



وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
جامعة عبد الحميد بن باديس مستغانم
Université Abdelhamid ben Badis de Mostaganem
كلية العلوم والتكنولوجيا
Faculté des Sciences et de la Technologie



Département de Génie Civil & Architecture

N° d'ordre : **M** /GCA/2019

MEMOIRE DE FIN D'ETUDE DE MASTER ACADEMIQUE

Filière : Travaux Publics

Spécialité : Voies et ouvrages d'art

Thème

Etude de Traitement électrocinétique des sols fins

Présenté par :

1. M^{lle} KASDI FATIMA ZOHRA
2. M^{lle} NADER IBTISSEM

Soutenu le 10/ 07/ 2019 devant le jury composé de :

Président : M^r BENDANI Karim

Examineur : M^r MISSOUM Hanifi

Encadreur : Mme LAREDJ Nadia

Année Universitaire : 2018 / 2019

Remerciements

Ce travail de mémoire a été effectué au sein du Laboratoire de l'Université de Mostaganem (LCTPE).

Nous adressons tout d'abord nos plus vifs remerciements à Madame N. LAREDJ, Professeur au département de Génie Civil de l'Université Abdelhamid Ibn Badis Mostaganem et encadreur de ce mémoire, pour ses encouragements et son aide pour l'aboutissement de ce travail. Nos remerciements aussi pour ses conseils, lectures et remarques judicieuses qui m'ont aidé lors de la rédaction de ce mémoire.

Nous remercions aussi vivement tous les membres du Jury de l'intérêt manifesté pour notre travail :

Monsieur H. MISSOUM, Professeur à l'Université Abdelhamid Ibn Badis de Mostaganem de m'avoir fait l'honneur de présider le jury de ce mémoire ainsi que Monsieur K. BENDANI, Professeur au département de Génie Civil de l'Université Abdelhamid Ibn Badis Mostaganem et examinateur de ce mémoire.

Nous souhaitons également remercier Mme Mostefa Fouzia pour l'aide et le soutien qu'elle m'a apporté au cours des essais expérimentaux.

Nous n'oublions pas de présenter nos vifs remerciements à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

Dédicaces

Avec une profonde gratitude, je dédie ce modeste travail de fin d'études à mes très chers parents pour les judicieux conseils et les sacrifices consentis.

Egalement, j'ai une pensée spéciale pour mes grands-parents paternels et maternels qui m'ont guidé grâce à leurs bienveillantes prières et leur écoute.

Je remercie sincèrement ma famille, plus particulièrement mon époux, mes chers frères et ma tendre sœur qui m'ont toujours épaulée.

Enfin, je n'oublie pas mes amis, les personnes qui m'ont aidée de près ou de loin. Leur soutien m'était précieux.

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail :

à tous ceux qui m'ont aidé, encouragé et donné la volonté pour continuer à terme le présent travail. Je

les porterai tous et pour toujours dans mon cœur,

à mes très chers parents, mon père, qui m'a soutenu et encouragé toute au long

de ma vie, je lui dis merci papa, ma mère, source de tendresse et d'amour,

l'extrême exemple de ma vie, je lui dis merci maman,

à ma très chère sœur Sihem et mon très cher frère mohamed,

, je lui souhaite le bonheur, à toute la famille kasdi et nader ,

à mes chers amis Amel, Nadira et Assil ,

à toute la promotion de Master «**Genie civil** ».

FATIMA

Table des Matières

Remerciements	i
Dédicace	ii
Résumé	iii
Summry	iv
Liste des symboles	vi
Liste des figures	viii
Liste des tableaux	xi
Introduction générale	02
Partie 1 : Étude bibliographique	03
Chapitre I : : Généralités sur les sols et leurs améliorations	05
I.1. Introduction	05
I.2. Le sol	05
I.2.1. Définition	05
I.2.2. caractéristique du sol	05
I.2.2.1. la texture	06
I.2.2.2. la structure	07
I.2.2.2.1.porosité	07
I.2.2.2.2 microporosité, méso porosité	08
I.2.3. Les argiles.....	08
I.2.3.1 Définition	08
I.2.3.2. les défirent type d'argiles	09
I.2.3.2.1. Kaolinite.....	10
I.2.3.2.2. Montmorillonite.....	10
I.2.3.2.3. Illite.....	10
I.2.4. les limons.....	10
I.2.5. les marne.....	10

I.3.principaux problèmes des sols instables	11
I.3.1. phénomène de gonflement.....	11
I.3.2. tassements.....	11
I.3.3. glissements.....	12
I.4. Technique d'amélioration des sols	12
I.4.1. méthodes mécaniques.....	12
a. Méthode de substitution	12
b. colonne ballastées.....	12
c. vibro compactage.....	13
d. compactage de la surface	14
e. compactage dynamique.....	14
I.4.2.méthode hydromécaniques.....	15
a. Technique de drainage	15
b. inclusions.....	16
c. précharchement ou pré compression.....	16
I.4.3. méthodes thermique.....	17
a. Déshydratation.....	17
b.Congélation	17
I.4.4.méthode chimique.....	17
a. Utilisation de la chaux.....	18
b. Utilisation du ciment.....	18
c. Utilisation des ajouts cimentaires.....	19
I. 4.2. Conclusion	20
Chapitre II : Salinisation des sols fins	
II.1.Introduction	21
II.2. Salinité des sols	21
III.3. facteur intervenants dans le processus de la salinisation	22
III.4. causes et conséquences de la salinité des sols	23
III.5. types de salinité	23
III.5.1. salinisation primaire (naturelle).....	23
III.5.2. salinisation secondaire.....	23
III.6. classification des sols affectés par la salinité.....	24

III.7. classification et caractéristique des sols salins.....	25
III.7.1. classification des sols salins.....	25
III.7.2. caractéristique des sols salins.....	26
III.7.2.1. sol salins.....	26
III.7.2.2. sol salins à alcalins.....	26
III.7.2.3. sol alcalins.....	26
III.8. salinisation des sols dans le monde et en Algérie.....	27
III.9. Remédiation des sols salins.....	28
III.10.1. drainage.....	28
III.10.2. lessivage.....	28
III.10.3. procédé électrocinétique.....	28
III.10. conclusion.....	29
Chapitre III : Amélioration des sols salins par la méthode électrocinétique	
III.1. Introduction.....	31
III.2. facteurs affectant le traitement électrocinétique.....	31
III.2.1. type de sols et teneur en eau.....	31
III.2.2. gradient de PH.....	32
III.2.3. densité du courant.....	33
III.2.4. configuration des électrodes.....	33
III.2.5. durée de traitement.....	34
III.2.6. coût de traitement.....	34
III.2.7.1. les avantages.....	34
III.2.7.2. les inconvénients.....	35
III.3. conclusion.....	35

Chapitre IV : Identification et caractérisation du sol étudié

IV.1.Introduction	37
IV.2. Localisation de la région étudiée	37
IV.3. Analyse du sol étudié	38
IV.4. La caractérisation géotechnique du sol étudié	39
IV.4.1. La teneur en eau (NF P 94-050).....	39
IV.4.2.Le poids volumique Des grains solides	40
IV.4.3.la masse volumique apparente.....	40
IV.4.4. Analyse granulométrique	41
IV.4.4.1.L'analyse granulométrique par tamisage.....	41
IV.4.4.2.L'analyse granulométrique par sédimentation.....	42
IV.4.5.Limites d'Atterberg.....	43
IV.4.5.1.Détermination de la limite de liquidité	44
IV.4.5.2 Détermination de la limite de plasticité	46
IV.4.5.3.Détermination de l'indice de plasticité	47
IV.4.6.Valeur de bleu de méthylène :Vbs (norme NF P 94-068).....	48
IV.4.7. Dosage des carbonates CaCO ₃ (NF ISO 10693)	49
CHAPITRE V : traitement électrocinétique	
V.1. Introduction.....	53
V.2 Protocole expérimental	53
V.2.1 Préparation des échantillons sans sels.....	53
V.2.2 Dispositif expérimental	54
V.2. 3. Evolution de l'intensité du courant électrique	55
V.2.4. Evolution du flux électro-osmotique.....	56
V.2.5 Préparation des échantillons avec sels.....	57
V.2.6. Effet de la durée de traitement sur la conductivité électrique.....	57
V.2.7.Mesure de la conductivité électrique des solutions NaCl en fonction des concentrations	58
V.3.CONCLUSION	59
Conclusion générale	61
Références bibliographiques	63

