, ont pour objectif de déterminer les propriétés électriques. En effet dans cette étude il est question d'étudier la relation entre le teneur en eau d'un sol et la mesure de la résistivité électrique, par injection d'un courant continu de 25 volts.

Les résultats obtenus ont montrés qu'il a une relation presque linéaire entre ces deux mesures, et plus la teneur augmente plus la résistivité diminue, contrairement à la conductivité électrique qui augmente.

Mots clés : méthode électriques, sol, courant continu, résistivité, teneur en eau

Abstract

Among the physical properties of soils that can be measured by surface prospecting methods, electrical resistivity occupies an important place because it is related to all the macroscopic properties of soils, granularity, humidity, quantity of salts in solution that play a role in the soil. Major role in soil science. The mapping of this property is therefore a very interesting tool to know the spatial variations of the main characteristics of the soil.

Electrical methods in direct current in geophysics, aim to determine the electrical properties. Indeed in this study it is question of studying the relation between the water content of a soil and the measurement of the electrical resistivity, by injection of a direct current of 25 volts.

The results obtained have shown that it has an almost linear relationship between these two measurements, and the higher the water content increases the lower the resistivity, contrary to the increasing electrical conductivity.

Key words: electrical method, soil, direct current, resistivity, water content.

Introduction

La géophysique applique les moyens de la physique à l'étude de la structure des terrains. Elle se pratique à partir de la surface du sol (géophysique de surface). Elle est utilisée pour la reconnaissance géotechnique des sols qui vont servir d'assiette pour les constructions d'ouvrage de génie civil. En effet elle permet la détermination de la nature et la répartition des matériaux dont ce sol est composé.

C'est l'une des approches utilisées pour faire la reconnaissance des sites avant la construction d'un ouvrage (bâtiment, infrastructure urbaine ou infrastructure de transport, barrage...). La reconnaissance géotechnique d'un site consiste à déterminer la nature, la répartition et les propriétés des matériaux dont il est composé (granulométrie, teneur en eau, propriétés mécaniques). Ces données serviront à prévoir par la suite le mode d'infrastructure à choisir pour tels ou tels ouvrage.

Pour tout type de sol la mesure des propriétés géophysiques réelles, ainsi que des propriétés individuelles de chacun de ses composants, peut permettre d'identifier sa composition : roche, argile, sable. Parmi les propriétés géophysiques facilement mesurables, la résistivité électrique qui indique éventuellement des valeurs divergentes entre les différents matériaux naturels, elle varie de quelques Ohm.m dans le cas des sols très argileux ou pollués à plus de 1000 Ohm.m pour les roches telles le calcaire ou le granite. ((Palacky,1987).

L'utilisation de la résistivité électrique a été appliquée à divers domaines tels que l'exploration géotechnique, environnementale, agricole, souterraine et des ressources souterraines (Dobecki et al, 1985 ; Suzuki et al, 2001 ; Spitzer et al, 2003 ; Hazreek et al, 2015 ; Gingine et al, 2016; Mostafa et al, 2017 et Cai et al, 2017.

Le sol étudié est en provenant de la zone Bordjia région d'Ain Nouissy, Mostaganem (ouest de l'Algérie). Bordjia est connue par son climat semi- aride, dont la principale caractéristique est un bilan hydrique négatif permanent (BNEDER , 2015). Ce climat est la cause de la très forte évaporation et surtout la concentration des sels dans le temps.

Dans ce contexte, l'idée est venue d'utiliser cette méthode, pour la reconnaissance de ce sol , via la mesure de sa résistivité , tous en variant un seul paramètre qui semble le plus pertinent

qui la teneur en eau. Donc Le but principal de cette recherche est d'étudier la relation entre la résistivité électrique et la teneur en eau des sols.

Le manuscrit est divisé en deux parties,

La première partie est consacrée à une étude bibliographique, composée de deux chapitres.

Le premier chapitre correspond à une synthèse bibliographique sur les sols, qui comprend une présentation des principaux constituants de ces sols.

Le deuxième chapitre sera consacré aux méthodes de mesure de la résistivité électrique ainsi que les paramètres l'affectant.

La deuxième partie a pour objet l'étude expérimentale. Elle est composée de deux chapitres.

Un chapitre identification et caractérisation du sol étudié, un autre chapitre est destiné pour l'étude de la variation de la résistivité et conductivité électrique en fonction de la teneur en eau.

A la fin de cette thèse de recherche, une conclusion générale présente une synthèse des résultats de ce travail et des perspectives de recherche envisageable.

Partie 1 : Étude bibliographique

Chapitre I : Généralités sur les sols

Chapitre II : La résistivité électrique

Chapitre I: Généralités sur les sols

I.1 Introduction

La géotechnique est l'étude de l'adaptation des ouvrages aux sols et roches formant le terrain naturel. Elle traite de l'interaction sol / structures, et fait appel à des bases de géologie, de mécanique des sols, de mécanique de roches et de structures. En parallèle à la mécanique des sols qui traite des matériaux meubles, la mécanique des roches traite des matériaux rigides, et les géomatériaux cimentés traitent d'une catégorie de matériaux intermédiaires entre les sols et les roches.

Les études géotechniques ont pour principal objet les études de sol pour la construction d'ouvrages (immeubles, voiries, ouvrages d'art ...), et notamment la définition des fondations, mais aussi dans le cadre de diagnostics pour des ouvrages sinistrés. Elles traitent également des phénomènes de mouvement de sol (glissement, affaissement et autres), de déformation (tassements sous charges) et résistance mécanique.

A partir d'essais de laboratoire et in situ, de plus en plus perfectionnés, la mécanique des sols fournit aux constructeurs les données nécessaires pour étudier les ouvrages de génie civil et de bâtiment et assurer leur stabilité en fonction des sols sur lesquels ils doivent être fondés, ou avec lesquels ils seront construits (barrages en remblais); ceci tant durant la progression des travaux (grands terrassements) qu'après mise en service des ouvrages.

I.2. Définitions d'un sol

Le sol est la couche la plus externe de la croûte terrestre résultant de l'interaction entre la lithosphère, l'atmosphère, l'hydrosphère et la biosphère. Il résulte de la transformation de la couche superficielle de la roche-mère, dégradée et enrichie en apports organique par les processus vivants de pédogenèse. Hors des milieux marins et aquatiques d'eau douce, il est ainsi à la fois le support et le produit du vivant. La partie du sol spécialement riche en matière organique se nomme l'humus.

On différencie le sol de la croûte terrestre par la présence significative de vie. Le sol est

aussi un des puits de carbone planétaire, mais semble perdre une partie de son carbone, de manière accélérée depuis au moins 20 ans. Il peut contenir et conserver des fossiles, des vestiges historiques et les traces d'anciennes activités humains (anthropisation, archéologie) ou d'événements climatiques. Ces éléments influent à leur tour sur la composition floristique. Tous les sols qui prennent ou ont déjà pris naissance sur la surface de contact de la lithosphère forment la géosphère. Les sols regroupent différents diamètres, divisant ainsi le sol en deux catégories, à savoir les sols grenus et les sols fins. Les sols grenus sont constitués d'un mélange de particules dont le diamètre est supérieur à 75 microns. Ils regroupent principalement les blocs, les cailloux, les graviers et les sables. Pour le cas des sols fins, ils regroupent principalement les particules dont le diamètre est inférieur à 75 microns, tels que les limons, les argiles et les colloïdes. La Figure (I.1), illustre la classification du sol en fonction de la taille du squelette granulaire.

- Blocs, cailloux (fragments de la roche mère) : éboulis de pente, alluvions grossières, moraines $20\text{mm} < d < 200\text{mm}$.
- Gravier (fragment de roche mère) : sédiments détritiques généralement formés de plusieurs minéraux $2\text{mm} < d < 20\text{mm}$.
- Sables (fragment de roche mère) : sédiment déritique généralement formés d'un seul minéral $20\mu\text{m} < d < 2\text{mm}$.
- Limons (fragment de roche mère) : mélange de très fins de sable, mêlés en général à des particules argileuses : $2\mu\text{m} < d < 20\mu\text{m}$.
- Les argiles (altération physico-chimique de certains minéraux des roches) : particules $< 2\mu\text{m}$

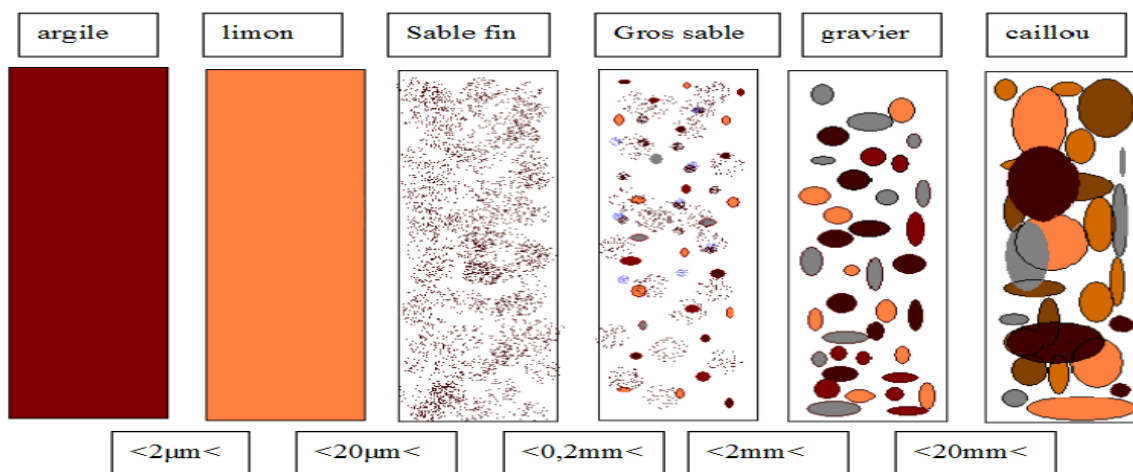


Figure (I.1) : La différente classe granulométrique

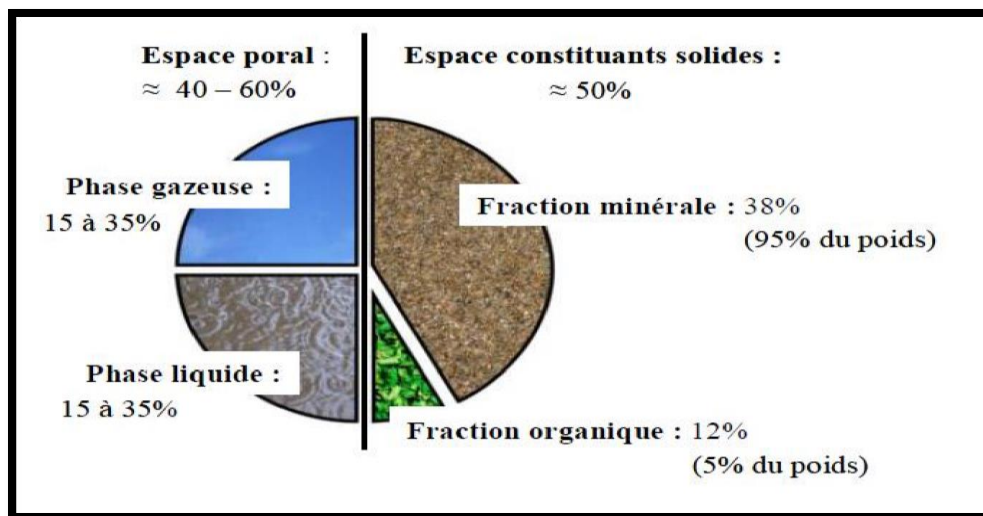
- **Les origines principales des sols :**

- i) La désagrégation des roches par altération mécanique et physicochimique sous l'effet des agents naturels :
 - Fissuration consécutives à la décompression, aux effets des chocs thermique ou du gel,
 - Attaque mécanique (chocs et frottements) dans un processus naturel de transport gravitaire glaciaire, fluvial, marin, éolien,
 - Attaque chimique sous l'effet des circulations d'eaux agressives (acides ou basiques) ;
- ii) La décomposition d'organismes vivants :
Végétaux (tourbes) ou animaux (craies).

On distingue également :

- sols résiduels résultant de l'altération sur place des roches ;
- Les sols transportés provenant des dépôts des produits d'altération préalablement repris par un agent physique de transport

Un sol est un mélange de trois phases en proportion variables :



Figure(I.2) : Volume (%) des constituants solides du sol (fraction minérale et organique) et de l'espace poral (occupé par l'air et l'eau). (Aude Locatelli, 2013).

a. Phase solide :

La phase solide est le seul élément pouvant supporter des contraintes importantes. Trois types de sols ressortent comme étant les plus souvent rencontrés sur un chantier : Sols grenus, sols fins, et sols organiques

b. Phase gazeuse :

Dans un sol partiellement saturé une partie des vides de l'agrégat est remplie par du gaz, essentiellement de l'air.

c. Phase liquide :

Une phase liquide sous différentes formes appelé : eau libre, eau interstitielle

- eau absorbée : elle constitue un film entre les grains jouant ainsi un rôle de lubrifiant. Cette dernière ne s'écoule pas et s'élimine par chauffage très intense (>300°).
- eau libre : elle s'écoule et s'élimine par étuvage vers 100°.

I.3 Minéralogie et la chimie des sols

Les sols sont constitués de particules de minéraux regroupées en agrégats. Ces minéraux sont stables ou en train d'évoluer dans les conditions thermo-barométriques et climatiques de la surface de la terre. Généralement y sont rencontrés :

- ✓ Le quartz
- ✓ Les argiles
- ✓ Les feldspaths (potassiques et plagioclases)
- ✓ Les micas
- ✓ Les carbonates (calcite et dolomite)
- ✓ Les oxydes et hydroxydes métalliques dont l'hématite, la goethite et la limonite pour le fer

Ces minéraux se présentent généralement dans les sols sous forme :

- ✓ De grains polygonaux plus ou moins réguliers dont la taille se situe entre quelques microns et quelques millimètres.
- ✓ De lamelles pour les argiles dont la plus grande dimension ne dépasse pas quelques

microns D'agrégats correspondant à des fragments de roches. Leurs formes résultent de la morphologie des minéraux les constituants.

Les propriétés physiques et mécaniques du sol dépendent de la nature des assemblages minéraux. Ainsi les minéraux granulaires (quartz, carbonates) n'ont pas de cohésion propre. Seules les argiles présentent une cohésion, qui résulte d'interactions spécifiques avec l'eau

I .3.1 Les sols fins

Les sols fins dont au moins 50% d'éléments sont de taille inférieure à 80 μm , pour lequel les attractions inter granulaires sont prépondérantes, ce qui se traduit par une forte cohésion du sol (les sols restent en mottes). Comportement très différent en fonction des teneurs en eau (état solide, plastique ou liquide).

I.3.1.1 Les argiles

L'argile est une roche sédimentaire composée pour une large part de minéraux argileux, en général des silicates d'aluminium plus ou moins hydratés présentant une structure feuilletée (phyllo silicates) expliquant leur plasticité, ou fibreuse expliquant leurs qualités d'absorption.