Liste des tableaux

Liste des tableaux

Chapitre I : généralités sur les sols et leurs améliorations

Tableau I.1 : Echelle granulométrique de la texture du sol (*U.S.D.A., 1996*).....6

Chapitre II : salinisation des sols fins

Tableau II.1 : Classification des sols affectés par les sels (USSL, 1954).....24

Tableau II.2 :Classe de la salinité en fonction de la conductivité électrique de l'extrait de saturation à 25 °C (Mathieu et Pieltain, 2003).....25

Tableau II.3 :Classe de salinité en fonction de la conductivité électrique de l'extrait aqueux à 25° C. (Mathieu et Pieltain, 2003)25

Chapitre IV : Identification et caractérisation du sol étudié

Tableau IV.2.Propriétés d'identification du sol Bordjia.....50

Liste des figures

Liste des figures

Chapitre I : généralité sur les sols et leur amélioration

Figure (I.1) : le triangle textural.....	6
Figure(I.2):porosité du sol (d'après GAUCHER).....	7
Figure (I.3): Argile naturelle (image MEB).....	9
Figure(I.4) : photographies au Microscope Electronique à Balayage des argiles (Mitchell9 & soga, 2005, huidi et al. 2006)	
Figure (I.5) : installation des colonnes ballastées.....	13
Figure (I.6) : densification du sol par vibroflottation.....	14
Figure (I.7): technique de compactage dynamique.....	15
Figure(I.8) : technique de drainage.....	16

Chapitre II : Salinisation des sols fins

Figure (II.1): Réparation des sols salins en Algérie (INSIDE ,2008)	27
---	----

Chapitre IV : Identification et caractérisation du sol étudié

Figure(IV.1) : Localisation du site Bordjia Mostaganem	
Figure (IV.2): Photo satellitaire de la zone d'étude Bordjia (Mostaganem	38
Figure(IV.3) : Broyeur.	38
Figure(IV.4) :Echantillons d'argile avant et après broyage.	39
Figure (IV.5) :Le séchage des échantillons du sol à l'étuve.	39
Figure (IV.6) :Détermination du poids volumique des grains solides	40
Figure (IV.7) :L'essai la masse volumique apparente	41
Figure (IV.8) : vibration manuelle	42
Figure (IV.9) : <i>Essai de Sédimentation</i>	42
Figure (IV.10): Courbe granulométrique	43
Figure(IV.11) : Etats de consistance.	43
Figure(IV.12) : Imbibition des échantillons.	44

Figure (IV.13) : réalisation de la rainure.	45
Figure (IV.14) : Fermeture de la rainure.	45
Figure(IV.15) :Confection du rouleau pour la détermination de la limite de plasticité.	46
Figure(IV.16) :Fissuration du rouleau.	47
Figure(IV.17) : Diagramme de plasticité (d'après Casagrande 1948).	47
Figure (IV.18) : La réalisation de l'essai au bleu de méthylène	48
Figure (IV.19) : L'essai au bleu de méthylène	49
Figure(IV.20) : <i>Dosage des carbonates</i>	50
CHAPITRE V : traitement électrocinétique	
Figure (V.1) : Le dispositif expérimental de la cellule électrochimique	54
Figure (V.2) : mesure du courant électrique et du flux.	55
Figure(V.3) : Variation de l'intensité du courant électrique avec le temps	55
Figure (V.4) : Evolution du volume électro-osmotique cumulé au cours du traitement électrocinétique	56
Figure (IV.5.) : La mesure de la conductivité électrique	57
Figure(V.6) : Variation de la conductivité électrique du sol en fonction de la durée de traitement	58
Figure(V.7) : Préparation des solutions salines de NaCl avec différentes concentrations	58
Figure(V.8) : Variation de la conductivité électrique en fonction de la concentration.	59

Liste des symboles

Liste des symboles

CaCO_3 (%)	Teneur en carbonate de calcium
IP (%)	Indice de plasticité
n	Porosité
Sr (%)	Degré de saturation
SST (m^2/g)	surface spécifique totale
T ($^\circ\text{C}$)	Température
VBS	Valeur du bleu
WL (%)	Limite de liquidité
W_p (%)	Limite de plasticité
γ_d (g/cm^3)	Poids volumique sec
γ_s (g/cm^3)	Poids volumique des grains solides
γ_w (g/cm^3)	Poids volumique de l'eau
σ ($\text{S}\cdot\text{m}^{-1}$)	Conductivité électrique
ω (%)	Teneur en eau

Introduction générale

Introduction générale

Le terme "sol" est utilisé en génie civil pour désigner un matériau constitué d'un agrégat naturel de particules minérales de dimensions comprises dans des limites prédéfinies.

les sols fins y compris les argiles, limons, marnes...etc. sont des sols d'assise pour un grand nombre de constructions dans le monde entier, dont il faut bien les prendre en charge lors de la conception des projets afin d'éviter certains dégâts.

Les sols argileux sont constitués de minéraux variés dont l'affinité à l'eau dépend de plusieurs paramètres, entre autre la structure minéralogique. Certains sols comportent une proportion de particules argileuses telles que les Illites et les Smectites, etc.

L'ingénieur est donc souvent confronté à des problématiques majeures lors l'étude des ouvrages construits sur ce genre des sols car souvent les campagnes de reconnaissances géotechniques ne prévoient pas la mesure de plusieurs paramètres attachés à certains phénomènes. Parmi les causes d'instabilité d'ouvrages les plus rencontrés dans le monde entier et l'Algérie en particulier,

Plusieurs techniques d'amélioration de sols, ont été utilisées dans le domaine de génie civil afin de résoudre les problèmes vécus. La chaux, le ciment, cendres volantes, les solutions salines, l'ajout de sable et les traitements par liants hydrauliques (chaux, ciment, cendres volantes, ...) les traitements organiques (bitumes, résines naturelles, polymères, ...) etc. le traitement mécanique et thermique.

La salinité des sols est l'un des aléas environnementaux les plus dévastateurs, entraînant une réduction importante des superficies cultivées, de la productivité et de la qualité des cultures (Shahbaz and Ashraf, 2013). La salinité des sols est l'un des aléas environnementaux les plus dévastateurs, entraînant une réduction importante des superficies cultivées, de la productivité et de la qualité des cultures (Shahbaz and Ashraf, 2013).

C'est à cause de la salinité que des dommages importants surviennent aussi, aux infrastructures de base, tels que les routes, les ponts, les voies ferrées, les bâtiments et les structures souterraines (Jayasekera, 2007).

Ce phénomène de la salinité est défini comme l'accumulation des sels dans le sol, qui présente souvent une conductivité électrique supérieure à 4dS/m et un pH inférieur à 8.5 (Abrol et al.,1988 ; Hamdan et al.,2014 ; Lukman et al.,2015).

Les sels généralement présents dans les sols salins comprennent les chlorures, les sulfates, le sodium, le potassium, le calcium et le magnésium.

Le mémoire est structuré en 2 parties : la première partie est consacrée à une synthèse bibliographique, composée de trois chapitres, dont le premier est lié à la généralité des sols fins et leur amélioration, le second est consacré la salinisation et le troisième chapitre amélioration des sols par la méthode électrocinétique. La deuxième partie traite de l'étude expérimentale composée aussi de deux chapitre qui décrivent les matériaux et méthodes utilisés, la description détaillée de la cellule de recherche utilisée dans cette étude, ainsi que les résultats et discussions sur l'influence de cette technique sur certains paramètres, tels que : le courant électrique, la conductivité électrique....ect. Comporte les résultats obtenus et leurs interprétations. Le mémoire est achevé par des conclusions et les références bibliographiques.

Chapitre I :

Généralités sur les sols et leurs améliorations

Chapitre I : Généralités sur les sols et leurs améliorations

I.1. Introduction

Selon le type de l'ouvrage et son mode de conception, le sol peut constituer une base d'appuis pour l'ensemble de l'ouvrage (route, tunnel, barrage poids) ou un point d'appuis pour quelques éléments seulement (bâtiment, pont, barrage en arc). Certains sols en raison de leurs propriétés géotechniques sont considérés comme des sols instables créant donc un handicap économique et technique pour les différentes parties impliquées dans ce domaine. Ces sols donc nécessitent une certaine amélioration pour augmenter leur stabilité mécanique et améliorer leur performance.

Dans ce chapitre on va décrire quelques techniques d'amélioration des sols qui sont actuellement utilisées et classées comme méthodes mécaniques, hydrodynamiques, thermiques et chimiques.

I.2. Le sol

I.2.1. Définition

Un sol est un complexe de trois éléments : grains solides, de l'eau et de l'air (ou du gaz). L'ensemble des grains solides forme le squelette du sol. Lorsque l'eau remplit les vides, il n'y a pas d'air et l'on dit que le sol est saturé. Dans le cas contraire l'eau se dépose par attraction capillaire en un film plus ou moins épais autour des grains solides.

I.2.2. caractéristiques du sol

Le sol comporte trois phases : une phase solide (qui est minérale et organique), une phase liquide ou solution du sol (qui correspond à l'eau et aux éléments dissous), et une phase gazeuse (composé principalement de l'oxygène, de méthane, de d'oxyde de carbone). Le sol est d'abord caractérisé par une texture et une structure qui va fortement conditionner ses propriétés physiques et chimiques, notamment celle liées à l'eau.

I.2.2.1. La texture

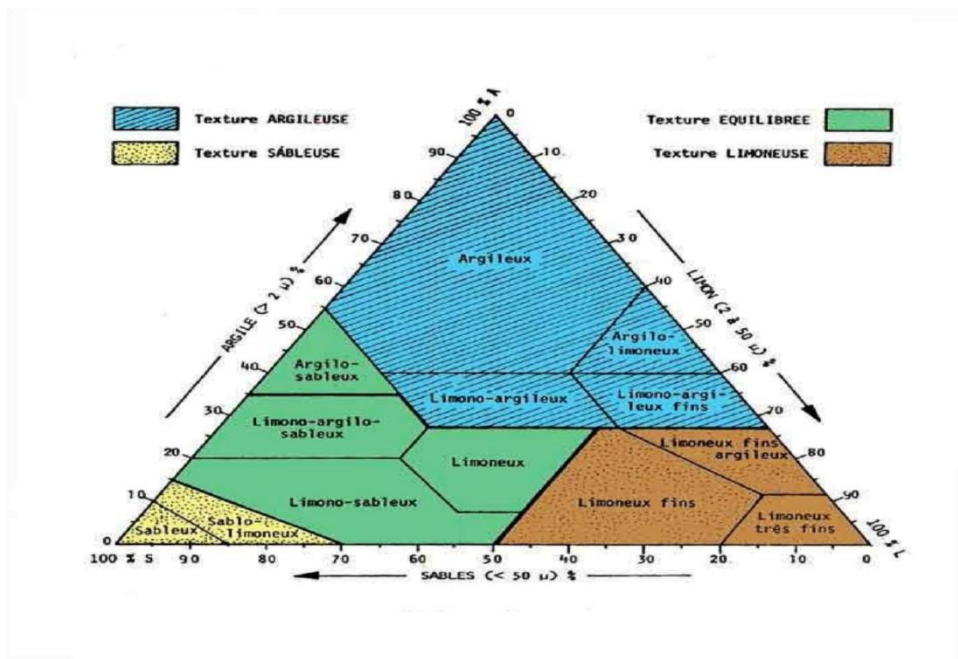
La texture du sol est caractérisée par la taille et la distribution des particules. La composition granulométrique du sol permet de déterminer sa texture. La composition s'exprime en pourcentage des trois principales fractions minérales 2 mm de diamètre. La texture du sol est une propriété constante dans le temps et peu variable spatialement (Baize et Jabiol, 1995).

Tableau I.1 : Echelle granulométrique de la texture du sol (U.S.D.A., 1996).

Terre fine					Terre grossière	
argile	Limons fins	Limons grossiers	Sable fins	Sable grossiers	Graviers	Cailloux
<2µm	2µm à 20 µm	20 µm à 50 µm	50µm a 200µm	200µm a 2mm	2mm a 20mm	>20 mm

Certains spécialistes, notamment agronomes et pédologues, savent déterminer approximativement, après humidification, si le sol est plutôt argileux, limoneux ou sableux. En effet, l'argile colle aux doigts au toucher, le limon est doux et le sable rugueux.

Pour déterminer plus finement la texture on évalue au laboratoire pour un échantillon de sol la teneur en sable, en argile et limon. Ensuite on utilise un diagramme qui permet de déterminer la classe texturale du sol figure(I.1).



Figure(I.1) : le triangle textural

I.2.2.2. la structure

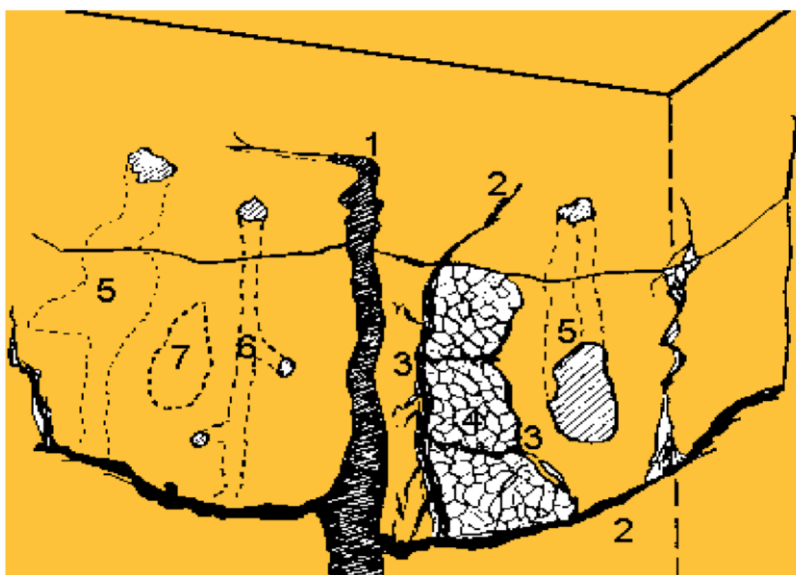
La structure du sol est déterminée par l'organisation des agrégats des éléments minéraux et organiques, qui donnent lieu à la matrice poreuse du sol, au sein de laquelle ont lieu les écoulements d'eau (*Carrillo-Avila, 1995*).

La structure résulte de processus biologiques, chimiques et physiques, est donc une propriété variable temporellement et spatialement, et peut changer avec la teneur en eau ou d'autres paramètres (*Oades, 1993*). Parmi les agrégats du sol, on peut distinguer les particules primaires libres (sable, limon ou argile), les micro-agrégats (diamètre < 250 µm) et les macros agrégats (diamètre > 250 µm).

Le mode d'assemblage des constituants du sol à un moment donné résulte une structure qui influe sur la fertilité du sol, elle peut conditionner la circulation de l'air et l'eau et l'enracinement dans les vides (porosité) qu'elle délimite.

I.2.2.2.1. Porosité

La teneur en eau est fonction de la porosité et de la perméabilité du sol. Le volume maximal d'eau qu'un sol peut retenir est la "*capacité au champ*" ou capacité de rétention du sol qui dépend essentiellement de la granulométrie du sol. Près de la surface, le sol n'est pas saturé, les espaces vides contiennent de l'eau et de l'air ; l'eau est soumise aux forces de gravité et de capillarité. A partir d'une certaine profondeur, la teneur en eau n'augmente plus.



Figure(I.2) : porosité du sol (*d'après GAUCHER*).

Légende:

- (1) grosse crevasse déterminant la structure.
- (2) crevasse de 2ème ordre délimitant les agrégats
- (3) fissures fines déterminant la sous-structure
- (4) canalicules de faible diamètre
- (5) grosse lacune traversant les agrégats
- (6) lacune tubulaire creusée par un lombric
- (7) lacune aveugle.