Les différents types d'argiles : les types d'argiles les plus fréquents sont :

a) Kaolinite :

La kaolinite est constituée d'une succession alternée de feuillets en tétraèdre (silice) et de feuillets en octaèdre (aluminium ou gibbsite). Les deux feuillets sont liés de telle manière que les sommets du feuillet de silice et ceux d'une des couches du feuillet en octaèdre ne forment qu'une seule et même couche

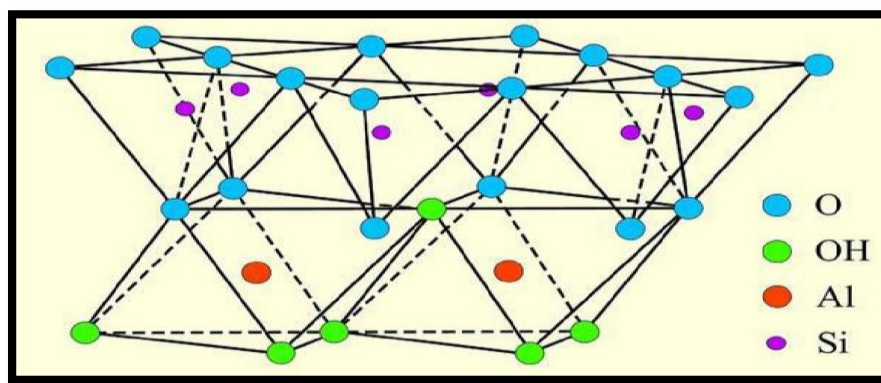


Figure (I.3) : Structure du cristal de kaolinite (<http://pubs.usgs.gov>)

b) Montmorillonite :

La montmorillonite, parfois appelée Smaltite, est un minéral argileux important composé de deux feuillets de Silice et d'un feuillet d'Alumine (Gibbsite). Les feuillets en octaèdres se trouvent entre deux feuillets de Silice et les sommets des tétraèdres se confondent avec les hydroxyles du feuillet en octaèdre pour ne former qu'une seule couche.

Les sols qui contiennent de la montmorillonite peuvent être gonflants lorsque leur teneur en eau augmente, les pressions de gonflements qui en résultent peuvent facilement causer des dommages aux structures légères et pavages Illite

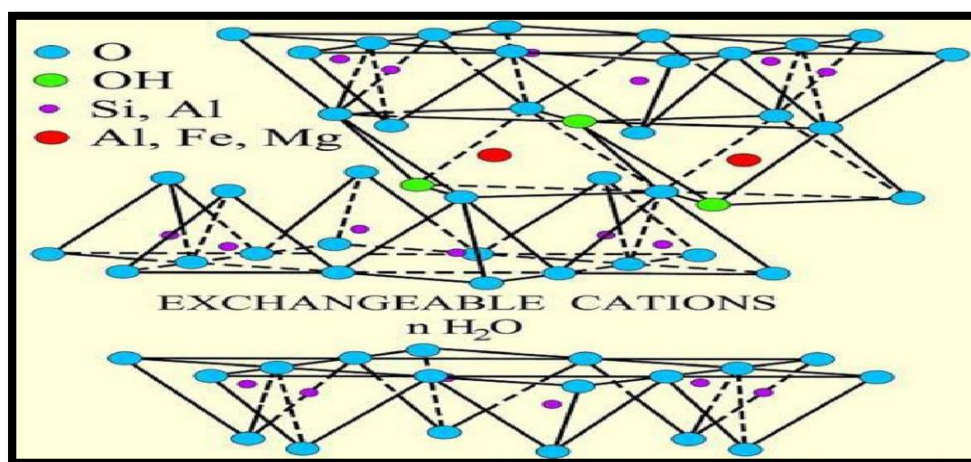
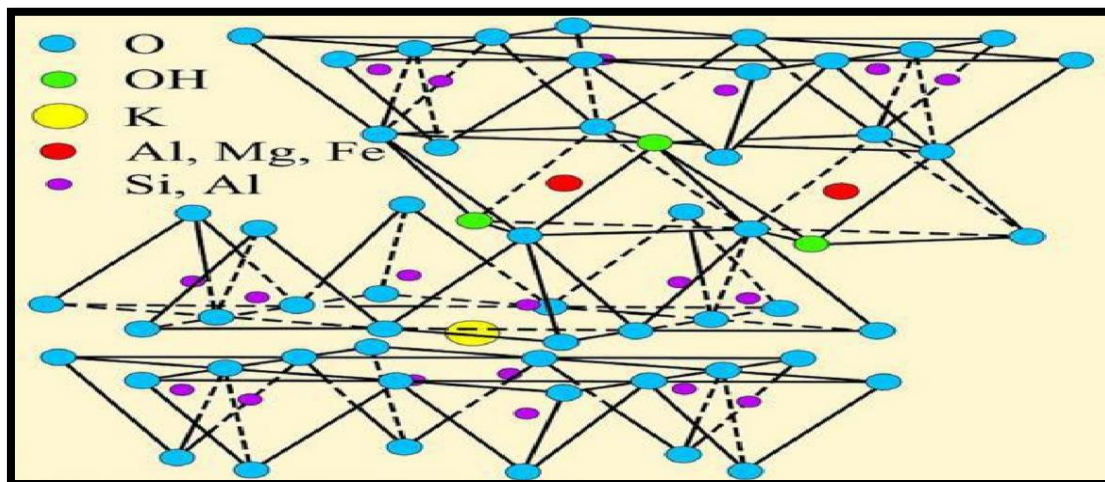


Figure (I.4) : Structure du cristal de montmorillonite (<http://pubs.usgs.gov>)

c) L'illite :

Est une autre composante importante des sols argileux, elle a une structure analogue à la montmorillonite mais il ya des ions de potassium intercalés entre les feuillets tétraédriques. Grâce à ces ions la liaison est relativement forte et les molécules d'eau ne peuvent pratiquement plus s'intercaler. Aux extrémités de la particule d'argile, il y a également des déséquilibres électriques et adsorption de cations .Ces cations dits échangeables jouent un rôle important dans le comportement des argiles.



Figure(I.5) : Structure du cristal illite (<http://pubs.usgs.gov>)

I.3.1.2 Les limons

Les limons, constitués de silt, de lœss, possèdent un squelette siliceux à silicone-calcaire à grains fins. Leur taille est située entre celle des sables et celle des argiles ; la teneur en argile est variable. Ils sont peu perméables et constituent des terres de culture fertiles. Leur assise est médiocre et sont donc à éviter pour les fondations.

I.3.2 Les marnes

Comme pour les argiles, les marnes argileuses présentent notamment l'inconvénient de craqueler sur marnes sont une assise de fondations bonne à moyenne en l'absence de gypse. En revanche, elles sont médiocres, voire dangereuses, lorsqu'elles sont très argileuses en affleurement ou lorsqu'elles se situent au-dessus d'une masse de gypse, avec risque de formation de fontis.

On peut conclure que l'évolution des sols fins est dus à la présence des minéraux argileux dans les sols tels que les marnes : les argiles...etc. qui manifestent une grande sensibilité à l'air (retrait, fissuration désagrégation progressive des couche de sol) et une forte affinité pour l'eau (avec les conséquences classiques de l'humidification : gonflement, déconsolidation, perte des caractéristique mécaniques)

- les marnes argileuses qui contiennent 5 à 35 % de carbonate de calcium ;
- les marnes proprement dites et les calcaires marneux avec des taux respectivement de 35 à 65 % et 65 à 95 %.

I.4 Les propriétés de sol

La mécanique des sols est une des disciplines du génie civil (stabilité des ouvrages, génie de l'environnement), il s'agit d'une science mais c'est également une discipline de l'ingénieur et un art. Elle s'appuie sur des bases mécaniques, physico-chimique et géologique, elle a de plus développé ses propres théories et les résultats qui en découlent sont appliqués à la résolution de problèmes techniques dans un double souci d'économies et de sécurité.

I.4.1 Propriétés physiques de sol

La texture et la structure du sol définissent la taille, la forme et la localisation des pores du sol, et donc leur accessibilité d'eau et d'O₂. La teneur en matière organique et en certains composés chimiques, ainsi que le pH, déterminent la disponibilité d'énergie et d'éléments minéraux pour les décomposeurs.

Tableau (I.1) : classification des sols selon le diamètre

CLASSE GRANULOMITRIQUE	DIMENSION [en μm]
Argile	<2
Limon	2-20
Limon grossier	20-50
Sable fin	50-200
Sables grossier	200-2000

I.4.1.1 La texture

La texture ou la granulométrie fait référence à la répartition des sédiments en fonction de leur taille. C'est une propriété fixe du sol qui est le loin la propriété la plus importante. La texture a une influence dominante sur les propriétés physiques et chimiques des sols.

Les classes de dimensions les plus couramment utilisées pour classer granulométriquement ces particules sont les suivantes :

a. Détermination de la texture du sol sur le terrain

L'appréciation tactile de la texture sur le terrain peut se faire en malaxant entre le pouce, l'index et le majeur quelques 3cm de terre fine (il faut écarter au préalable tous les éléments grossiers de l'échantillon prélevé) empruntée à l'horizon à tester, en sachant que :

- Les argiles peuvent se pétrir en pâtons qui ne s'effritent pas dans la main .Le pâton colle un peu aux doigts, devient même très collant s'il est gorgés d'eaux ; il est possible alors d'en faire un boudin assez fin (quelques mm de diamètre). A l'état sec, l'argile forme des blocs très durs et fortement cohérents, ne tachant pas les doigts, qu'il devient très difficile d'humecter au de la 40 °/° d'argile.
- Les sables grattent sous les doigts à partir de 0 ,1 mm Si les sables sont dominants il se peut que l'on n'arrive pas à confectionner une boulette ou un boudin.
- Les sables fins inférieures à 0,1 mm ne grattent pas mais restent perceptibles par crissement à l'oreille (un limon humide sans sable ne crisse pas).
- Les sols riches en limons donnent, entre les doigts des sensations d'onctuosité, le pâton est facilement malléable, s'écrasant par une pression faible. Les boudins se cassent vite à un fort diamètre .A l'état sec, le limon est poussiéreux, dessèche et tache les doigts ; des petite agrégats éclatent et se pulvérisent sous la pression des doigts.

b. détermination de la texture du sol en laboratoire

La texture est déterminée suite à une analyse granulométrique d'un échantillon de terre fine. Il est à noter que différents traitements préalables (chimique et /ou aux ultrasons) sont appliqués à l'échantillon de manière à obtenir une bonne dispersion des particules. Ces traitement servent donc à désagréger complètement les agrégats, ce qui implique de détruire les « ponts » qui constituent le « complexe argilo-humique » : un première traitement assure la destruction de la matière organique par l'eau oxygène, un deuxième traitement utilisant un sel dispersant sera ensuite effectuée

I.4.1.2 La structure

La structure du sol fait référence à l'organisation des sédiments définis par la texture. Plusieurs types de structure, ainsi que plusieurs formes d'agrégats, peuvent être définis mais la

présentation est simplifiée à trois seulement : particulaire, massive, en agrégats.

Particulaire : les sédiments n'ont pratiquement aucune cohésion et restent à l'état de particules libres. Ceci est le cas, par exemple de sables ou de graviers.

Massive : les sédiments sont pris en masse, d'un sol bloc. Ceci est le cas des argiles lourdes.

Agrégé : ceci représente la grande majorité des sols. En effet, sous l'effet cohésif des argiles et des matières organique surtout (et dans une moindre mesure les limons), le sol s'organise en une hiérarchie d'agrégats : les particules forment de micro-agrégats, qui se combinent pour former les méso-agrégats, et ensuite des macro-agrégats.

I.4.1.3 Porosité n

La porosité est l'ensemble des vides (pores) d'un matériau solide, es vides sol remplis par des fluides (liquide ou gaz). C'est une grandeur physique entre 0 et 1 ou en pourcentage entre 0 et 100 %, qui conditionnent les capacités d'écoulement et de rétention d'un substrat (voir aussi loi de Darcy). La porosité est aussi une valeur numérique définie comme le rapport entre le volume des vides V_p et le volume total V_t d'un milieu poreux :

$$n = V_p / V_t$$

La porosité peut avoir diverses origines, propre au matériau et à son évolution dans le temps, ce qui conduit à des pores de taille et de géométrie différent, plus ou moins interconnectés.

I.4.1.4 L'indice des vides e

La porosité et l'indice des vides définissent la proportion de vide contenue dans le sol considéré.

$$e = V_v / V_s$$

Avec V_s le volume occupé par les grains solides et V_v le volume vide.

I.4.1.5 Le degré de saturation S_r

La saturation est la concentration à partir de laquelle une substance ne peut se dissoudre dans un solvant. Ce point de saturation dépend de la température, et de la nature de solvant et du

soluté. Cette dépendance est utilisée dans l'opération de recristallisation pour la purification des composés chimiques.

$$S_r = V_w / V_v$$

Avec V_v le volume d'eau que contient l'échantillon de sol

I.4.1.6 La teneur en eau W%

Des milieux poreux, on désigne par teneur en eau la quantité d'eau liquide contenue dans un échantillon de matière, par exemple un échantillon de sol, de roche, de céramique ou de bois, la quantité étant évaluée par un rapport pondéral ou volumétrique. Cette propriété intervient dans un large éventail de disciplines scientifiques et technique, et s'exprime comme un rapport ou quotient, dont la valeur peut varier entre 0 (échantillon complètement sec) et (pour la teneur « volumétrique ») la « porosité à saturation » du matériau.

$$W = P_w / P_d$$

Avec P_w la masse de l'eau contenue dans l'échantillon et P_d la masse sèche de l'échantillon.

Le degré de saturation définit la proportion d'eau dans les vides.

I.4.1.7 La perméabilité du sol

La perméabilité du sol est définie par la vitesse d'infiltration de l'eau de gravité (Duchaufour, 1984). L'infiltration est le nom donné au processus d'entrée de l'eau dans le sol à travers la surface du sol et verticalement vers le bas. Ce processus est d'une grande importance dans la pratique car son régime détermine souvent le ruissellement qui se forme à la surface du sol pendant les orages (Hillel, 1984).

La vitesse d'infiltration de l'eau dans le sol est profondément affectée par l'état structural de la surface et l'état structural de la couche du sol intéressé par l'infiltration.

I.4.1.8 Surface spécifique S_{spe}

Dans le cas d'un sol, la surface réelle est la somme des surfaces des grains. La surface spécifique est alors la surface totale des particules individuelles divisée par la masse de matériau considérée. En général on ne prend en compte que la masse sèche (la surface spécifique ne dépend alors pas de l'hygrométrie). D'une manière générale, plus les grains sont fins, plus la surface spécifique est importante.

Pour des grains sphérique de rayon r et de masse volumique ρ

$$S_{spe} = 3 / \rho r$$

I.4.1.9 Coefficient d'échange cationique CEC

La capacité d'échange cationique d'un sol est la quantité de cations que celui-ci peut retenir sur son complexe adsorbant à un PH donné.

La CEC est utilisée comme mesure de la fertilité d'un sol en indiquant la capacité de rétention des éléments nutritifs d'un sol donné.

La CEC correspond donc au nombre de sites négatifs proposés à l'adsorption par l'argile et l'humus du sol. Chaque sol a une CEC bien précise qui correspond à la quantité de cations qu'il peut fixer, à un pH donnée. Ces cations peuvent être des acides faibles ou des acides forts (H_3O^+ notamment).