I.2.2.2. Microporosité, mésoporosité et macroporosité

On distingue trois classes de porosité : microporosité, mésoporosité et macroporosité. Selon les auteurs les définitions sont variables, ainsi *Luxmore (1981)* propose des diamètres équivalents de taille de pore inférieurs à 10 µm pour la microporosité, diamètres compris entre 10 et 1000 µm pour la mésoporosité et diamètres supérieurs à 1000 µm pour la macroporosité. D'autre, *Gil (2002)* propose des diamètres équivalents de taille de pore inférieurs à 0.2 µm pour la microporosité, diamètres compris entre 0.2 et 60 µm pour la mésoporosité et diamètres supérieurs à 60 µm pour la macroporosité. Ces différentes classes de porosité sont également caractérisées par une prépondérance variable des différents mécanismes de transfert.

Ainsi, les écoulements capillaires prédominent dans la microporosité tandis que les écoulements gravitaires et les écoulements en chenaux sont dominants respectivement dans la mésoporosité et dans la macroporosité.

I.2.3. Les argiles

I.2.3.1. Définition

L'argile est une roche sédimentaire composée pour une large part de minéraux argileux, en général des silicates d'aluminium plus ou moins hydratés provenant de la décomposition des feldspaths et des micas, leur formule chimique est de la forme $:(\text{SiO}_2)_M (\text{Al}_2 \text{O}_3)_N (\text{H}_2\text{O})$. Ils sont composés de particules de forme aplatie et de dimensions très petites (Inférieures à 2µm), ceci leur confère une très grande surface spécifique. Les nombreux minéraux argileux et groupes de minéraux argileux se différencient d'abord par l'empilement et le décalage de leurs feuillet élémentaires, ainsi que par la substitution des atomes isomorphes dans le réseau cristallin. Ainsi, dans les beidellites, les siliciums Si^{4+} sont partiellement substitués par des

aluminiums Al^{+3} et les aluminiums Al^{+3} par des magnésiums Mg^{+2} . La cohésion des couches élémentaires est assurée par les forces (assez faibles) de Van der Waals et des liaisons hydrogène dans le cas de la kaolinite.

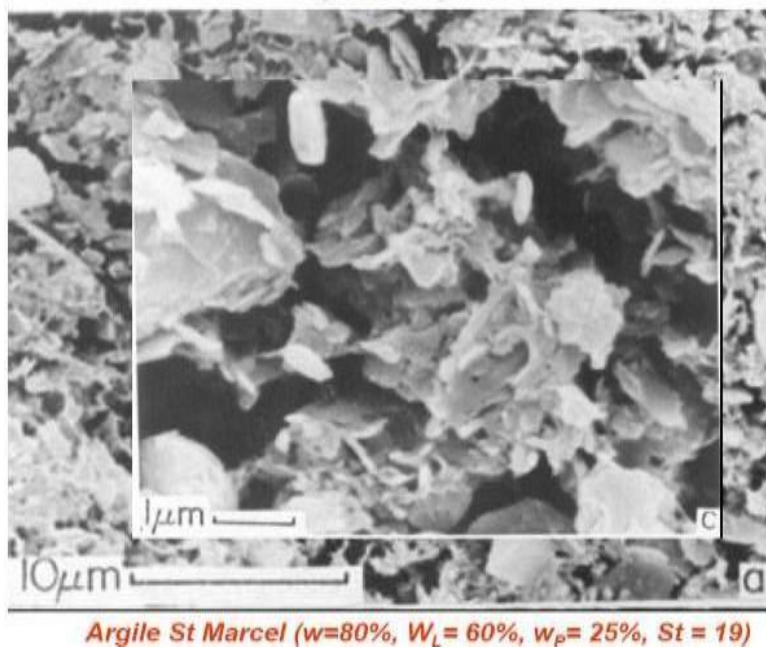


Figure (I.3) : Argile naturelle (image MEB)

I.2.3.2. Les différents types d'argiles

Les types d'argiles les plus fréquents sont : la kaolinite, la montmorillonite et l'illite figure(I.4).

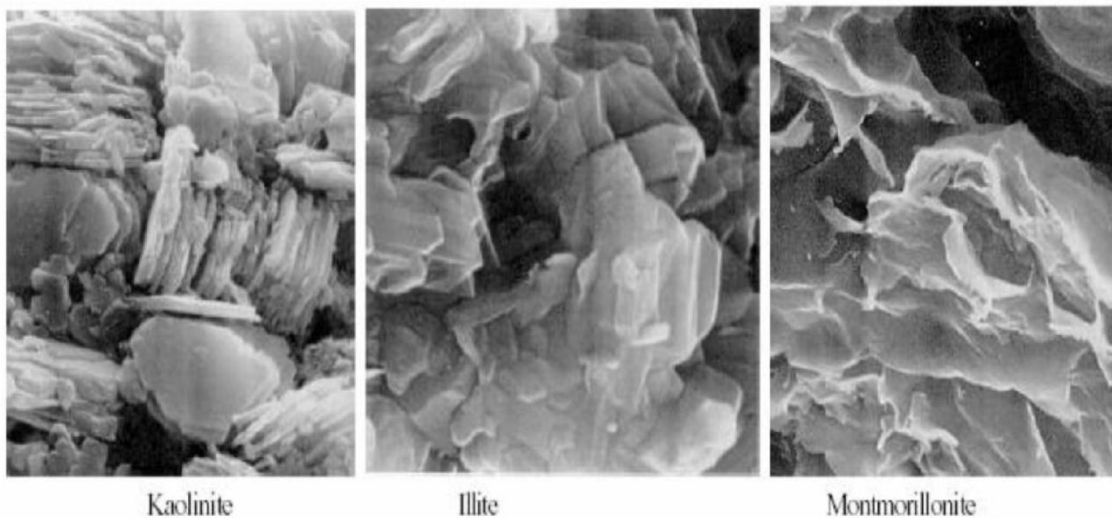


Figure (I.4) : Photographies au Microscope Electronique à Balayage des argiles (Mitchell & Soga, 2005).

I.2.3.2.1. 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.

I.2.3.2.2. Montmorillonite

La montmorillonite, parfois appelée Smectite, 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.

I.2.3.2.3. Illite

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.

I.2.4. Les limons

Les limons, constitués de silt, possèdent un squelette siliceux à silico 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.2.5. Les marnes

Roche tendre composée en proportions variables d'argile et de calcaire mêlés à du sable, qui a la propriété de se déliter et qui est utilisée selon sa composition pour l'amendement des terres,

la fabrication de ciments, de tuiles, de céramiques .On considère, selon leur composition, trois grandes catégories :

- 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 %.

Comme pour les argiles, les marnes argileuses présentent notamment l'inconvénient de craqueler sur une certaine profondeur en cas de sécheresse. D'une façon générale, les 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 déformation 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).

I.3. Principaux problèmes des sols instables

I.3.1. Phénomène de gonflement

Ce phénomène est lié au changement d'humidité de certains sols très argileux ou tourbeux qui sont capables de fixer l'eau disponible mais aussi de la perdre en se rétractant en cas de sécheresse.

Le retrait-gonflement est un mouvement de tassement différentiel du sol spécifique aux terrains argileux (les argiles sont gonflantes et varient en fonction de leur teneur en eau) ; la variation de volume d'un terrain est consécutive à l'alternance des périodes de sécheresse (déshydratation superficielle) et des périodes pluvieuses (réhydratation), et elle provoque des désordres dans les constructions (fissuration, décollement d'élément jointifs).

I.3.2. Tassements

Il s'agit de la diminution de volume de certains sols très compressibles (vases, tourbes, argiles) sous l'effet de charges appliquées et de l'abaissement du niveau des nappes aquifères par surexploitation.

I.3.3. Glissements

Ces mouvements, au sens large du terme, consistent en un déplacement plus ou moins continu d'un versant instable de montagne ou de colline. Le mouvement est engendré par l'action de la gravité, de forces extérieures (hydraulique ou sismiques) ou d'une modification des conditions aux limites. La masse de matériaux meubles ou rocheux fracturés se détache suivant une ou plusieurs surfaces de rupture par cisaillement qui correspondent souvent à des discontinuités préexistantes, visibles ou non, et de formes diverses.

I.4. Techniques d'amélioration des sols

Les techniques d'amélioration des sols consistent à modifier les caractéristiques d'un sol par une action physique (vibrations par exemple) ou par l'inclusion dans le sol ou le mélange au sol d'un matériau plus résistant, dans le but de :

- augmenter la capacité portante et/ou la résistance au cisaillement,
- diminuer les tassements, tant absolus que différentiels, et le cas échéant les accélérer,
- diminuer ou éliminer le risque de liquéfaction en cas de tremblement de terre ou de vibrations importantes

Les champs d'application des différentes techniques dépendent essentiellement de la nature et de la granulométrie des terrains que l'on désire améliorer.

Parmi les différentes techniques d'amélioration des sols on peut citer :

I.4.1. Méthodes mécaniques

a. Méthode de substitution

Il s'agit de remplacer le sol évolutif par un sol non évolutif.

b. Colonnes ballastées

La technique des colonnes ballastées est une extension de la vibroflottation aux terrains qui comportent des couches limoneuses ou argileuses dont les éléments ne peuvent être réarrangés par la vibration. Les colonnes ballastées permettent de traiter ces sols par incorporation de matériaux granulaires (couramment appelés ballast) compactés par passes remontantes. Ces colonnes peuvent être également cimentées ou constituées de mortier.

Elles servent également de drains et permettent une accélération du processus naturel de consolidation. En zone sismique, elles réduisent les risques de liquéfaction.

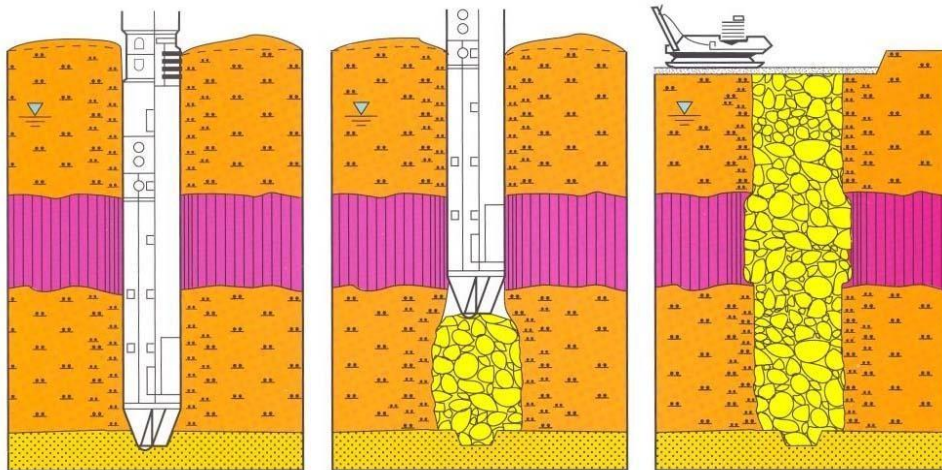


Figure (I.5) : installation des colonnes ballastées

c. Vibrocompactage

Le procédé de vibrocompactage, développé à la fin des années trente, permet décompacter localement ou dans la masse, les sols grenus sans cohésion (sables, graviers, cailloux) en place ou mis en remblai au-dessus ou en-dessous de la nappe et ceci jusqu'à des profondeurs maximum de plus de 50 m. C'est une technique d'amélioration des sols pulvérulents de type sablo-graveleux permettant de les densifier sous l'effet de la vibration. Ces vibrations, émises par l'outil, se propagent de grains en grains et provoquent un réarrangement optimal du volume initial occupé. La réduction de la porosité du matériau permet aussi d'augmenter sa capacité portante de manière significative.

Ce procédé de vibrocompactage est appelé aussi la vibroflotation. Cette méthode trouve son application dans les sols granulaires particulièrement les sables propres et les sables silteux avec une teneur en fines inférieure à 20%. Les vibrations engendrent un phénomène localisé de liquéfaction sous l'effet des surpressions interstitielles qui met les grains du sol dans un état liquéfié. Les grains se réarrangent en un état plus dense.

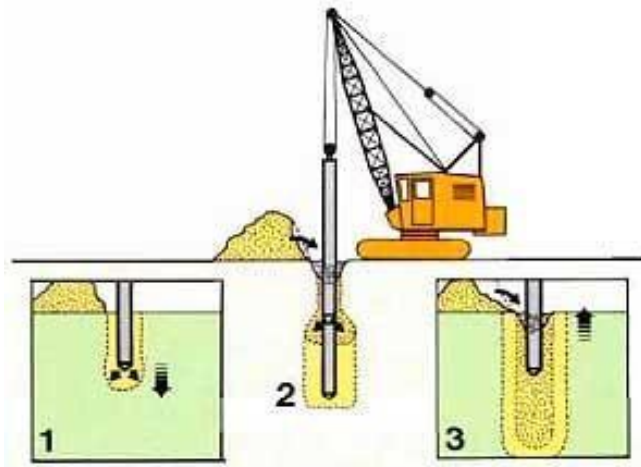


Figure (I.6) : densification du sol par vibroflotation

d. Compactage de surface

Le compactage est un procédé de densification des sols en place (Lawton, 2004). Ce procédé mène à une diminution des vides du sol par des moyens mécaniques aboutissant ainsi à une augmentation de la densité et de la résistance ainsi qu'une réduction de la compressibilité.

L'application des charges sur le sol à compacter par le biais de certains rouleaux décompactage statiques ou vibratoires induisent une densification dans le sol qui sera proportionnelle à l'énergie mécanique appliquée. Le compactage de surface peut être accompli sur différents types de sites.

e. Compactage dynamique

Le compactage de surface peut être utilisé pour une profondeur maximale de 3m. Au-delà de cette profondeur un autre type de compactage existe connu sous le nom décompactage dynamique profond. C'est un procédé qui consiste à pilonner le sol en surface avec une dame en chute libre figure (1.7). L'énergie transmise par chaque impact pénètre dans le sol et produit une déstructuration. Au bout de quelques jours ou semaines, une restructuration s'opère qui aboutit à des caractéristiques de portance améliorées. Le procédé s'applique aux sols sablo-graveleux, et aux matériaux argilo-limoneux saturés à condition qu'il y ait présence d'air occlus. Son emploi peut être intéressant pour consolider des couches sous l'eau.



Figure (I.7) : technique de compactage dynamique.

I.4.2 Méthodes hydromécaniques

a. Technique de drainage

On peut réduire l'effet de la liquéfaction par l'amélioration du système de drainage du sol. Si l'eau interstitielle existe dans le sol peut s'écouler librement, la pression excessive d'eau interstitielle sera réduite. Les techniques de drainage incluent l'installation des drains de gravier, du sable ou des matériaux synthétiques. Les drains synthétiques de mèche peuvent être installés à divers angles, contrairement aux drains de gravier ou de sable qui sont généralement installés verticalement. Les techniques de drainage sont souvent utilisées en combinaison avec d'autres types de techniques d'amélioration de sol pour une réduction plus pertinente du risque de liquéfaction.