I.4.2 Propriétés chimiques du sol

Les propriétés chimiques du sol correspondent aux teneurs et disponibilités des éléments minéraux nutritifs pour les plantes et aux paramètres chimique du sol en lien avec leur restitution ou disponibilité. Les résultats sur l'azote et le phosphore sont présentés en détail. D'autre effets sur les propriétés : sur le pH et la capacité d'échanges cationiques.

I.4.2.1 le double couche électrique DDL

La double couche électrique est constituée d'une structure qui prend naissance à l'interface solide-liquide, en correspondance de laquelle il établit un transfert de charge électrique accompagné du déroulement de demi-réactions redox. Dans une cellule électrochimique, la phase

solide est représentée par l'électrode tandis que la phase liquide est représenté par l'électrolyte (en particulier à partir d'une solution électrolytique ou d'un sel fondu). Etant donné que dans une cellule électrochimique aura deux électrodes (la cathode et l'anode), vous aurez deux doubles couches électriques, chacun ayant trait à une électrode

Des modèles de la double couche électrique :

Le modèle initial de la double couche électrique est attribué à Helmholtz (1879). Mathématiquement, il a simplement assimilé la double couche à un condensateur, en se basant sur un modèle physique dans lequel une couche d'ions est adsorbée à la surface.

Plus tard, Gouy et Chapman ont apporté des améliorations significatives à ce modèle, en développant séparément la théorie de la double couche diffuse, liée à l'agitation thermique.

Le modèle utilisé aujourd'hui est le modèle de Gouy-Chapman-Stern, qui combine les deux modèles en faisant intervenir la couche dense de Helmholtz (appelée alors couche de Stern) et la couche diffuse de Gouy-Chapman. La couche diffuse commence alors à une distance finie de la paroi.

Les approximations notables de ce modèle sont les suivantes :

- Les ions sont considérés comme charges ponctuelles.
- Seules les interactions coulombiennes sont significatives.
- La permittivité électrique est constante à l'intérieur de la double couche.
- Le solvant est uniforme à l'échelle atomique.

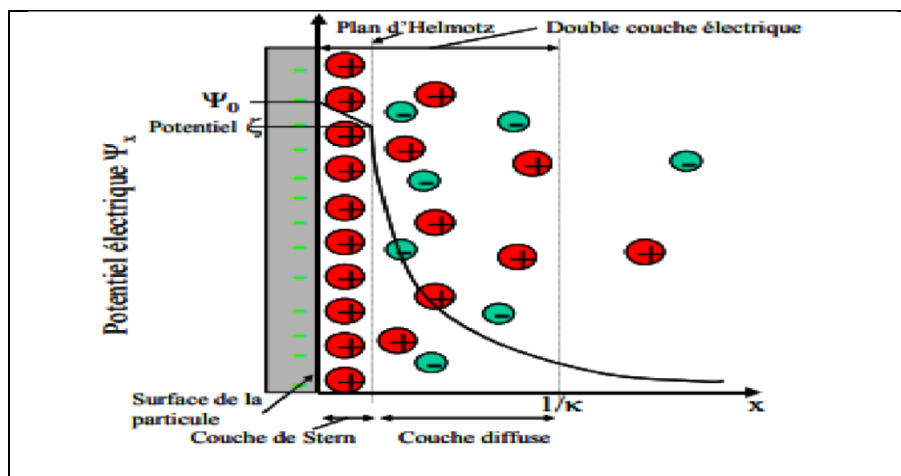


Figure (I.6): Représentation schématique de la double couche électrique et de l'évolution du potentiel électrique en fonction de la distance des particules

Origine des charges de surface :

Souvent, lorsqu'un liquide est en contact avec une surface, celle-ci se charge, à cause de la dissociation des molécules de surface. Ainsi, pour une surface de silice, contenant des groupes Silanol SiOH, des protons H^+ peuvent être libérés, laissant des SiO^- sur la surface.

Cette dissociation dépend des espèces présentes dans la solution, de son pH.

Typiquement, pour de l'eau sur de la silice, l'ionisation de surface donne naissance à une charge négative tous les 16 nm^2 environ.

Le potentiel ζ (zêta) est la différence de potentiel entre la couche dense de Stern et le liquide. Il caractérise donc la répartition des charges électrique sur la surface.

I.4.2.2 Réaction chimique du sol le pH

Les sols peuvent avoir une réaction acide ou alcaline ; d'autres peuvent être neutres. On mesure la réaction chimique du sol d'après la valeur de son pH. La valeur du pH varie de 0 à 14, le $pH=7$ correspondant à une réaction neutre. Des valeurs inférieures à 7 indiquent que le sol est acide ; des valeurs supérieures à 7 indiquent que le sol est alcalin. Plus le pH s'éloigne de la neutralité, plus fortes sont l'acidité ou l'alcalinité.

La méthode la plus exacte pour mesurer le pH du sol consiste à utiliser un pH mètre électrique qui donne directement la valeur du pH quand on plonge des électrodes en verre dans une solution obtenue en mélangeant une part d'échantillon de sol avec deux parts d'eau distillée.

I.4.3 Propriétés mécanique des sols

Les caractéristiques mécaniques des sols peuvent être séparées en deux catégories :

On parle des caractéristiques mécaniques de compressibilité des sols d'une part.

Les caractéristiques mécaniques de compressibilité vont servir dans le calcul des ouvrages à déterminer les déformations du sol, c'est-à-dire généralement les tassements, qu'ils se produisent à long terme ou à court terme.

Les caractéristiques mécaniques de cisaillement vont servir pour leur part à déterminer la résistance (au sens large du terme) du sol aux sollicitations qui lui sont appliquées.

I.5 Conclusion

Ce chapitre présente une analyse théorique sur les différents sols existants sur terre, chaque type de sol se caractérise par sa nature qui dépend en général de ces priorités physico-chimiques. On retrouve différentes catégories tel que les roches, le sable et les argiles. Les principaux facteurs de comparaison entre ces sols se résident dans leur la texture ; les différentes dimensions des grains qui les constituent et leur minéralogie.

Dans ce chapitre on s'est intéressé aux sols argileux, il est une catégorie de sol extrait d'un ensemble d'espèces minérales, une famille de roches, ou encore une classe granulométrique. Il est caractérisé par, la forme et la surface spécifique, la double couche électrique. La kaolinite, la montmorillonite et l'illite sont les principaux minéraux argileux utilisés dans le domaine de géotechnique.

Chapitre II : La résistivité électrique des sols

II.1 : Introduction

Depuis de nombreuses années la conductivité électrique des extraits de sol par l'eau est utilisée comme diagnostic de la salinité des sols, ainsi que pour le classement d'aptitude des eaux pour l'irrigation. L'extrait de pâte saturée, ou extrait saturé, sert de référence générale (USSL 1954), alors que les extraits obtenus avec des rapports eau /sol plus élevés, plus faciles d'emploi, restent à vérifier et doivent être étalonnés par l'extrait de pâte saturé (SERVANT, 1975).

Bien que parfaitement au point pour les analyses de séries cette technique est très lourde par suite des nombreux prélèvements à effectuer, aléatoire en raison de l'hétérogénéité spatiale des sols et de plus destructive, ce qui interdit de l'employer dans certains essais en place.

Certain chercheurs ont donc fait l'appel à des techniques plus maniables et plus répétitives, lesquelles la mesure de la conductivité apparente par la méthode dans la dernière décennie.

II.2 Propriétés électriques des milieux poreux

II.2.1 Définitions de la résistivité électrique

La résistance (électrique) caractérise la capacité d'un milieu à s'opposer à un courant électrique qui le traverse et dépend de la forme du milieu et de la configuration d'injection du courant. La loi d'Ohm, pour un conducteur, exprime la résistance R (en Ohm - Ω) d'un milieu homogène par la proportionnalité entre courant injecté (I , Ampères A) et différence de potentiel (U , Volts V) :

$$R = U/I \quad (II.1)$$

La résistivité est la résistance ohmique d'un cylindre de section A et de longueur unitaire L (Chapellier, 2000).

$$\rho = R A / L \quad (II.2)$$

Où ρ est la résistivité électrique du matériau exprimée en ($\Omega.m$), A est l'aire de la section transversale des plaques conductrices (m^2), L est la distance de séparation entre les deux plaques conductrices (m) et R est la résistance électrique (Ω)

La résistivité électrique d'un horizon de sol est égale à l'inverse de sa conductivité électrique, elle est donc définie par la capacité de l'horizon à limiter le passage du courant électrique. La résistivité électrique d'un sol est influencée par plusieurs facteurs répartis entre les variables intrinsèques pérennes telles que la texture, la structure et la carbonatation du sol et les variables d'états évolutifs comme la teneur en eau, la température et la concentration de la solution du sol (Mc Neil, 1980 ; Michot, 2003). Les mesures de résistivité électrique d'un sol traduisent donc son état à un moment donné. Pour étudier la variabilité spatiale des sols d'une région donnée il est donc préférable d'opérer les mesures à un temps t pour s'affranchir des variables évolutifs. À l'inverse, l'étude des variations temporelles de résistivité électrique d'un sol permet par exemple d'étudier spécifiquement sa dynamique hydrique puisque les variables intrinsèques du sol (texture, structure...) sont constantes dans le temps et que seules les variables évolutifs peuvent faire varier la résistivité électrique.

II.2.2 La conductivité électrique

La conductivité est l'inverse de la résistivité. Elle consiste à induire un champ magnétique alternatif, qui va générer un courant proportionnel à la conductivité.

Ce courant dit de Foucault va émettre un nouveau champ magnétique. La mesure de cette tension électrique va permettre de déterminer la conductivité du sol. Lorsque la conductivité sera homogène, on fera l'hypothèse que le sol de cette zone est homogène, sans pour autant connaître ses caractéristiques : profondeur, type de sol, etc...

II.2.3 Mesure de la résistivité électrique

II.2.3.1 Mesure en laboratoire

Dans la pratique, la résistivité électrique du sol est généralement mesurée grâce un dispositif à quatre électrodes. Quel que soit la configuration, deux électrodes sont destinées à l'injection de courant d'intensité connue, usuellement appelées A et B ; et les deux autres électrodes, M et N , servent à mesurer la différence de potentiel (Figure 2). Les électrodes A et B imposent un champ électrique ou courant dans le milieu, sous l'effet duquel les porteurs de

charges déplacent dans le sol pour rétablir l'équilibre électrique. Ce mouvement de charges crée un courant électrique dans le milieu dont la différence de potentiel est mesurée par M et N.

Quand le sol ne contient pas/peu de métaux ou corps conducteurs (comme le graphite), ce sont les ions, présents dans l'eau du sol, qui sont les transporteurs de charges électriques en migrant lorsque le milieu est soumis à un champ électrique (les anions vers la cathode et les cations vers l'anode). Cette migration ionique est à l'origine du courant électrique de conduction qui se propage dans le sol. Pour éviter la polarisation des électrodes et mesurer la résistivité du sol lui-même et non pas du couple sol-électrode, le courant injecté doit être successif. Toutefois, pour rester dans le domaine d'application des formules (i.e. processus conductor cf. loi locale d'Ohm), la fréquence du courant ne doit pas être trop élevée. La résistivité des sols varie sous l'influence directe ou non de variables pédologiques (Besson, 2007).

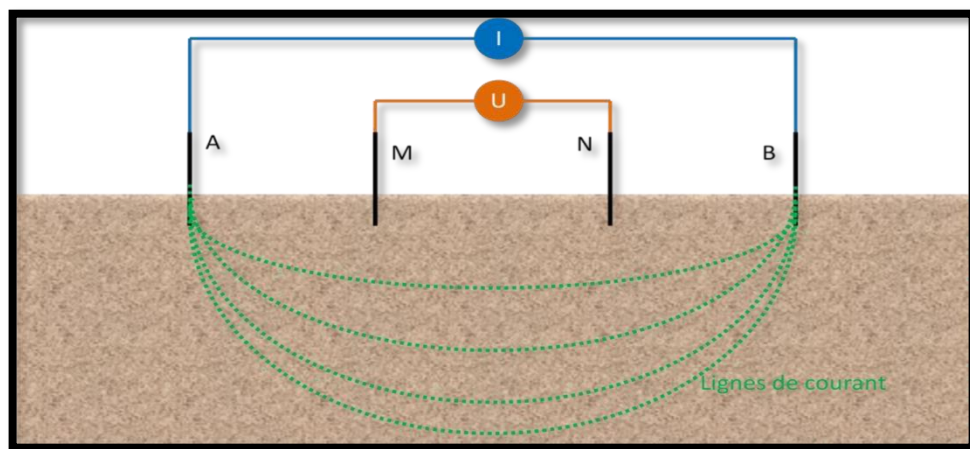


Figure (II.1) : Mesure à quatre électrodes de la résistivité électrique du sol

II.2.3.2 Mesure in situ

Les mesures de résistivité électrique obtenues sont ensuite traitées par le logiciel Res2Dinv (Loke et al.1996). Ce logiciel permet de diviser le sol prospecté en blocs rectangulaires présentant chacun une valeur de résistivité « vraie » correspondant à la minimisation de la différence entre la résistivité calculée par le programme et la résistivité mesurée. Ce processus informatique appelé inversion des données permet de réduire significativement les erreurs liées aux artefacts de mesure (Panissod et al.2001). Les résultats peuvent être présentés sous forme de section de résistivité électrique (tomographie) ; il est ainsi

possible de visualiser les variations latérales de résistivité sur la longueur du profil ainsi que les variations verticales sur la profondeur d'investigation.

Les dispositifs le plus fréquemment employés pour la recherche archéologique, quant à l'espacement des électrodes, sont les si suivants :

- 1) **Dispositif Wenner** : C'est le plus simple, les quatre électrodes sont disposées dans l'ordre C1 P1 P2 C2 et séparées entre elles par une distance égale.

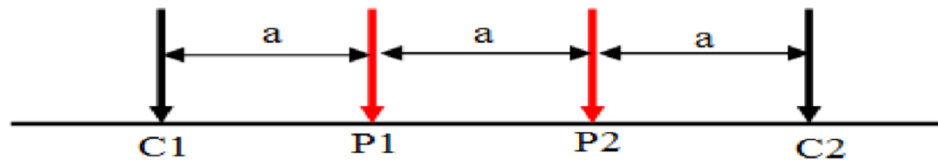


Figure (II.2) Dispositif Wenner

- 2) **Dispositif Schumberger** : La distance entre C1 et P1 doit être la même qu'entre P2 et C2, mais très sensiblement plus considérable que celle qui sépare P1 et P2.

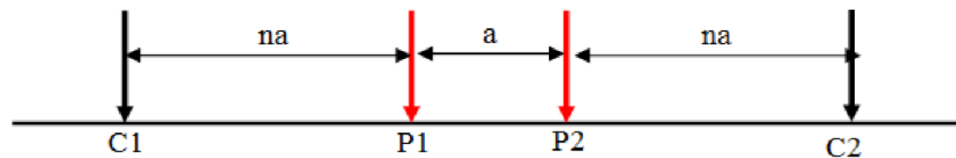


Figure (II.3) Dispositif Schumberger

- 3) **Dispositif Palmer** : C'est l'inverse du dispositif Schumberger. Si la distance entre C1 et P1, d'une part, P2 et C2 de l'autre, est toujours égale, elle est très inférieure à celle qui sépare P1 et P2.