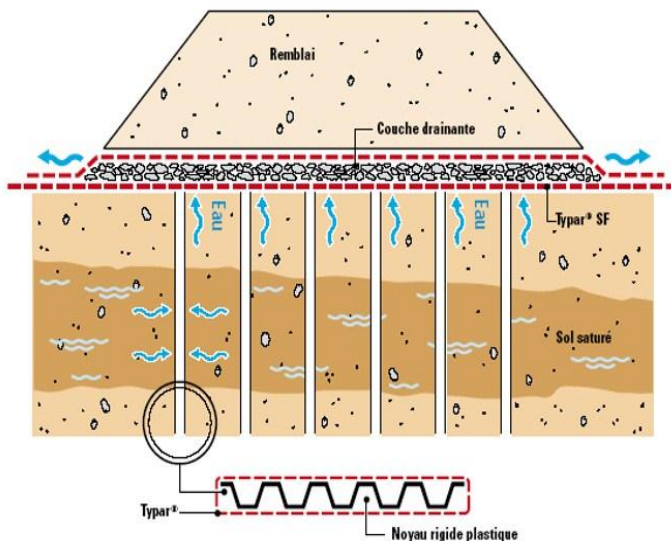


Figure (I.8) : technique de drainage

b. Les inclusions

Utilisables pour fonder tous types d'ouvrage sur sols compressibles de toute nature, ce procédé permet de réduire fortement les tassements. Les inclusions sont généralement verticales et disposées suivant un maillage régulier. Elles doivent présenter des caractéristiques intrinsèques de déformation et de raideur, compatibles avec les terrains encaissants et les structures à porter. Différents modes de mise en œuvre (forage avec ou sans refoulement, battage, vibration) et différents types de matériaux (ballast, gravier, mélange sol-ciment et tous types de mortier ou béton) sont utilisables pour permettre de réaliser à moindre coût un système de fondations superficielles en lieu et place d'un système de fondations profondes.

c. Pré chargement ou Pré compression

La pré compression nécessite la compression du sol sous une pression appliquée avant l'application des charges. Cette méthode est utilisée sur des terrains dont le tassement va se prolonger durant plusieurs années. On applique généralement ces méthodes sur des mauvais terrains de composition principalement argileuse. Le principe consiste à surcharger le terrain afin qu'il se tasse naturellement.

Le pré chargement des sols s'opère selon les mêmes principes dans le cas des sols fins ou grenus. Le mode de réalisation est le même, mais la perméabilité élevée des sols grenus permet d'obtenir l'amélioration souhaitée dans des délais beaucoup plus brefs que les sols fins et surtout argileux. Les effets bénéfiques de ce procédé incluent une augmentation considérable

de la capacité déportance par la réduction des pressions interstitielles excessives et de plus la réduction de la compressibilité des sols mous par l'accélération de la consolidation.

I.4.3.Méthodes thermiques

a. Déshydratation

La déshydratation par la chaleur est très rarement appliquée en géotechnique, elle permet de durcir certaines argiles par exemple. En pratique, la méthode consiste à brûler un carburant dans un forage en utilisant un forage voisin communiquant avec le premier et servant de cheminée de tirage.

b.Congélation

La congélation des terrains instables est un procédé ancien à caractère provisoire, employé pour le creusement des fouilles de puits ou de galeries. Cette technique rend le sol étanche et résistant provisoirement. Ce procédé est généralement développé pour les sols grenus mais il peut être appliqué aux argiles molles et aux limons. La congélation de l'eau interstitielle d'un sol produit un matériau dont les propriétés sont temporairement améliorées tant que la congélation est entretenue .La congélation a également pour effet de rendre imperméable le sol et de faciliter les travaux de terrassements ou de construction sous le niveau de la nappe. Ces propriétés en font une technique d'amélioration provisoire très efficace, mais dont l'emploi reste limité en raison de son coût élevé. Les techniques de congélation utilisées sont basées sur la circulation d'un fluide froid dans des tubes enfoncés dans le massif de sol. Une saturation complète du sol est souhaitée. La congélation du sol s'effectue d'habitude en deux étapes à savoir les étapes actives et passives de congélation. L'étape active est la plus importante et l'appareillage de réfrigération marche avec sa grande capacité que durant l'étape passive nécessaire pour maintenir l'épaisseur du front de gel contre le dégel.

I.4.4 Méthodes chimiques

La stabilisation chimique est une technique intéressante pour améliorer les propriétés physiques et mécaniques des sols argileux. Aujourd'hui les divers produits et techniques font partie d'une pratique courante des grands ouvrages du Génie Civil à l'échelle mondiale. Le recours massif à cette technique qui valorise les matériaux en place ce qui entraîne une diminution notable des coûts est due principalement aux facteurs suivants tels que la raréfaction des gisements naturels de matériaux nobles ; le souci écologique croissant imposant de préserver d'une part les

ressources naturelles existantes et de limiter d'autre part la mise en dépôt des matériaux impropres à la réutilisation en remblais ou en couches déformées. Les ajouts cimentaires et les produits chimiques les plus utilisés sont le ciment, la chaux, les cendres volantes. L'objectif principal du malaxage des ajouts cimentaires avec le sol est l'amélioration de ses propriétés physico-mécaniques ainsi que sa durabilité. Les différentes propriétés qui peuvent être améliorées sont la résistance, la plasticité, la compressibilité, la perméabilité, le potentiel de gonflement et le potentiel d'effondrement. L'amélioration de ces propriétés s'effectue soit par l'augmentation de certaines d'entre elles telle que la résistance, soit par la réduction d'autres telles que la plasticité, la perméabilité et l'érosion. Un bon malaxage des ajouts cimentaires avec le sol à traiter est un facteur important affectant d'une façon significative la qualité des résultats.

a. Utilisation de la chaux

Depuis plusieurs décennies, l'utilisation de la chaux pour stabiliser les argiles a connu beaucoup de succès. En effet, plusieurs études ont démontré que les propriétés mécaniques d'un sol traité à la chaux peuvent être modifiées de façon permanente. Dans certains cas par exemple, un sol stabilisé à la chaux fournit une performance structurelle équivalente à celle d'une fondation en gravier naturel ou en concassé (Bell, 1978). L'utilisation de la chaux se fait par l'addition des produits calcaires calcinés de monoxyde de calcium (chaux vive, CaO) ou d'hydroxyde de calcium (chaux hydratée, Ca(OH)). Généralement, la chaux vive est plus efficace que la chaux hydratée pour l'amélioration des sols. La chaux est plus efficace aux sols argileux que les sols granulaires. Par conséquent, les sols présentant des indices de plasticité au-delà de 10 sont les plus ciblés par ce procédé. De plus, la réussite de stabilisation à la chaux d'un sol nécessite d'une part une source de silice et/ou d'alumine et d'autre part des particules de petites dimensions susceptibles à l'échange cationique ainsi que la durée de cure.

b. Utilisation du ciment

Le ciment Portland est un autre produit envisageable pour la stabilisation de certaines catégories de sols utilisés pour les routes et les revêtements de pistes d'aéroports. Alors qu'il existe plusieurs similarités entre la chaux et le ciment Portland comme stabilisants, le ciment Portland fournit en plus la chaux et la source de silice.

Lorsque le ciment Portland est mélangé à l'eau, l'initiation de l'hydratation occasionne une augmentation rapide de la concentration de calcium dans le sol. A mesure que les ions de

calcium sont libérés, ils deviennent disponibles pour stabiliser l'argile. Comme indiqué ci-dessus, le processus de stabilisation initié par l'ajout du ciment Portland à l'argile engendre quatre étapes distinctes à savoir l'échange cationique, la floculation et l'agglomération de l'argile, l'hydratation par cimentation et les réactions pouzzolaniques. Le ciment Portland possède donc des propriétés lui permettant d'initier une étape de plus que la chaux soit celle de l'hydratation par cimentation. Les sols possédant un faible pourcentage d'argile, donc moins de silice et d'alumine ont besoin d'un apport de ciment si les réactions pouzzolaniques sont désirées. Par conséquent, le ciment Portland peut généralement être utilisé dans les mêmes types de sols que la chaux.

c. Utilisation des ajouts cimentaires

Parmi les ajouts cimentaires les plus utilisés il y'a les cendres volantes, le laitier, la fumée de silice, les cendres volcaniques et le calcaire. Les coûts élevés de la chaux et du ciment ont poussé les chercheurs à trouver d'autres types de liants dans le but d'améliorer les sols instables à faible coût tout en respectant l'environnement. Les cendres volantes sont intimement liées quant à leur processus de stabilisation. Elles sont souvent utilisées conjointement avec la chaux dans les travaux de stabilisation. Deux types de cendres volantes sont produits par la combustion du charbon à savoir la cendre volante et la cendre basse. Les cendres basses relativement grossières se récupèrent en bas de la fournaise tandis que les cendres volantes sont séparées des gaz d'échappement par un dépoussiéreur électrostatique. Les cendres volantes ont une composition très semblable à celle du ciment. Comme les cendres volcaniques, elles présentent des propriétés pouzzolaniques car elles fixent lentement la chaux présente dans le mélange pour donner naissance à des composés stables ayant des propriétés hydrauliques. Elles peuvent être siliceuses ou calciques. Selon leur teneur en chaux libre, les cendres volantes se comportent différemment en présence d'eau. Il existe deux classes de cendre volante à savoir la cendre silico-alumineuse (classe F) et la cendre sulfo-calcique (classe C).