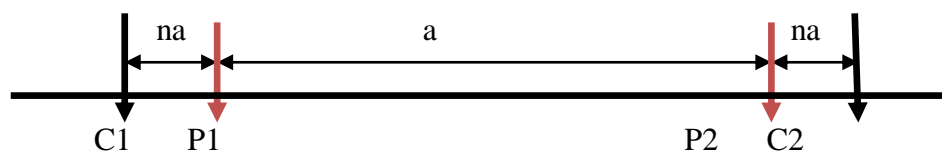


Figure (II.4) Dispositif Palmer

Avec un sol homogène, la résistivité notée sera la même, quelle que soit la combinaison adoptée pour la disposition des électrodes ; mais si, comme il arrive le plus souvent, le sol n'est pas homogène, les mesures de résistivité seront différentes pour chacun de ces trois groupes, et ces différences pourront fournir des indications concernant l'anomalie présentée par le sol en cause.

II.3 L'électricité dans le sol

De façon générale, les méthodes électriques consistent à mesurer la résistivité d'un sol en y injectant un courant I connu et en relevant la différence de potentiel U . Ainsi, la variation des données électriques traduit l'évolution d'une ou de plusieurs propriété(s) du milieu investigué. Dans un sol supposé homogène le courant injecté à partir d'une électrode se propage uniformément dans toutes les directions depuis son point d'injection.

Dans ce cas, le courant se propage suivant une demi-sphère de rayon r en m, les courbes d'équipotentiel, dont la surface S en m^2 se calcule comme suit :

$$S=2\pi r^2$$

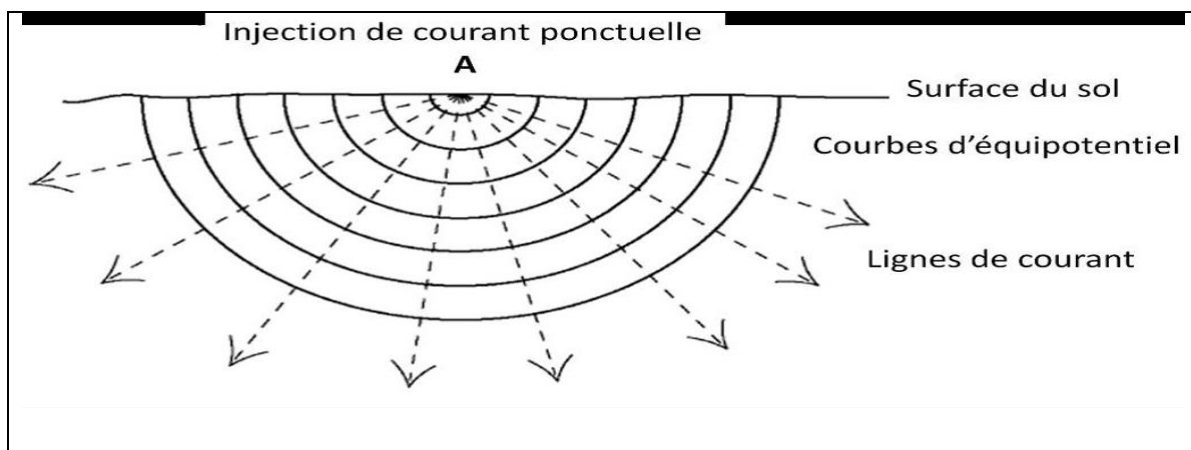


Figure (II .5) : Distribution de courant dans un sol homogène

II.4 Facteurs d'influence des propriétés électriques des sols :

Différents facteurs du milieu, pouvant interagir les uns avec les autres, sont à l'origine de variation de la conductivité électrique du sol. Besson (2007) propose une classification de ces variables suivant la nature de la conductivité qu'elles influent : conductivité volumique (σ_w) et conductivité surfacique (σ_s). La conduction électrique des sols est principalement assurée par les

ions ; ce type de conduction est dite « conduction électrolytique ». La conductivité volumique (σ_w) provient du déplacement des ions dissous dans la solution du sol, à l'intérieur des pores, alors que la conductivité surfacique (σ_s) est due à la migration des ions retenus à l'interface solide/liquide. La conductivité apparente est souvent considérée comme la somme de ces deux types de conductivité (chemins parallèles):

$$\sigma_a = \sigma_w + \sigma_s \text{ (Rhoades et al. 1976).}$$

II.4.1 Conductivité volumique

Les charges électriques libres en solution soumises à un champ électrique migrent vers l'électrode de signe opposé : c'est l'électromigration. La viscosité μ de la solution et le rayon de Stokes des ions dissous s'opposent à ce mouvement. Ici, plusieurs facteurs influencent la

II.4.1.1 La concentration ionique de la solution du sol

La composition quantitative de la solution, c'est-à-dire la concentration en différents ions, influence directement le caractère conducteur du milieu. En effet, l'accroissement de la concentration en sels dissous augmente la densité de charges présentes, et favorise donc la conductivité électrolytique de la solution.

II.4.1.2 La teneur en eau

L'eau étant le solvant permettant la dissolution des ions porteurs de charges, elle constitue le milieu dans lequel se déplacent ces charges. Ainsi, au-delà de sa composition ionique, la teneur en eau du sol (volume d'eau par volume de sol), qui va définir la surface des pores remplis d'eau ainsi que la tortuosité et la connectivité de la phase liquide influence directement sur la conductivité électrique du sol

II.4.1.3 La température

La température influence la viscosité de la solution du sol : la diminution de la température augmente la viscosité, augmentant de fait les forces de frottement qui s'opposent à la migration des charges électriques. C'est donc la vitesse de migration, et le cas échéant, la mobilité des ions qui sont réduites par une baisse de température, et avec elles la conductivité

électrique du milieu. En outre les températures plus élevées peuvent favoriser la dissociation des solutés, ce qui augmente la densité de charges en solution et la conductivité électrique (Muñoz et Berga, 2005).

II.4.2 Conductivité surfacique

En plus de l'électromigration des charges libres dissoutes dans la solution, les ions liés à la surface des particules solides du sol subissent aussi les forces résultant d'un champ électrique ; de leur déplacement résulte également la conduction d'un courant. Les substances minérales ou humiques des sols peuvent être chargées en surface et ainsi adsorber les ions compensateurs présents en solution pour tendre à l'électroneutralité.

II.4.3 Modélisation du comportement électrique des sols

La conductivité électrique dans les milieux poreux a été le sujet de nombreux travaux de modélisation depuis près d'un siècle. En lien avec des applications géologiques/pétrolières, nombre de scientifiques ont étudiés les relations entre saturation et conductivité électrique. La complexité de ces modèles ne cesse de croître au fur et à mesure que sont intégrés de nouveaux processus et interactions. La multitude des résultats prouve la difficulté de modéliser ce comportement électrique (Besson, 2007).

En 1942, Archie est le premier à proposer une loi qui modélise le comportement électrique des milieux poreux saturés (des grès) et sans argile et matériaux conducteurs. Cette loi sera la base de tous les modèles qui suivront. Dès lors, il met en évidence l'influence de la conductivité de la solution (σ_w), de la porosité (ϕ) et de la consolidation (exposant de cimentation, empirique et sans dimension) dans la prédiction de la conductivité électrique globale de ce milieu (σ_a).

$$\sigma_a/\sigma_w = 1/F \phi^m \quad (\text{II.5})$$

Où F (sans dimension) est le facteur de formation défini comme le rapport entre conductivité électrique volumique et la conductivité électrique globale du milieu.

Cette « première loi d'Archie » a été généralisée pour des milieux partiellement saturés en incorporant la notion de degré de saturation. Cette deuxième loi intègre le taux de saturation

S_w^5 et l'exposant de saturation, tous deux sans dimension.

$$\varphi^m \cdot S_w^n = S_w^n / F \quad (\text{II.6})$$

En 1989, Rhoades et al. Proposent un autre modèle plus complexe. En se basant sur les travaux de Sauer (1955), Rhoades et al. (1976) et Shainberg et al. (1980), ils imaginent un modèle à trois chemins électriques :

- via l'interface solide-liquide : le courant se déplace alternativement à travers les particules solides et liquides du milieu, qui sont alors considérées comme une succession de résistances électriques en série. La conductivité correspondante est notée σ_{ws} .
- via la phase liquide : le courant se déplace continuellement au travers de la solution du sol ; la conductivité correspondante est notée σ_{wc} .
- via la phase solide : le courant se déplace à la surface des particules solides correspondant à la conductivité surfacique σ_s .

II .5 Conductivité électrique dans un sol argileux

La conduction électrique dans un milieu particulaire se produit généralement par le mouvement des ions à travers l'eau des pores électrolytiques dans le vide et la charge de surface (Bryson, 2005). Dans les sols à grains grossiers, la conduction est en grande partie électrolytique et dépend de l'espace des pores interconnectés, du squelette granulaire, de la conductivité électrolytique et du degré de saturation (Santamarina et al, 2001). Cependant, la charge de surface est un paramètre important dans la conduction électrique des sols argileux. Les particules d'argile présentent des déficits de charge dus à la substitution d'ions au niveau de la structure cristalline et à la réaction acide-base des groupes silanol-aluminol (Si-O-H et Al-O-H) avec de l'eau. Les cations adjacents sont attirés par les particules d'argile pour contrebalancer la charge négative nette. La densité de cations est élevée autour de la surface solide; cependant, les cations concentrés essaient de diffuser pour égaliser la concentration dans toute la structure. Les phénomènes de diffusion sont limités par le champ électrique négatif des particules d'argile et les anions sont également éloignés en raison de la force négative des particules. Il en résulte qu'il existe des ions relativement mobiles composés de charges positives et négatives contiguës à la couche adsorbée. La surface chargée et la surface de charge distribuée sont appelées double

couche électrique. Le long du plan duquel les contre-ions sont fortement adsorbés avec une charge négative de particules est appelé couche de Stern. Une application du champ électrique externe entraîne la séparation des charges dans la double couche diffuse le long du plan de potentiel z (Revil et al, 1998; Rinaldi et Cuestas, 2002). Par conséquent, la conduction électrique dans un sol argileux dépend de la conductivité globale du fluide et de la surface. La Figure (I.6) présente schématiquement l'emplacement de la double couche diffuse, de la couche de Stern et des ions précipités dans les argiles. L'interaction de l'eau avec un sol argileux joue également un rôle essentiel dans la conduction électrique. À l'état sec, les cations adsorbés sont étroitement liés par la charge négative des particules d'argile. Après neutralisation des charges négatives nettes de particules d'argile, des excès de cations se forment lorsque le sel précipite. Les sels précipités entrent dans la solution sol-eau en présence d'humidité. Une étude précédente indiquait que les propriétés électriques et thermodynamiques de l'eau adsorbée étaient différentes de celles de l'eau libre (Holtz et Kovacs, 1981). De plus, Revil et al (1998) ont souligné le rôle de la réaction chimique à la surface de l'argile en présence d'eau. Selon l'étude, une surface de particule avec un groupe silanol peut être dissociée en charges positives ou négatives en fonction de la réaction chimique en présence d'eau.



II.6 Conclusion

La résistivité électrique d'un sol traduit l'état et l'interaction de ses principales propriétés au moment de la mesure. La structure d'un sol et son aération, sa texture et son état hydrique ainsi que sa température peuvent être approchés simultanément et de façon intégrative par résistivimétrie électrique.

La mesure de la résistivité électrique des sols est une technique non destructive et intégrante. Elle offre la possibilité de spatialiser précisément les différents horizons du sol et de localiser leur variation d'humidité. Le volume de sol soumis au prélèvement des racines peut ainsi être mieux appréhendé et pour certains types de sols, cette technique permet également de quantifier l'eau disponible. Des applications dans des études relatives aux pratiques agro-viticoles peuvent être entreprises et les premiers essais de mise en relation de la résistivité électrique du sol avec les caractéristiques physiologiques.

Partie II : L'étude expérimentale

Chapitre III : Identification et caractérisation du sol étudié

Chapitre IV : variation de la teneur en eau du sol en fonction de la résistivité électrique après le traitement électrique

Chapitre III : Identification et caractérisation du sol étudié

III.1 Introduction

Ce chapitre a pour but de présenter dans son ensemble notre démarche expérimentale ainsi que les moyens mis en œuvre et les protocoles d'essai qui nous permettront à l'identification du sol Bordjia (lieu d'extraction), le programme d'essai concerne la mesure et calcul des paramètres géotechniques du sol prélevé en l'occurrence propriétés physiques et chimiques. Les étapes de ce travail sont :

- Préparation des matériaux qui composent les sols d'essais.
- Détermination des caractéristiques physiques de ces sols (granulométrie, limites d'Atterberg, teneurs en eau optimales.....).
- Analyse de la composition chimique

III.2 Identification et localisation du site

Le sol étudié est situé dans la zone d'activité Bordjia, sise à la commune de El Haciane région d'Ain Nouissy Mostaganem (nord-ouest de l'Algérie), autour de la mise en valeur d'une superficie de 1800hectares sur une étendue de 25000 hectares, est resté au point mort. Cette région est considérée comme une zone semi- aride. (B N E D E R, 2015)

Les précipitations annuelles moyennes sont de 382 mm. Selon la classification de Koppen-Geiger, le climat méditerranéen chaud avec été sec. Sur l'année La température moyenne est 18°C

D'un point de vue géographique, le périmètre présente les limites suivantes :

- Au nord : les Monticules de sidi Abdelkader au Nord-Est et Moulay Haiba au Nord-Ouest ;
- A l'est : le tracé sinueux de l'oued Makhloof ;
- Au sud et à l'ouest : les limites administratives de la wilaya de mascara.

L'accès au périmètre de Bordjia se fait aisément par le Nord, à travers plusieurs pistes qui rejoignent la RN n°17 reliant Relizane à Oran, laquelle est située à environ 03 Km.

(Tableau III.1) : Localisation et coordonnées géographiques du périmètre, (BNEDER.2015)

Lieu	Communes	Daïras	S (ha)	Coordonnées projetées en WGS84			
				X1 West	X2 West	Y1 Nord	Y2 Nord
Bordjia	El hassiane	Ain Nouissy	1664	0° 05' 07.8"	0° 09' 09.4"	35° 41' 31.3"	35° 44' 10.9"
	Sirat	Bouguirat	112	0° 08' 25.4"	0° 09' 17.8"	35° 43' 44.8"	35° 44' 41.6"
Total périmètre			1776	0° 05' 07.8"	0° 09' 17.8"	35° 41' 31.3"	35° 44' 41.6"

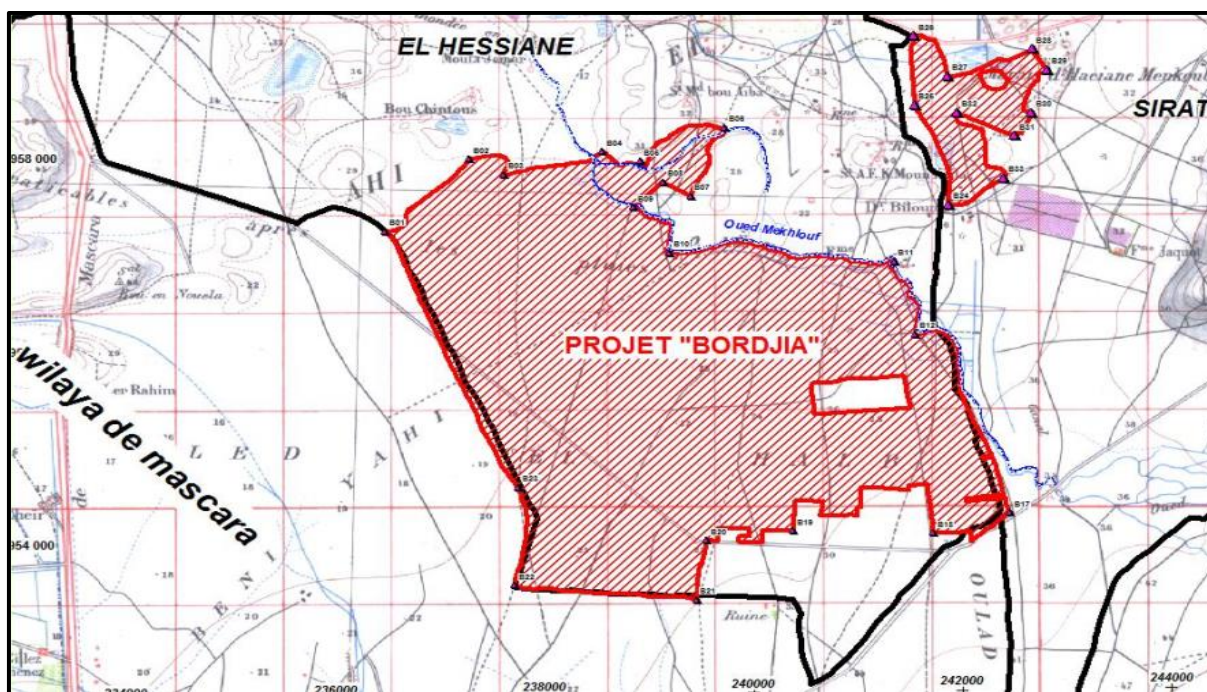


Figure (III.1) : Situation géographique de Bordjia (BNEDER.2015)

III. 3 Caractérisation des sols

III.3.1 Caractéristiques physiques

Les propriétés physiques du sol étudié sont : l'analyse granulométrique, les limites d'Atterberg, la surface spécifique, la teneur en matière organique, la conductivité électrique.

Le sol a été prélevé du premier mètre de la sub-surface sur quatre points. Après son extraction, il a été placé dans des sachets en plastique, transporté au laboratoire et passé à l'étuve pendant 24 h, afin d'éliminer toute éventuelle humidité et faciliter son broyage. Après séchage, il a été concassé et broyé pour pouvoir faire les essais géotechniques d'identification et de caractérisation.[Figure (III.2)]



Figure (III.2) : Processus de préparation du sol : (a) concassage, (b) broyage,(c) tamisage

III.3.1.1 Calcul des Poids volumiques

- **Poids volumique du sol humide (δ_h)**

C'est la masse d'un corps par unité de volume apparente en état naturel et exprimé en (gr/cm^3 ; kg/m^3 ; t/m^3)

$$\gamma_h = p_h / V_t \quad (\text{III.1})$$

p_h : poids humide et V_t le volume total

- **Poids volumique du sol sec (δ_d)**

C'est rapport du poids de matériau sec (après expulsion de l'eau libre) contenu dans Une certaine quantité de sol au volume de ce même matériau exprimée en (gr/cm^3 , kg/m^3 , t/m^3).

$$\gamma_d = \gamma_h (1+w\%) \quad (\text{III.2})$$

w% : teneur en eau à l'état nature

- **Poids volumique solide (δ_s)**

C'est le rapport du poids matériau sec contenu dans une certaine quantité de sol au volume des grains du sol exprimée en (g/cm^3 ; kg/m^3 ; t/m^3)

$$\gamma_s = P_s / V_s \quad (\text{III.3})$$

Avec P_s le poids sec et V_s le volume sec.

III.3.1.2 Teneur en eau W%

Le calcul de cette teneur, nous permettra de reconnaître l'état hydrique du sol in situ à son état naturel. Elle est le rapport du poids d'eau contenu dans ce matériau au poids de même matériau sec. On peut aussi définir la teneur en eau comme le poids d'eau W contenu par unité de poids de matériau sec exprimée en(%).

$$W (\%) = 100 (W_w / W_s) \quad (\text{III.4})$$

Avec W_w : poids de l'eau ; W_s : poids sec après étuvage



Figure (III.3) : Essai d'étuvage du sol

III.3.1.3 Degré de saturation S_r

Le degré de saturation est le pourcentage de l'espace poreux qui est occupé par l'eau. Pour le sol saturé le degré de saturation est égale 100% et pour le sol sec est 0%.

$$S_r = V_w / V_v \quad (\text{III.5})$$

Avec V_w le volume de l'eau et le V_v le volume total occupé par les vides.

Tableau (III.2) : Les propriétés physique du sol

Propriétés physique	Symbol	Unité	Valeur
La teneur en eau à l'état naturel (après extraction)	W	%	14,56
La teneur en eau à l'état naturel après stockage au labo	W	%	10,74
Poids volumique des grains solides	γ_s	g/cm^3	2,63
Poids volumique humide	γ_h	g/cm^3	1,55
Poids volumique sec	γ_d	g/cm^3	1,53
Densité humide	D_h	g/cm^3	1,55
Densité sec	D_d	g/cm^3	1,53
Degré de saturation	S_r	%	39,78
L'indice de vide	e		0.33
Porosité	n		0.65

III.3.1.4 Analyse granulométrique (NF P94-057)

L'analyse granulométrique a pour but de déterminer la répartition des grains de sol suivant leur dimension. Elle a été effectuée par tamisage sous l'eau pour les éléments supérieurs à $80\ \mu\text{m}$, la figure (III.4) montre que le pourcentage des ces fractions granulaire sont presque minimales, ce qui prouve d'un côté que le sol est un sol fin.



Figure (III.4) : Essai granulométrique du sol (fraction granulaire > $80\ \mu\text{m}$.)

Pour les fractions inférieure $80\ \mu\text{m}$, l'analyse a été faite par sédimentation, où une quantité de 80 g de sol a été imbibée en ajoutant une solution à 5% d'hexamère taphosphate de sodium, le mélange est laissé pendant 16 heures, après quoi il est mis dans une éprouvette cylindrique en verre de 2 litre contenant de l'eau distillée. La lecture se fait automatiquement après agitation en utilisant un densimètre. [Figure (III.5)].

La granulométrie est exprimé par une courbe granulométrique qui donne la dimension moyenne des grains exprimé sous forme pourcentage du poids total du matériau elle est tracée en diagramme semi logarithmique.



Figure (III.5): Essai sédimentométrie

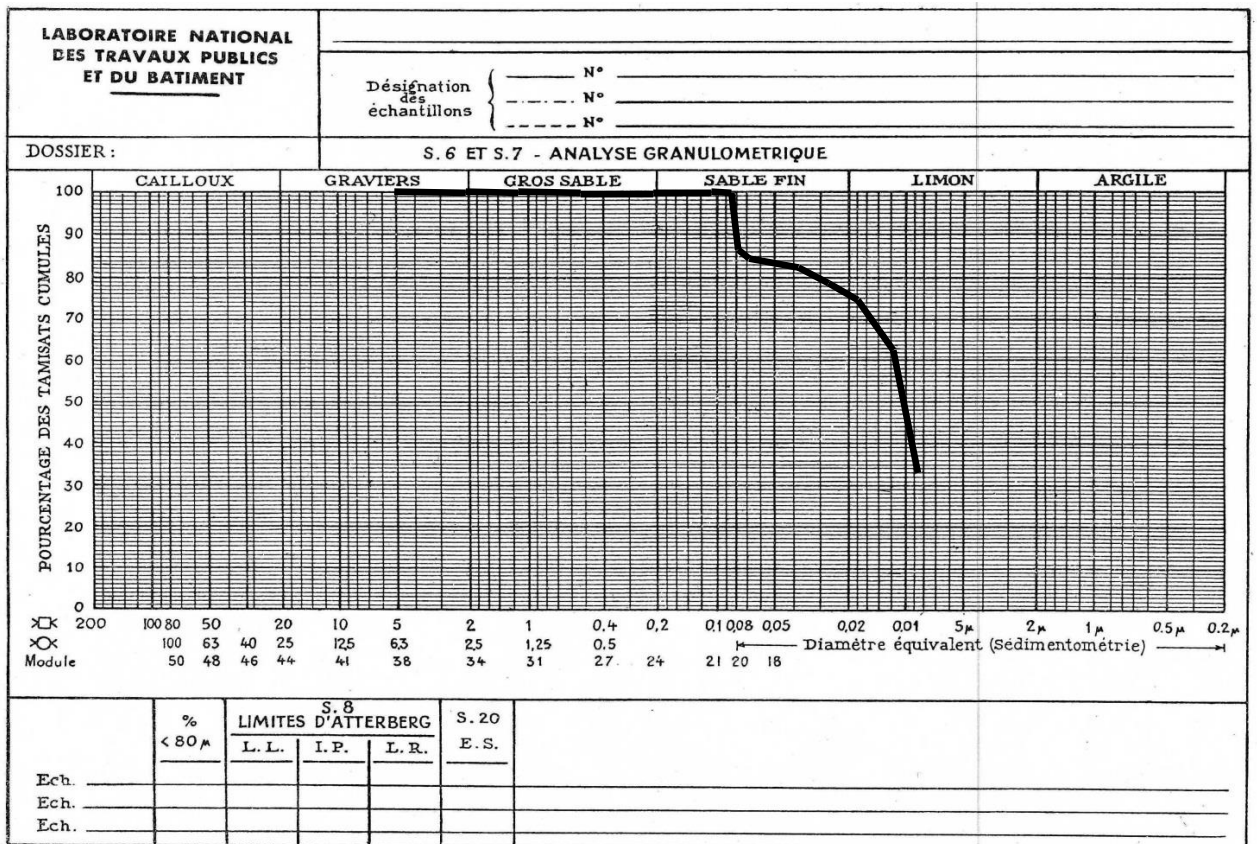


Figure (III.6) : Courbe granulométrique du sol

Aussi la figure (III.6) montre que le sol contient plus d'éléments fins et est dans la catégorie des sols sablonneux-limoneux.

III.3.1.5 Limites d'Atterberg (NF P94-051)

Cet essai permet de prévoir le comportement des sols pendant les opérations de terrassement, en particulier sous l'action des variations de teneur en eau. Il consiste à faire varier la teneur en eau d'une fraction de sol en observant sa consistance. Il existe deux limites dites d'Atterberg : la limite de liquidité et la limite de plasticité.

- **Limite de liquidité W_L :**

la limite de liquidité est la teneur en eau ($W\%$) qui correspond à une fermeture du sol humidifié après 25 coups (chocs) appliqués par un appareil dit appareil conforme aux spécifications qui porte le nom de Casa grande. Formule de la teneur en eau pondérale : Masse d'eau (g) / Masse de sol sec (g).

$$W = (N/25)^{0,121} \quad (III.6)$$



Figure (III.7) Essai de limite atterberg (appareil de Casa grande)

- **Limite de plasticité W_P :**

La limite de plasticité est la teneur en eau (exprimée en %) du sol en forme de rouleau qui se brise en petits tronçons de 10 à 20mm de longueur au moment où son diamètre atteint 3 mm.

À partir des limites d'Atterberg, on peut calculer les grandeurs physiques suivantes : indice de

plasticité (I_p) et sa consistance (I_c) .



Figure (III.8) Essai de limite de plasticité

- **Indice de plasticité I_p :**

Est la différence entre la limite de plasticité et la limite de liquidité, il mesure l'étendue du domaine de plasticité du sol. Il s'exprime donc la relation :

$$I_p = W_L - W_P \quad (\text{III.7})$$

- **Indice de consistance I_c :**

$$I_c = W_L - W_n / I_p \quad (\text{III.8})$$

Tableau (III.3): Résultats des limites d'Atterberg

Grandeur physique	W_L	W_p	I_p	I_c
Valeur en (%)	46,15	24,03	22,12	1,6

Ces indices expriment la sensibilité du sol vis-à-vis de l'eau, et permettent aussi de le classer et d'avoir une idée sur sa nature. D'après l'abaque de Casa grande représentée par la figure (III.9), on peut conclure que le sol appartient à la classe des sols argileux peu plastique.

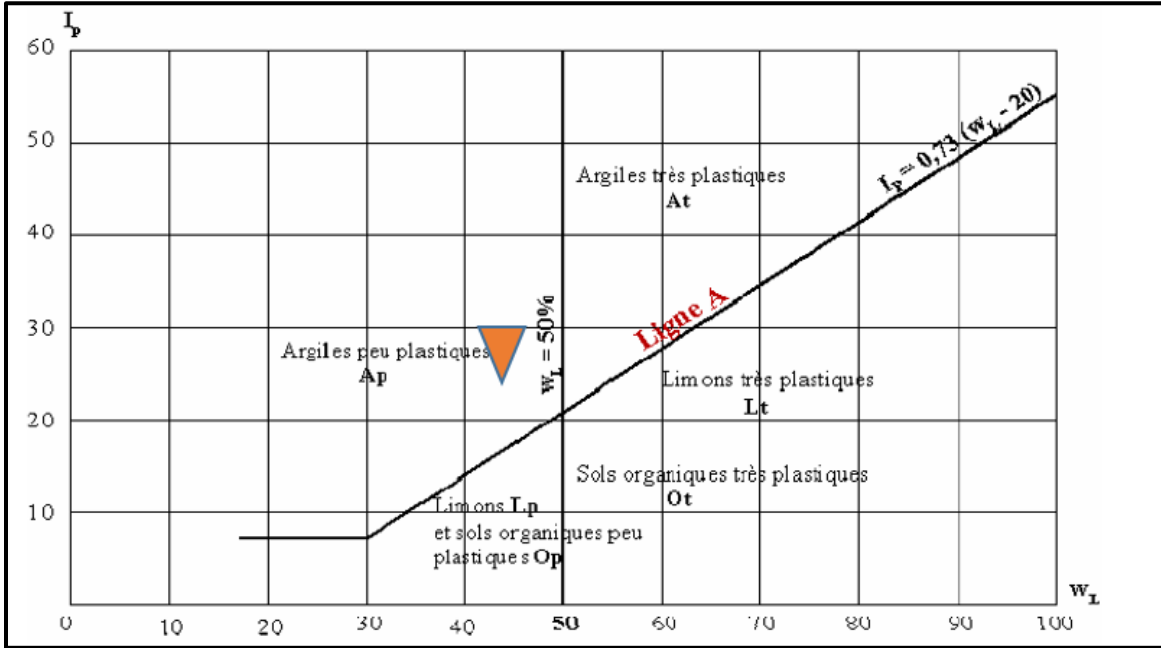


Figure (III.9): Classification des sols fin, diagramme de plasticité (abaque de Casa grande)

III.3.2 Caractéristique chimique

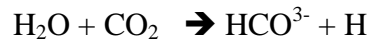
III.3.2.1 Dosage des carbonates CaCO_3 (NF ISO 10693)

La calcimétrie est la mesure du pourcentage de CaCO_3 dans une roche, un sédiment, un sol...l'appareil de mesure la plus fréquemment utilisée est la calcimètre de Bernard.