1.5. Conclusion

Ce chapitre a été consacré à la description des sols fins y compris les argiles, limons, marnes...etc. sont des sols d'assise pour un grand nombre de constructions dans le monde entier, dont il faut bien les prendre en charge lors de la conception des projets afin d'éviter certains dégâts.

Plusieurs paramètres et caractéristiques géotechniques provoquent des phénomènes liés aux sols fins et qui rapportent surtout à la complexité de la minéralogie de ces sols, c'est pour cela l'intérêt des géotechniciens sera visé vers une description microscopique et une étude cruciale de ce type des sols fins. A travers la géologie des terrains de notre pays, des sols peu convenables présentant une plasticité élevée et une faible capacité de portance sont fréquemment rencontrés, il s'avère donc nécessaire d'améliorer ces sols pour les rendre constructible. Ces limitations pourraient être surmontées par l'amélioration des propriétés géotechniques des sols en employant différentes méthodes mécaniques ou chimiques d'où le processus de stabilisation des sols.

Chapitre II :

Salinisation des sols fins

Chapitre II : Salinisation des sols fins

II.1.Introduction

La salinité des sols est un problème majeur dans de nombreuses parties du monde, notamment dans les zones arides et semi-arides, comme c'est le cas en Algérie. La salinisation de ces terres continue d'être une forme majeure de dégradation et une menace environnementale importante. La méthode électrocinétique est une technique émergente qui a démontré un potentiel considérable pour l'élimination efficace des contaminants organiques et inorganiques des sols à grains fins, peu perméables.

II.2. Salinité des sols

La salinité est la présence d'une quantité de sels solubles comme le sodium, le magnésium, le calcium, le chlorure, le sulfate et le nitrate, qui se trouvent dans le sol (Tabet, 1999 ; Hillel, 2000 ; Baize, 2000 ; Chesworth, 2008). La salinité de l'eau et des sols peut provenir de sources variées. Elle provient naturellement de l'altération des roches mères contenant des minéraux nécessaires à la formation des solubles (IRD, 2008). La mer méditerranée comme les océans, peuvent être une source principale de la salinité, notamment dans les zones côtières ou proche côtières (Kloppmann et al., 2011). De même, la remontée des eaux salées ou des nappes phréatiques aboutit à la salinité des sols (Ben Hassine, 2005).

La surface mondiale naturellement touchée par la salinité est de l'ordre de 930 millions d'hectares de terres, dont 351 millions hectares présentent un caractère salin et le reste présente un caractère sodique.

II.3. Facteurs intervenants dans le processus de la salinisation

Selon Jones et Gouston (1991), la salinisation des sols peut être due à la lixiviation des sels solubles et/ou à l'évaporation, qui dépose leurs sels dans les sols, et en régime, non saturé, la remontée capillaire entraîne un transport des sels par flux de masse vers la surface du sol où ils s'accumulent après évaporation de l'eau (Raju et al. 1993).

II.4. Causes et conséquences de la salinité des sols

Parmi les principaux facteurs qui contribuent à la salinité croissante, on peut citer les rares précipitations, l'évaporation élevée, l'irrigation avec l'eau saline et l'intervention de l'homme dans les pratiques cultivables dans les zones proches côtières, arides et semi-arides. En agriculture, de tels sols dégradés, de faible fertilité sont généralement peu convenables pour la production agricole, entraînant des réductions inacceptables de rendements.

Les sols salins peuvent affecter l'environnement de diverses manières, entraînant des dommages aux infrastructures, à l'instar des routes, des ponts, des trottoirs, des bâtiments et d'autres structures des villes et des campagnes.

D'importants dommages peuvent être causés aux services souterrains, tels que : gaz, eau et canalisation d'assainissement, chemins de fer et autres structures en sous-sols.

II.5. Types de salinité

La salinité des sols existe sous deux formes, à savoir la salinité primaire qui est causée par différents phénomènes naturels, tandis que la salinité secondaire est le produit de l'action humaine.

II.5.1. Salinisation primaire (naturelle)

La salinisation primaire est due à la formation des sels durant l'altération des roches ou à des apports naturels externes :

- Dans les régions côtières, intrusion des eaux salées ou submersion des terres basses.
- Inondations périodiques par l'eau de mauvaise qualité.
- Remontée de nappes phréatiques salées dans les terres arides et semi-arides.

La salinisation primaire constitue 80% des terres salinisées d'origine naturelle, soit 5% de la surface du globe (Szabolcs, 1989).

II.5.2. Salinisation secondaire

La salinisation d'origine secondaire est la résultante de l'activité humaine. La cause principale de cette salinisation est due à l'utilisation d'une eau d'irrigation de qualité médiocre (eau saline), lessivage naturel insuffisant et drainage défaillant.

II.6. Classification des sols affectés par la salinité

La salinité désigne la concentration en volume ou en masse, des sels présents dans l'eau ou dans la solution du sol. Elle est exprimée par les teneurs en sels ou par la conductivité électrique, qui doivent être estimées dans des conditions standard d'humidité.

Selon United States Salinity Laboratory (USSL, 1954), les sols affectés par les sels sont classés en fonction de la conductivité électrique de leur extrait de pâte saturée (Mathieu et Pieltain, 2003) exprimée en déciSiemens par mètre ($dS.m^{-1}$) ou en milliSiemens par centimètre ($mS.cm^{-1}$), du pourcentage de sodium échangeable (ESP en %) et de leur pH

Tableau (II.1).

Tableau II.1 : Classification des sols affectés par les sels (USSL, 1954)

Classe	CE($dS.m^{-1}$)	ESP %	pH
Non salin	<4	<15	<8,5
Salin	>4	<15	<8,5
Sodique	<4	>15	>8,5
Salin sodique	>4	>15	>8,5

CE = conductivité électrique de l'extrait de pâte saturée

pH = pH de l'extrait de pâte saturée

ESP = pourcentage de sodium échangeable

Les tableaux(II.2) et (II.3) donnent quelques classifications de salinité selon différentes sources.

Tableau II.2 : Classe de la salinité en fonction de la conductivité électrique de l'extrait de saturation à 25 °C (Mathieu et Pieltain, 2003).

mmhos.cm ⁻¹ dS.m ⁻¹	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	
Riverside USA	non salé	légèrement salé	salé		très salé				extrêmement salé		
Servant 1975	non salé	faiblement salé	moyennement salé		salé		fortement salé		très fortement salé		
CPCS 1967	non salé	phase saline		sol salin							
R.P 1995	non salé				horizon salique (1)				horizon salique (2)		
FAO 1989	non salé		(1) phase saline ou (2) caractères saliques si pH _{H2O} 1/1 > 8,5					caractères saliques			
BRM 1999	non salé				horizon salique si pH _{CEe} > 8,5 ou < 3,5				horizon salique		

(1) Sels de la série alcaline (bicarbonates et carbonates) et pH_{CEe} > 8,5.

(2) Sels de la série neutre (chlorures, sulfates ou nitrates) et pH_{CEe} > 8,5.

Tableau II.3 : Classe de salinité en fonction de la conductivité électrique de l'extrait aqueux à 25° C. (Mathieu et Pieltain, 2003)

mmhos.cm ⁻¹ dS.m ⁻¹	0,6	1	2	3	4	
CE _{1/5}	non salé	légèrement salé	salé	très salé		extrêmement salé
CE _{1/10}	non salé	légèrement salé	salé	très salé	extrêmement salé	

II.7. Classification et caractéristiques des sols salins

II.7.1. Classification des sols salins

Plusieurs classifications des sols sont répertoriées, dont il ya lieu de citer la classification américaine, française, russe et celle de la (FAO, 1972).