Le dosage du carbonate de calcium est basé sur l'attaque par l'acide chlorhydrique (HCL) dilué d'un échantillon d'une masse donnée à pression et température standard. On mesure le volume de CO_2 dans un tube manométrique après attaque de la roche après attaque de l'échantillon à l'acide chlorhydrique (HCL) suivant la réaction suivante :



On utilise l'eau saturée en sel pour éviter la perte de CO_2 à partir leur réaction avec H_2O selon la réaction suivante :



Connaissant la masse de CaCO_3 et la masse de l'échantillon, pour calculer le pourcentage de CaCO_3 dans l'échantillon. En prend une quantité de l'échantillon à une masse égale 0,4 g. Le résultant trouve montre que le sol contient 28,34 % de CaCO_3 et d'après le tableau (III.4) il peut être classé comme sol argileux –calcaire

Tableau (III.4) : Teneur en CaCO_3 de quelques sols

CaCO ₃ (%)	Dénomination
0-10	Argile ou limon.
10-30	Argile calcaire.
30-70	Marne.
70-90	Calcaire argileux

III.3.2.2 La conductivité électrique (NF X 31- 113)

La conductivité électrique du sol est essentiellement liée à la quantité des ions dans l'eau interstitielle, de leur charge et de leur mobilité électrique. La conductivité est une mesure qui donne une indication approximative de la concentration des ions solubles présents dans l'échantillon. On s'appuie sur la norme (NF X 31-113) pour sa détermination le rapport entre la masse de l'échantillon sec et la masse d'eau est égal à 1/5. La mesure est assurée par un conductimètre multi-gammes de modèles (Hanna - HI 8733). Le mélange est agité pendant 30 minutes et après filtration, on mesure la conductivité de la solution. On note alors la conductivité de sol égale 3.5 dS.cm, ce qui correspond à un sol faiblement salin.



Figure (III.10) Essai de la conductivité de sol

III.3.2.3 Mesure de la surface spécifique par l'essai d'absorption de bleu de méthylène (NF P94-068)

La surface spécifique totale d'un sol est déduite de l'essai au bleu de méthylène. Cette surface spécifique est liée directement à la quantité de bleu de méthylène absorbée par la fraction argileuse. Elle est donnée par la formule de (Tran, 1977). D'après les résultats le sol se classe dans la catégorie des sols sablo limoneux, sensible à l'eau.

$$SST = 20,93 \times V_{cc} \times 1/P_s \quad (III.9)$$

SST : surface spécifique totale (m²/g)

V_{cc} : volume de bleu de méthylène utilisé (cm³)

P_s : masse de matériau sec (g)

20,93 : surface correspondant à 1 cm² de bleu de méthylène.

Tableau (III.5) : Résultats de l'essai de bleu méthylène

Paramètres	Sol Bordjia (El hassian)
Valeur du bleu VBS (%)	0,4
Surface spécifique totale SST (m ² /g)	83,72

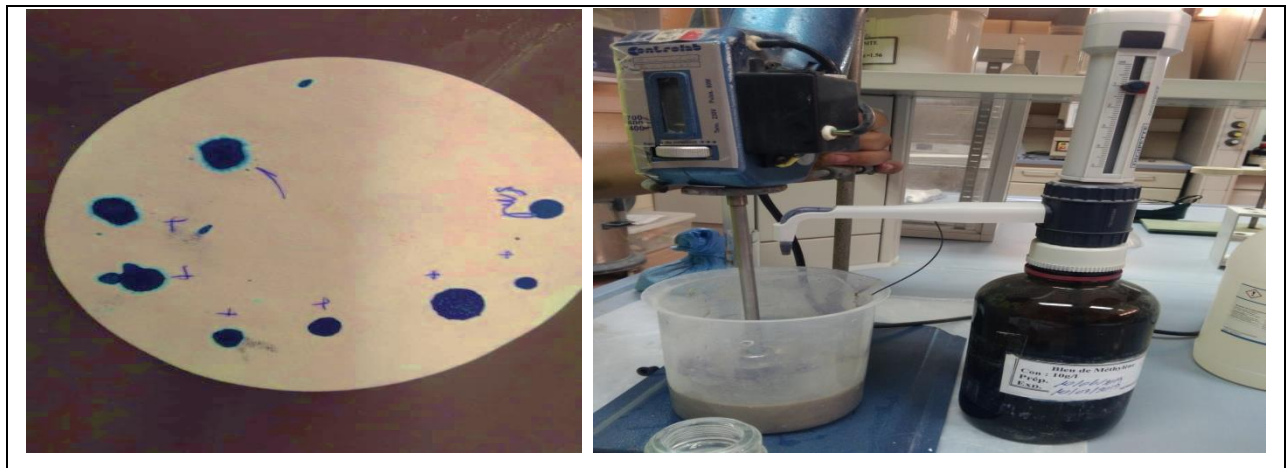


Figure (III.11) Essai de bleu méthylène

Tableau (III.6) : Classement des sols en fonction du VBS

Valeur de bleu de méthylène (V_{BS})	Catégorie de sol
$V_{BS} < 0,1$	Sol insensible à l'eau
$0,2 \leq V_{BS} < 1,5$	Sol sablo limoneux, sensible à l'eau
$1,5 \leq V_{BS} < 2,5$	Sol sablo argileux, peu plastiques
$2,5 \leq V_{BS} < 6$	Sol limoneux de plasticité moyenne.
$6 \leq V_{BS} < 8$	Sol argileux.
$V_{BS} > 8$	Sol très argileux.

III.3.2.4 La teneur en matière organique (NF EN 12879-2000)

La teneur en matière organique des échantillons prélevés à BORDJIA est mesurée selon la norme (NF EN 12879-2000). Dans cet essai, la matière organique est mesurée suite à la perte au feu de la masse sèche. Nous prenons un creuset vide, sec et propre et nous notons son poids (M_a). Par la suite, nous introduisons une prise d'essai et nous notons son poids (M_b). Ensuite, la prise d'essai et le creuset sont mis dans un four à une température de 550 ± 25 °C pendant 6 heures, comme le montre la Figure (III.12). Après, nous mettons la prise d'essai dans un dessiccateur à une température pour qu'elle refroidisse et nous notons le nouveau poids (M_c). Le calcul de la matière organique se fait selon l'équation suivante :

$$M.O. (\%) = (M_b - M_c) / (M_b - M_a) \times 100 \quad (III.10)$$

Le résultat trouvé d'une moyenne de 4,3 % (Tableau III.7) indique que le sol est classé dans la catégorie des sols faiblement organiques.

Tableau (III.7) Les différents types de sols en fonctions de la teneur en matières organiques

Teneur en matière organique	Type de sol
M.O. <3	Argile ou limon
$3 \leq M.O. < 10$	Sols faiblement organiques
$10 \leq M.O. < 30$	Sols moyennement organiques
M.O. ≥ 30	Sols très organiques



Figure (III.12) : Essai de la matière organique

III.3.2.4 Potentiel hydrogène pH :(NF X 31-103. (Kribi. S, 2005)

Le pH est une donnée essentielle se fait le plus fréquemment dans une suspension aqueuse. Pour effectuer ce test il faut prendre une quantité de (10 g) d'échantillon dans un bêcher, puis on ajoute 25ml d'eau distillée, on agite ensuite avec un agitateur magnétique pendant 60 min dans une pièce dont la température ambiante est de $20 \pm 2^{\circ}\text{C}$. Cela permet de mettre en suspension la totalité de l'échantillon et d'obtenir ainsi un équilibre entre la phase solide et la phase liquide. La suspension est ensuite laissée au repos 2 heures à l'air libre puis: On mesure le pH de la suspension. Cette mesure est décrite par la norme NF X 31-103. (Kribi. S, 2005)



Figure (III.13) : Mesure le pH

Tableau (III.8) : Propriétés physiques du sol étudié

Propriétés	Symbole	Unité	Valeur
Limite de liquidité (NF P94-051)	W _L	%	46,15
Limite de plasticité (NF P94-051)	W _p	%	24,03
Indice de plasticité (NF P94-051)	I _p	%	22,12
Valeur du bleu méthylène	VBS	%	0,4
Surface spécifique total (m ² /g)	SST	%	83,72
Conductivité électrique (état normale)	CE	ds/cm	3.5
Matière organique (NF EN 12879-2000)	MO	%	4,3
Potentiel hydrogène	pH		6,10

III.3.2.5 Composition chimique du sol de Bordjia

L'analyse chimique élémentaire (Fluorescence X) des matériaux utilisés a été réalisée au Laboratoire Lafarge de Sig. Dans le tableau (III.9), les résultats indiquent que les constituants prédominants sont la Silice, l'Aluminium et la chaux. A partir de ces résultats, il est constaté qu'un pourcentage important de silice suggère la présence de quartz d'une part, additionné à l'alumine suggère il la présence des minéraux argileux tel que la kaolinite, néanmoins le manganèse témoigne de la présence soit de l'illite, muscovite et même du chlorite, d'autre part le carbonate est indice de la calcite confirmé par l'essai du Calcimètre.

Tableau(III.9) : Composition chimique du sol étudié

Constituants	pourcentage (%)
SiO ₂	39,5
Al ₂ O ₃	13,014
Fe ₂ O ₃	4,955
CaO	15,258
Na ₂ O	0,831
K ₂ O	1,342
MgO	2,044
SO ₃	0,153
PAF	20,68
Fcoa	0,068
Cl ⁻	0,38

III.4 Conclusion

La région étudiée Bordjia a montré un climat hostile classé comme étant « Méditerranéen à semi-Aride » avec une faible pluviométrie en hiver, accompagné avec de forte chaleur durant l'été. Les échantillons du sol de cette région sont classés de nature sableux – limoneux peut plastique. Malgré que l'analyse chimique suggère la présence de plusieurs type d'argile, la surface septique trouvée indique bien que ces argile ne peuvent être que de la kaolinite ou l'illite . Le résultat trouvé MO d'une moyenne de 4,3 % indique que le sol est faiblement organique. Par contre la valeur de la conductivité électrique mesurée par la méthode de sol dilué montre que le sol est faiblement salin. (Aubert g, 1976).

Chapitre IV : Variation de la teneur en eau du sol en fonction de la résistivité après le traitement électrocinétique

IV.1 Introduction

Il existe plusieurs méthodes de traitement des sols, notre choix c'est porté sur la méthode électrique comme processus d'amélioration, car il le plus utilisé, particulièrement dans les sols à faible perméabilité (Bahemmat et al, 2016; Ji et al, 2016; Shin et al, 2016). Le principe de base du traitement électrocinétique est de permettre le déplacement de différentes espèces chimiques dans le sol sous un champ électrique entre deux électrodes (Hassan et al, 2015). Dans cette partie du travail, le traitement électrocinétique a été appliqué sur un échantillon de sol identifié comme sol limoneux saturé avec de l'eau distillée.

IV.2 Protocole expérimental

IV.2.1 Préparation des échantillons

L'étude a été basée sur un mélange de 12,5 Kg de sol avec 6.2 L de l'eau distillée jusqu'à l'obtention d'une teneur en eau de 5% de la limite de liquidité (Estabragh, 2014).

L'échantillon a été mélangé manuellement pour une durée d'une heure, puis laissé au repos pendant une à deux heures afin d'assurer une bonne homogénéité du sol.

IV.2.2 Dispositif expérimental

L'essai de laboratoire sur le traitement électrocinétique de l'échantillon de sol a été réalisé dans la même cellule utilisée pour la mesure de la conductivité électrique. Le compartiment central de 45 cm de longueur, 14 cm de largeur et 18 cm d'hauteur réservé pour l'échantillon de sol est séparé des compartiments cathodique et anodique de 5 cm de longueur, par deux plaques en trouées, couvertes par un tissu géo synthétique ; et ce afin d'assurer l'écoulement de l'eau sans déplacement des particules du sol. Pour éliminer les bulles d'air, l'échantillon a été compacté manuellement dans le compartiment central de la cellule en trois couches d'épaisseur 6 cm chacune à l'aide d'une petite dame.

L'injection du courant électrique a été assurée en utilisant un générateur électrique à courant continu. En outre le choix de type d'électrodes s'est porté sur des électrodes en cuivre pour leur disponibilité d'une part et sont à faible coût d'autre part, sachant que l'utilisation de matériaux précieux n'est pas pratique pour leur prix onéreux. Il est à noter que les conducteurs non métalliques se sont révélés très médiocres présentant une plus grande perte de puissance à l'interface électrode-sol que les électrodes en acier et en cuivre (Mohamed elhassan et Shang, 2001).

Deux tubes vides en cuivre ont été placés dans les extrémités du compartiment central comme électrodes. Des boulons en inox inoxydable ont été utilisés à l'intérieur de la cellule comme des électrodes de mesures. Les mesures ont été effectuées par la liaison de ces boulons avec une carte d'acquisition de données programmable (Arduino Mega 2560) en effectuant un montage électronique réalisé au niveau du laboratoire, ce qui nous a permis de mesurer automatiquement le courant et le potentiel électrique au court du temps (figure IV.1).

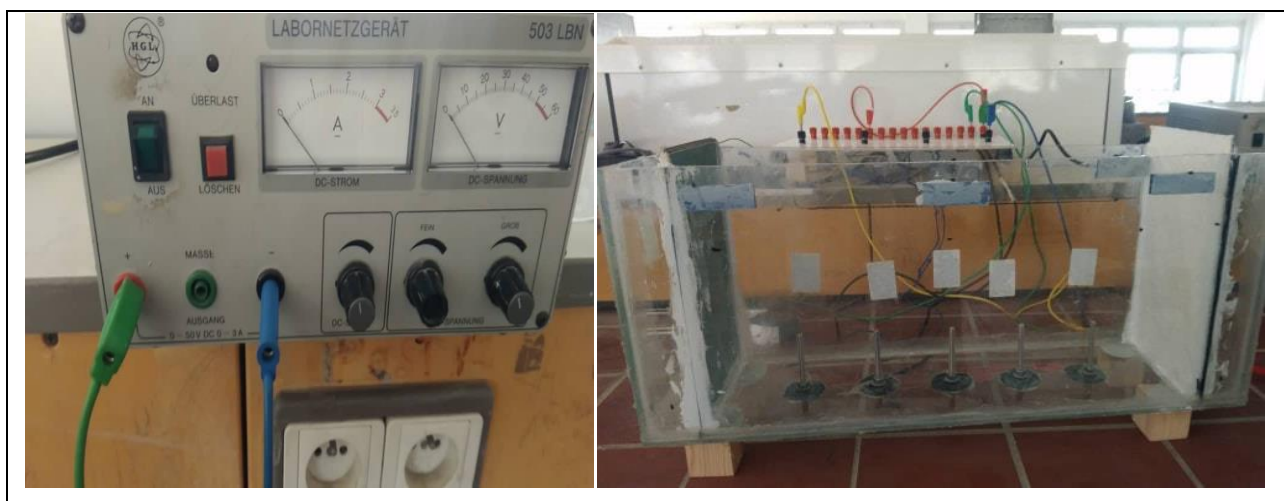


Figure (IV.1) : Modèle du dispositif expérimental

IV.2.3. Procédure du traitement électrocinétique

La méthode électrocinétique a été réalisée en injectant un courant de 25 volts sur d échantillon de sol saturée avec de l'eau distillée, durant 96 heures. Le courant électrique injecté assure un écoulement d'eau qui suit une direction de l'anode vers la cathode. Les électrodes de mesure ont pour but de déterminer la variation de la tension appliquée au court d'un traitement électrocinétique, provoqué par la circulation des molécules d'eau dans le sol. La technique électrocinétique nous a permis la mesure de la variation de la conductivité électrique avec les paramètres géotechniques du sol. La figure (IV.2) représente un schéma descriptif du dispositif expérimental, afin de définir la procédure du traitement électrocinétique et la direction de l'écoulement d'eau après injection d'un courant électrique continu.

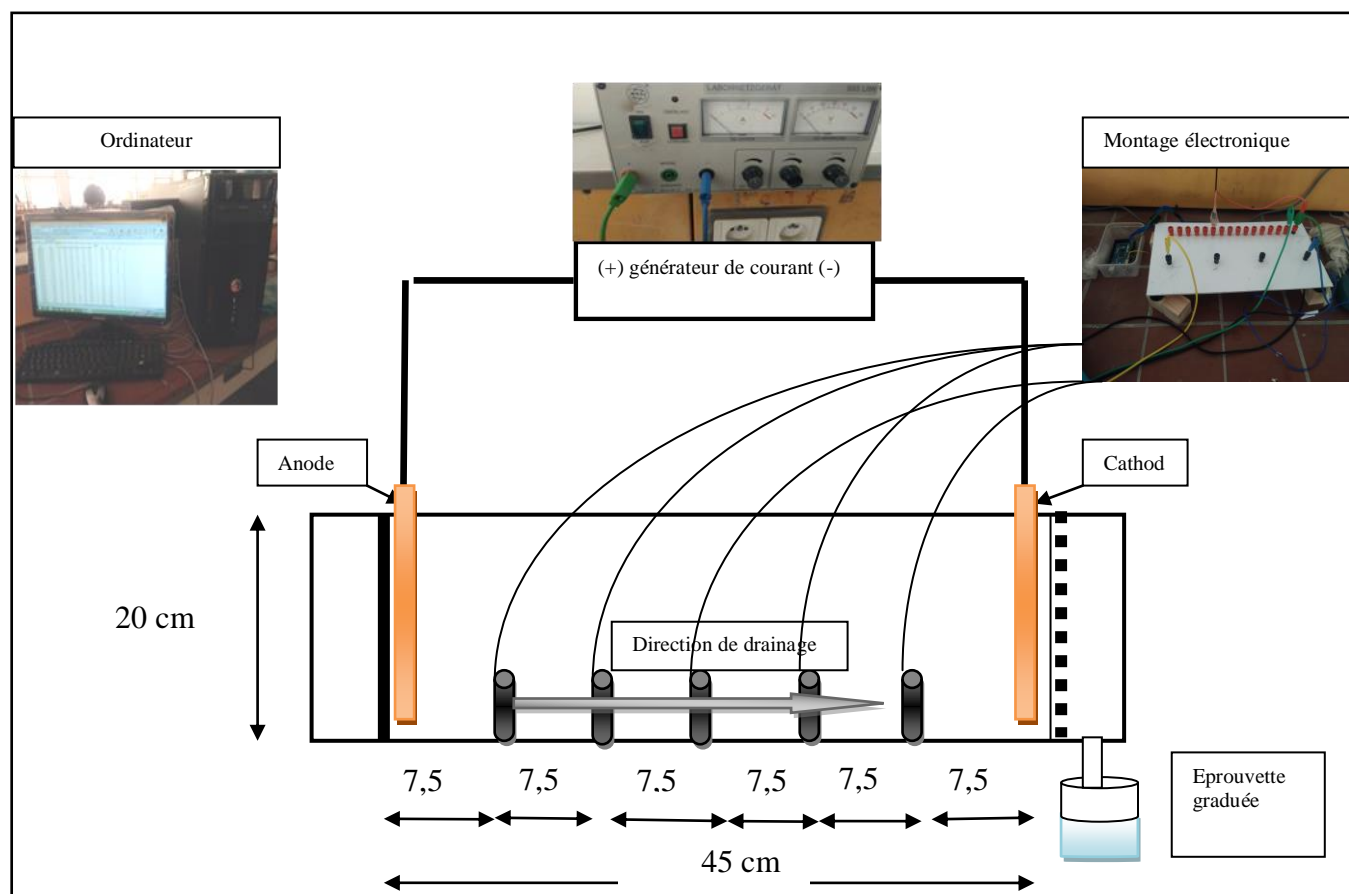


Figure (IV.2) : Schéma descriptif du dispositif de traitement électrocinétique

IV.3 Mesure des propriétés physiques du sol

L'application du courant continu dans les électrodes extérieures, nous a permis de mesurer l'intensité du courant durant toute la période d'essai, et par la suite de calculer la résistivité électrique conformément à la configuration de la méthode Wenner (BS 1377-3). La valeur de la résistivité électrique a été calculée à l'aide de l'équation de chapitre (II.1,2).

IV.4 Variation des paramètres physiques à la fin du traitement électrocinétique

IV.4.1. Variation de la plasticité et la teneur en eau

À la fin du traitement électrique, des échantillons de sol ont été extraits à différentes profondeurs et au niveau des électrodes de mesure le long du bac, pour déterminer la teneur en eau de chaque point. Les résultats obtenus montrent que cette variation diffère, avec des régions sèches près de l'anode et des régions relativement humides au niveau de la cathode affichant des valeurs allant de 43,75 % à 49,25 % .(histogramme)

Ce phénomène s'explique par le fait que l'injection de courant au sein de la matrice du sol ; induit un écoulement électroosmotique, la migration de l'eau interstitielle cause une variation de sa teneur à différents endroits du sol. Cet écoulement suit le déplacement du courant de l'anode vers la cathode.

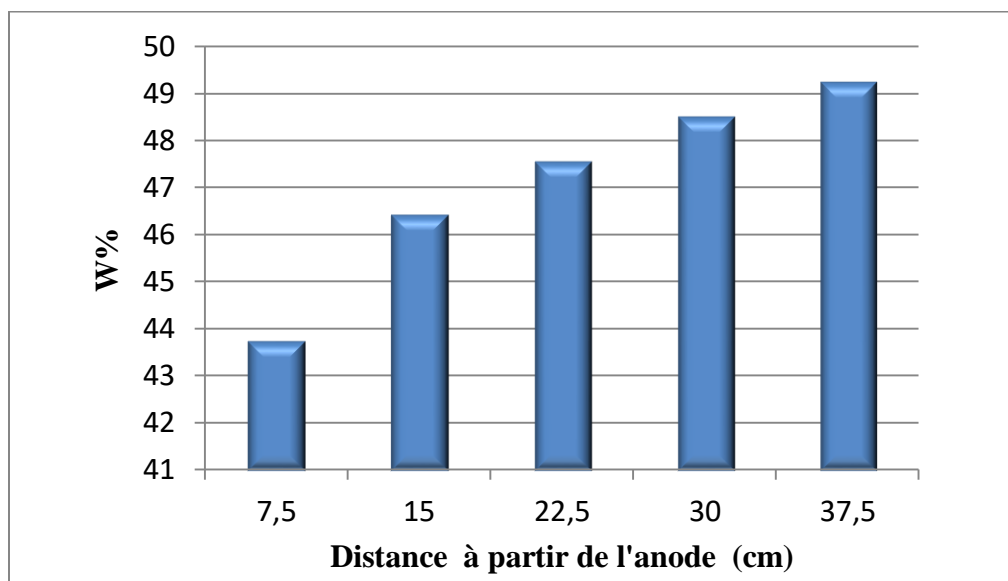


Figure (IV.3) : Histogramme de variation de teneur en eau

IV.4.2. Variations de l'écoulement électroosmotique

Le mouvement de l'eau sous l'application d'un gradient électrique est dénommé l'écoulement électroosmotique. La Figure (IV.4), montre la variation de l'écoulement électroosmotique au cours du processus électrocinétique. Il est à remarquer que le débit d'eau récupérée en sortie de cathode augmente dans un premier temps, puis il diminue de manière significative à un stade ultérieur du traitement, avec une direction du flux électroosmotique allant de l'anode vers la cathode. La valeur maximale de l'écoulement électroosmotique à la fin de l'essai est mesurée à 360 ml. Ce phénomène est dû à au mouvement d'espèces ioniques avec la tension appliquée, ce qui tend à augmenter l'intensité du courant électrique à travers le sol, et par conséquent le débit électroosmotique. Néanmoins, la figure (IV.4) représentée par l'historgramme, montre que le débit du flux électroosmotique diminue avec le temps. Un tel comportement est lié à la diminution de la concentration ionique en raison de la migration et au transport des espèces chimiques via l'électroosmose. En effet Les ions qui migrent vers les électrodes participent donc par électromigration au transfert du fluide interstitiel vers la cathode, en transférant leur énergie cinétique aux molécules neutres d'eau, et le débit global donc lié à la quantité totale d'ions migrant vers l'une ou l'autre des électrodes (AMMAMI, 2013).

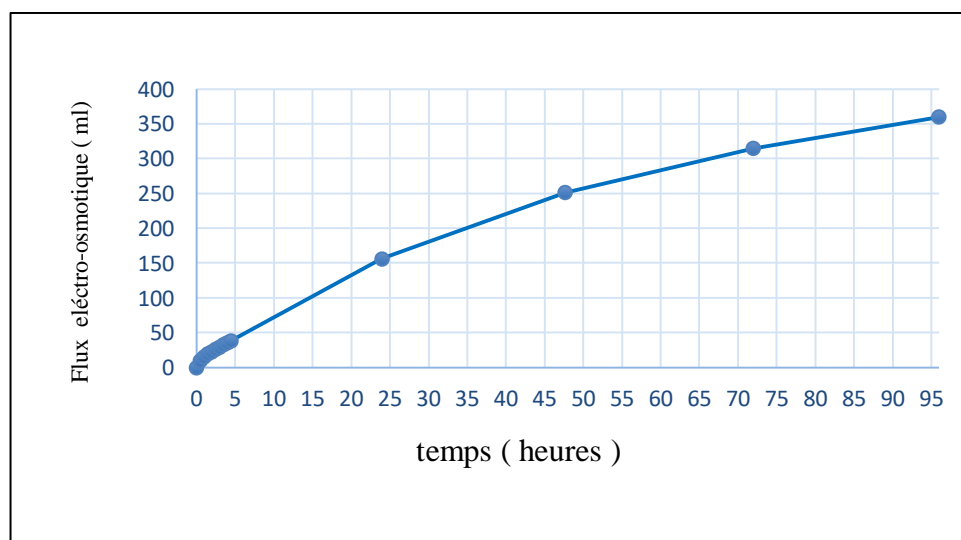


Figure (IV.4): courbe d'évolution du flux électroosmotique au cours du temps

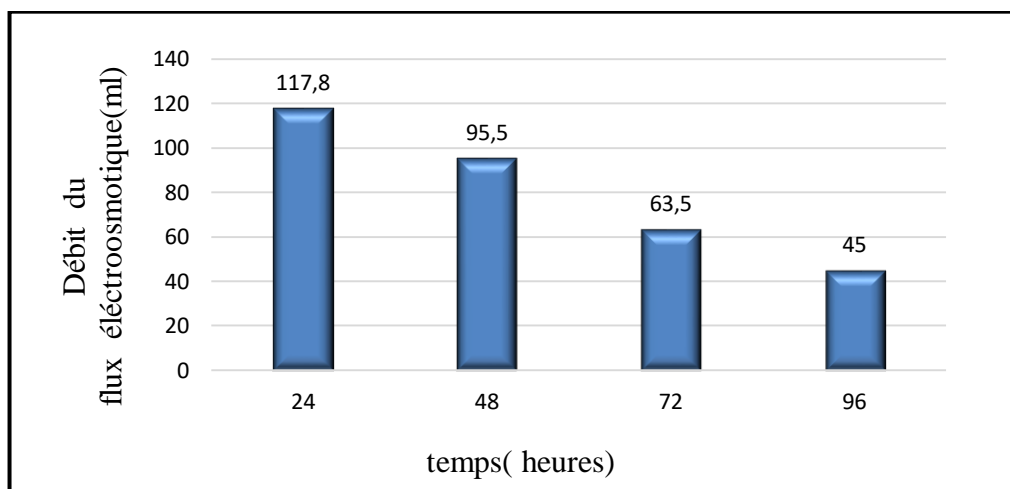


Figure (IV.5) : histogramme de variation du débit flux électroosmotique

IV.4.3 Variation de la résistivité électrique du sol

La résistivité a été calculée à la fin du processus de traitement, pour chaque lecture de courant au niveau des électrodes de mesure ; la figure (IV.6) représente la variation de cette résistivité en fonction des teneurs en eau. On constate nettement la diminution de la résistivité électrique du sol avec l'augmentation de la teneur en eau, hypothèse émise aussi par (Bai et al, 2013), jusqu'à atteindre une valeur de 6,45 $\Omega.m$ pour une teneur en eau de 49,25 %.

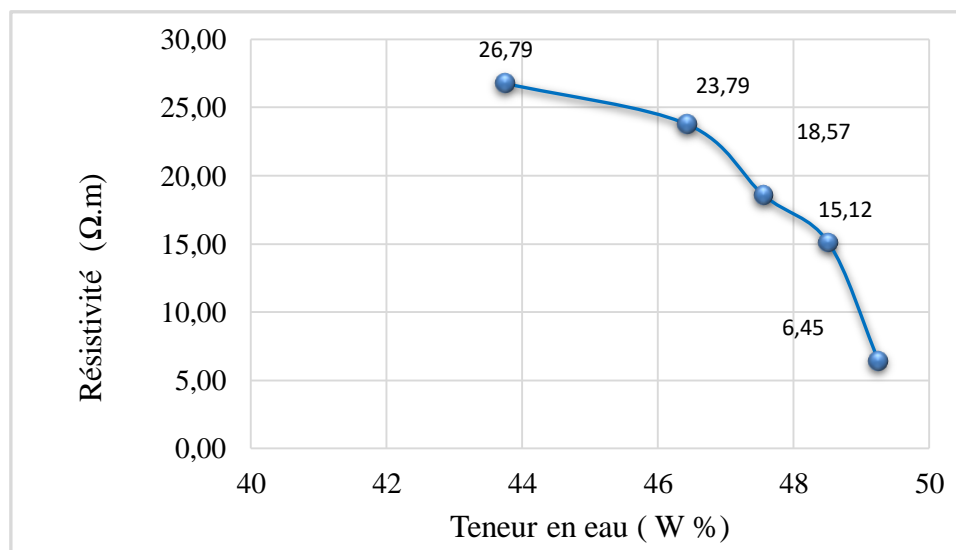


Figure (IV.6): Relation entre la résistivité et la teneur en eau

IV.4.3 Variation de la conductivité électrique du sol

La conductivité électrique au sein du sol a également varié considérablement après le traitement électrocinétique, comme le montre la Figure (IV.7), elle est représentée en fonction de la teneur en eau. Au premier temps du traitement, il y a eu une augmentation de sa valeur, comparée à la valeur initiale propre du sol par la méthode du sol saturé (3,4 dS.cm). La contribution de l'effet d'un champ électrique conduit à une augmentation de la conductivité électrique. Cette augmentation est due à l'enrichissement du sol par la solution interstitielle chargée en ions.

L'augmentation de la conductivité électrique peut être le résultat de l'accumulation d'ions dissous, du côté cathodique. Comme expliqué ci-dessus, la diminution du pH à l'anode crée un front acide, qui se déplace de l'anode à la cathode. Lorsque le front acide se déplace de l'anode à la cathode, les ions H^+ s'échangent avec les cations adsorbés autour des particules d'argile.

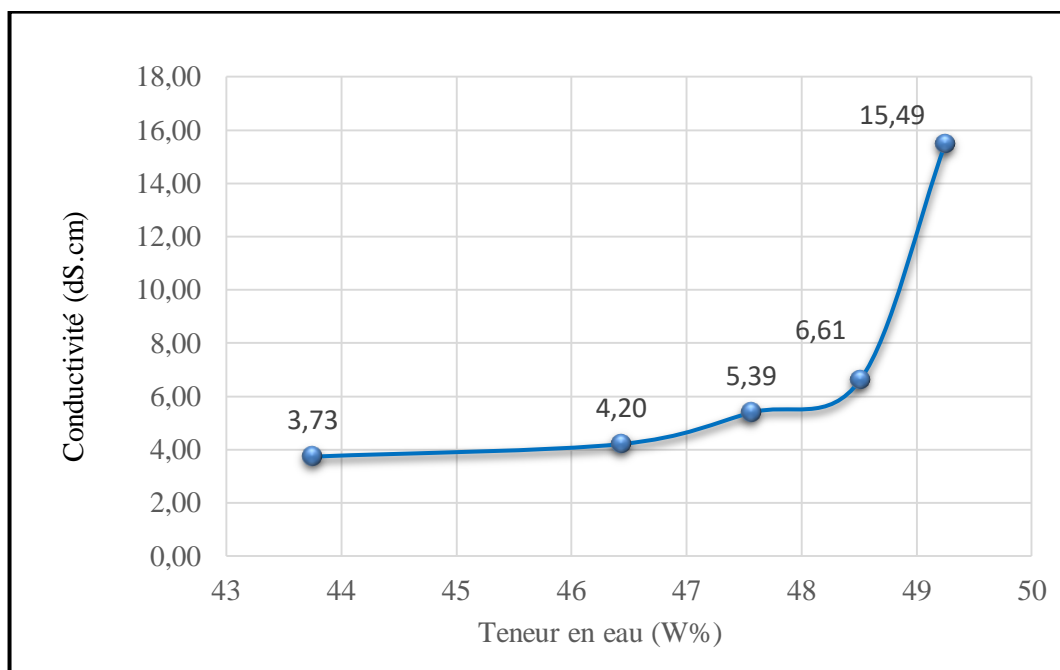


Figure (IV.7) : Courbe de relation entre la conductivité et la teneur en eau

Il a été constaté que l'électrode (anode) a subi une corrosion à la fin d'essai après soit 5 jours, Ce phénomène est du généralement aux réactions d'électrolyse.



Figure (IV.8) : corrosion de l'électrode à la fin d'essai

IV.5 Conclusion

Ce chapitre présente les résultats des essais expérimentaux pour la caractérisation des sols en déterminant leurs paramètres lorsque le sol est traité avec la méthode électrique. Le sol a été étudié à l'état naturel. Cette recherche vise à déterminer l'influence de la teneur en eau, sur la résistivité électrique et la conductivité à la fin du traitement électrocinétique. L'étude est basée sur une injection de courant électrique de 25 volts. Les paramètres électriques ont été obtenus à l'aide d'un système d'acquisition de données automatique développé au laboratoire LCTPE. Sur la base de l'enquête expérimentale, les conclusions suivantes peuvent être tirées :

L'augmentation du courant appliqué génère un écoulement d'eau dans les échantillons de sols, donc une diminution de la teneur en eau.

Le débit d'eau récupérée en sortie de cathode augmente dans un premier temps, puis il diminue de manière significative à un stade ultérieur du traitement, avec une direction du flux électroosmotique allant de l'anode vers la cathode. La diminution de la résistivité électrique du sol avec l'augmentation de la teneur en eau.

L'augmentation de la conductivité électrique peut être le résultat de l'accumulation d'ions dissous, du côté cathodique.

Conclusion général

Dans le monde des techniques de mesure de la résistivité électrique se sont évoluées, appelées communément méthodes géophysiques, sachant que la résistivité est une grandeur inverse de la conductivité électrique, les méthodes de mesures développées pour la conductivité, sont appliquées directement in-situ, parmi ces technique on trouve : conductimètre électromagnétique, l'imagerie géo-radar. Toutes ces méthodes permettent de tracer une carte spatiale à grande échelle de la conductivité électrique du sol et par conséquent la résistivité.

En outre et pour mieux appréhender cette grandeur, des techniques à l'échelle de laboratoire se sont évoluées, facilitant ainsi la vérification des mesures trouvés in-situ et permettant la variation des paramètres l'affectant.

Un grand nombre de paramètres affectent la résistivité électrique des sols. La compréhension de la structure interne des sols et des différents facteurs les affectant, nous permet de comprendre comment la résistivité électrique va varier en fonction de la variation de l'un des paramètres. Pour cette étude le paramètre expérimenté est la teneur en eau d'un échantillon de sol soumis à un potentiel électrique.

L'étude a été effectuée en utilisant une cellule expérimentale développée au sein du laboratoire de recherche LCTPE. Le sol dans son état naturel, a été soumis à un traitement électrocinétique, avec un potentiel de 25Volts.

La première démarche de ce travail était consacrée à la caractérisation des différents paramètres physico-chimiques des échantillons de sol prélevés au niveau du site Bordjia

Dans de la deuxième étape, le sol a été soumis à un traitement électrocinétique. Ce processus est basé sur l'injection d'un courant électrique 25 volt sur des échantillons de sol naturels. Les paramètres électriques ont été obtenus à l'aide d'un système d'acquisition de données automatique développé dans notre laboratoire. Sur la base de l'enquête expérimentale, les conclusions suivantes peuvent être tirées :

- l'injection de courant au sein de la matrice du sol ; induit un écoulement électroosmotique dont le débit augmente avec l'intensité du courant et diminue avec sa diminution début. Un tel comportement est lié à la diminution de la concentration ionique en raison de la migration et au transport des espèces chimiques via l'électro-migration et l'électroosmose.

- Il existe une variation linéaire entre la résistivité électrique et la teneur en eau ; l'augmentation de la teneur en eau entraîne une diminution de la résistivité électrique.
- La conductivité électrique dans un milieu particulaire se produit par le mouvement des ions à travers l'eau des pores électrolytiques, elle augmente en fonction de la teneur en eau.

Cette technique de mesure a permis de déterminer l'effet direct de la variation de la teneur en eau sur les deux grandeurs physiques du sol.

Comme perspective, il est plus judicieux de faire varier le potentiel électrique, ou d'autres paramètres tels que la température.

Liste des symboles

n	Porosité
e	L'indice des vides
S_r	Le degré de saturation
$W\%$	La teneur en eau
S_{spe}	Surface spécifique
pH	Réaction chimique du sol
ρ	La résistivité
R	La résistance électrique
σ_w	Conductivité de la solution
φ	Angle de frottement interne
F	le facteur de formation
δ_h	Poids volumique du sol humide
p_h	Poids humide
V_t	Le volume total
δ_d	Poids volumique du sol sec
δ_s	Poids volumique solide
P_s	le poids sec
V_s	Le volume sec.
W_w	poids de l'eau
W_s	poids sec après étuvage
S_r	Degré de saturation
V_w	Le volume de l'eau
V_v	le volume total occupé par les vides.
D	Densité
$CaCO_3$	teneur en carbonate de calcium
SST	Surface spécifique totale
VCC	Volume de bleu de méthylène utilisé

VBS	Valeur du bleu
W _s	Poids de saturation
W _L	Limite de liquidité
W _p	Limite de plasticité
I _p	Indice de plasticité
MO	Matière organique
ζ	Potentiel zêta
σ (S.m ⁻¹)	Conductivité électrique
CE	Conductivité électrique
Ddl	Double couche diffuse
XRF	Diffractions des rayons X

Références bibliographiques

AMMAMI Mohamed Tahar : Contribution à l'étude des processus électrocinétiques appliqués aux sédiments de dragage, thèse de doctorat, 08/07/2013, Université du Havre,

AUBERT G., 1976 - Les sols sodiques en Afrique du Nord. Ann INA, vol. VI n° 1

Aude Locatelli, 2013 : Prévalence de pathogènes humains dans les sols français, effet des facteurs pédoclimatiques, biologiques et du mode d'utilisation des sols». Thèse de doctorat. De l'Université de Bourgogne.

Bahemmat, M., Farahbakhsh, M., Kianirad, M., (2016) «Humic substances-enhanced electroremediation of heavy metals contaminated soil». J Hazard Mater

Bai, W., Kong, L., Guo, A., (2013) «Effects of physical properties on electrical conductivity of compacted lateritic soil». J Rock Mech Geotech Eng

Besson, 2007: La fantasy. Paris, France: Klincksieck, L'ouvrage d'Anne Besson présente une revue des diverses problématiques entourant le genre imaginaire fantasy.

B N E D E R, 2015: rapport d'Etude de faisabilité technico économique de mise en valeur des terres par la concession : Périmètre Bordjia , Novembre 2015

Bryson, L.S., (2005) «Evaluation of geotechnical parameters using electrical resistivity measurements». Proc In Earthquake Engineering and Soil Dynamics,

Cai, J., Wei, W., Hu, X., Wood, D.A., (2017) «Electrical conductivity models in saturated porous media: A review». Earth-Sci Rev, 117, pp. 419-433.

Casagrande, A., (1948) « Classification and identification of soils ». Transactions A.S.C.E., 113, pp. 901-991.

Chapellier, D., (2000) «Cours online géophysique».

Cai, J., Wei, W., Hu, X., Wood, D.A., (2017) «Electrical conductivity models in saturated porous media: A review». Earth-Sci Rev.

Dobecki, T.L., Romig, P.R., (1985) «Geotechnical and groundwater geophysics». Geophysics, 50 (12), pp. 2621–2636.

Duchauffour, 1984: Abrégés de science, la terre, les eaux, l'atmosphère par le Bureau des longitudes. Coll. Encyclopédie scientifique de l'univers.

Estabragh, A.R., Bordbar, A.T., Ghaziani, F., Javadi, A.A., (2016) «Removal of MTBE from a clay soil using electrokinetic technique». Environ Technol.

Estabragh, A.R., Naseha, M., Javadi, A.A., (2014) «Improvement of clay soil by electroosmosis technique». Appl Clay Sci,

Hazreek, Z.A.M., Saiful, A.T.S., Aziman, M., Rosli, S., Wijeyesekera, D.C., Fauziah, A., (2015) «Integral analysis of laboratory and field electrical resistivity for soil density prediction». Proceedings of the 3rd International Conference on Applied Geophysics, Hong Kong.

Hassan, A.A., Toll, D.G., (2015) «Water content characteristics of mechanically compacted clay soil determined using the electrical resistivity method». Proceedings of the 16th European Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering,

Hassan, I., Mohamed elhassan, E., Yanful, E.K., (2015) «Solar powered electrokinetic remediation of Cu polluted soil using a novel anode configuration». Electrochimica Acta.

Hazreek, Z.A.M., Saiful, A.T.S., Aziman, M., Rosli, S., Wijeyesekera, D.C., Fauziah, A., (2015) «Integral analysis of laboratory and field electrical resistivity for soil density prediction». Proceedings of the 3rd International Conference on Applied Geophysics, Hong Kong.

Hillel, 1984: l'eau et le sol principe et processus physique. Cobaye, libraire-éditeur,

Helmholtz (1879) : le premier modèle de la double couche électronique,

Holtz, R.D., Kovacs, W.D., (1981) «An introduction to geotechnical engineering». Englewood Cliffs NJ, Prentice-Hall,

<http://geophysics.geoscienceworld.org>

<http://pubs.usgs.gov>

Loke ,1996 : rapide least-squares inversion of appzrent resistivity pseudosection by a quasi – newton methode.

Mc Neil, 1980 . Mac Neill, J.D., (1980) «Electrical conductivity of soils and rocks, Mississauga». Geonics Limited. Canada.

Mostafa, M., Anwar, M.B., Radwan, A., (2017) «Application of electrical resistivity measurement as quality control test for calcareous soil». HBRC Journal.

Munoz et Berga, 2005: Generalized impedance converter as a new sensor signal conditioning circuit, which have been widely used as controllable impedance in AC regime, especially in active filter synthesis

Revil, A., Cathles, L.M., Losh, S., Nunn, J.A., (1998) «Electrical conductivity in shaly sands with geophysical applications». *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*

Rhoades, 1976: Toward a general theory of plant antiherbivore chemistry.

Rinaldi, V.A., Cuestas, G.A., (2002) «Ohmic conductivity of a compacted silty clay». *J. Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*.

Santamarina, J.C., Klein, K.A., Fam, M.A., (2001) «Soil and Waves: Particulate material behavior, characterization and monitoring». John Wiley and Sons, NY.

Shainberg, I., (1992) «Chemical and mineralogical components of crusting. In Sumner, M. E. and Stewart, B. A. (ed) *Soil crusting, chemical and physical processes*». *Advances in Soil Science*, Lewis Publishers, Boca Raton.

Spitzer, K., Chouteau, M.A., (2003) «DC resistivity and IP borehole survey at the Casa Berardi gold mine in northwestern Quebec», *Geophysics*, 68 (2), pp. 453-463.

Suzuki, K., Higashi, S., (2001) «Groundwater flow after heavy rain in landsli desloped area from 2-D inversion of resistivity monitoring data». *Geophysics*

USS Casagrande, L., (1949) «Electro-Osmosis in Soils». In: *Géotechnique*,

Ussl, 1954: *Salinity Laboratory Diagnosis and Improvement of saline and alkaline soils*,

Servant, 1975: *Université des science et technique du langue doc; Montpellier, contribution à l'étude pédologique des terrains halmorphes; des sols salés.*

Liste des Normes

NF P 94-051 : (Mars 1993). Sols: Reconnaissance et essais – Détermination des limites d'Atterberg – Limite de liquidité à la coupelle – Limite de plasticité au rouleau.

NF P 94-057 : (Mai 1992). Sols: Reconnaissance et essais – Analyse granulométrique

NF P94-068 : (Novembre 1993). Sols: Ret essais - Détermination de la valeur de bleu de méthylène d'un sol par l'essai à la taché.

NF P94-054 : Détermination de poids volumique des grains solides

NF X 31-103 : Détermination de potentiel hydrogène (pH)

NF EN 12879-2000 : Détermination la teneur en matière organique

NF X 31- 113 : Détermination La conductivité électrique

NF ISO 10693 : Détermination le dosage des carbonates CaCO_3