Parmi ces classifications, celles proposées par (USSL, 1954 ; Duchaufour, 1977 ; Cherbuy, 1991), ont classé les sols salins en trois grandes classes :

- Sols salins

- Sols salins à alcalins
- Sols alcalins

II.7.2. Caractéristiques des sols salins

II.7.2.1. Sols salins

Ces sols ont pour principales caractéristiques leur richesse en sels de sodium neutre (Na Cl chlorure de sodium, Na₂SO₄ sulfate de sodium), mais riches en sels blancs (chlorure, sulfate, carbonate de calcium ou magnésium) et qui sont généralement dominant dans les régions arides et semi-arides.

Les sols salins sont caractérisés par une conductivité électrique de l'extrait saturé à 25°C, supérieure à 4 dS/m, un pH de l'extrait saturé du sol inférieur à 8.5 et un pourcentage de sodium échangeable inférieur à 15% (Maillard, 2001). Ces sols ont une perméabilité égale ou supérieure à celle des sols normaux (non salins). Cela est dû à l'action flocculante des sels (Daoud, 1993).

II.7.2.2. Sols salins à alcalins

Ils se caractérisent par un pourcentage de sodium échangeable (ESP) supérieur à 15 % et par une conductivité électrique (CE) supérieure à 4 dS/m à 25°C, leur pH est inférieur à 8.5 (U.S.S.L, 1954). Ces sols salins à alcalins sont localisés dans les Oasis du sud Algérien et aussi dans la vallée du Cheliff. (Aubert, 1983 ; Boutelli, 2012 ; Djelloudi et Nouari, 2015).

II.7.2.3. Sols alcalins

Caractérisés par une saturation marquée en Na et une accumulation des sels en profondeur. Ces sols se caractérisent par la présence d'une quantité importante de sodium qui dépasse les 15% de le C.E.C. (Capacité d'Echange Cationique). La conductivité électrique(C.E) ne dépasse pas 4 ds/m à 25°C, et le pH est supérieur à 8,5.

La relative abondance de l'ion sodium, dans la garniture ionique absorbant, peut avoir deuxorigines soit provenir du sodium libéré par l'altération de certains minéraux alcalins ou unrésultat d'une saturation progressive du complexe en sodium, aux dépend'une solution saline (Duchaufour, 1983).

Ces sols ont un profil peu stable, en raison de la grande facilité de dispersion des argiles,ils sont asphyxiants plutôt que physiologiquement secs.

II.8. Salinisation des sols dans le monde et en Algérie

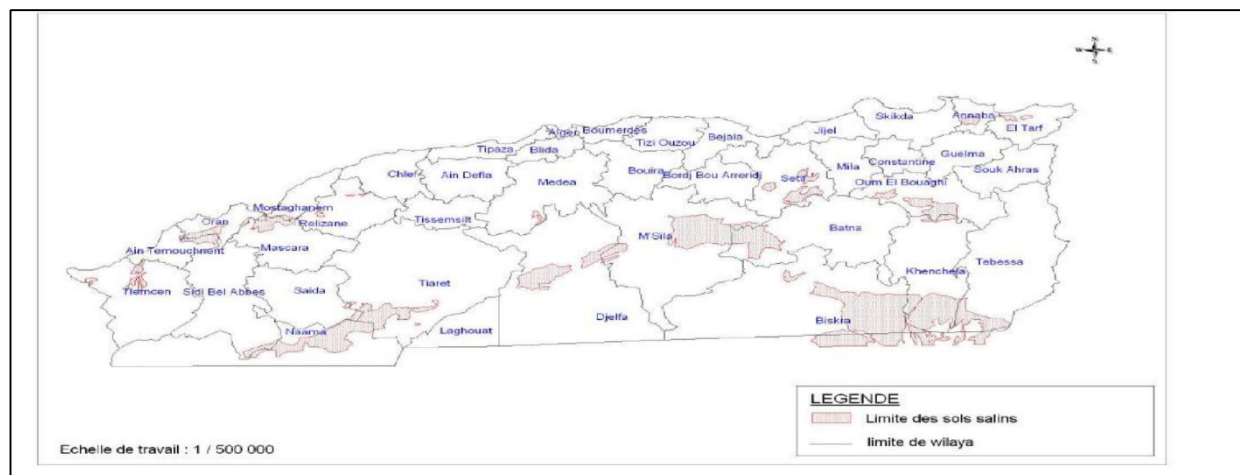


Figure (II.1): Répartition des sols salins en Algérie (INSIDE ,2008)

La salinisation des sols est un problème environnemental majeur à l'échelle du globe. En moyenne la terre perd dix hectares de terres cultivables par minute, dont trois hectares à cause de la salinisation (Bensadaa, 2015). Selon la FAO, la surface affectée par la salinité dans le monde touche au moins 400 millions d'hectares et menace gravement une surface similaire. Les estimations de la superficie totale représentée par les sols salins dans le monde varient d'un auteur à un autre. (Szablocs, 1986) estime la surface totale affectée à 95 500 millions d'hectares, (Claude et al., 2005) la détermine à environ 955 millions de Km², soit 6.4% de la superficie des continents du globe.

En Algérie, les sols salins représentent 25% de la surface cartographiée, particulièrement dans les zones arides et semi-arides, soit 3.2 millions d'hectares (Halitim, 1988). Selon Daoud (1993), les sols salins du Sud de l'Algérie et des Hauts plateaux sont plus sodiques que ceux du nord du pays.

Les sols salins sont très répandus dans les basses plaines de l'Oranie, dans la vallée du Bas Chéiff, sur les hautes plaines au Sud de Sétif et de Constantine, aux bords de certains chotts (Figure II.1). Ils ont aussi une grande extension dans les régions sahariennes au Sud de Biskra jusqu'à Touggourt, Ouargla et au-delà (Durand, 1983).

Les sols salins d'Algérie sont caractérisés par une conductivité électrique supérieure à 7 dS/m et un pourcentage de sodium échangeable sur la capacité d'échange cationique (C.E.C.) qui varie de 5 à 60 % (Aubert, 1975).

II.9. Remédiation des sols salins :

Les méthodes employées pour restaurer, améliorer et récupérer les sols salins sont très nombreuses, dont on peut citer :

II.9.1. Le drainage

Le drainage est une technique de suppression naturelle ou artificielle des excès d'eau souterraine et de surface des sels dissous dans les sols. Le drainage a pour objectif :

- 1- d'évacuer l'excès d'eau de pluie par les drains de surface qui recueillent essentiellement l'écoulement de surface.
- 2- de contrôler la profondeur de la nappe et de lessiver les sels dans la rhizosphère.
- 3- de transporter l'eau récupérée dans les drains secondaires jusqu'au collecteur.
- 4- de transporter l'eau des collecteurs jusqu'à l'exutoire du système ou au site d'évacuation.

II.9.2. Le lessivage

Le lessivage est une technique qui consiste à dissoudre les sels accumulés dans le sol par des apports d'eau importants et à les entraîner en dessous de la zone racinaire par le mouvement descendant de l'eau.

II.9.3. Procédé électrocinétique

Parmi les procédés de remédiation des sols en laboratoire et in situ, on peut citer la méthode électrocinétique (électromigration et électro-osmose). L'électrocinétique utilise deux électrodes insérées dans le sol pour y faire passer un faible potentiel électrique, où les ions et les particules chargées, présents dans la solution du sol sont transportés entre les électrodes de charge opposée, les anions s'accumulent au niveau de l'anode et les cations au niveau de la cathode. Ce procédé est utilisé dans notre étude.

II.10. Conclusion

Ce chapitre a été consacré à la description de la salinité des sols. Dans notre pays, la salinité des sols est persistante dans les zones arides et semi-arides, particulièrement dans la zone Ouest de l'Algérie, là où l'évaporation excède la pluviométrie, due à des saisons de sécheresse à répétition, d'année en année, particulièrement durant cette dernière décennie. Les sols salins sont caractérisés par une forte concentration en sels et une conductivité électrique élevée.

Chapitre III :

Amélioration des sols salins par la méthode électrocinétique

CHAPITRE III : Amélioration des sols salins par la méthode électrocinétique

III.1. Introduction

Le traitement électrocinétique appelé également électro-remédiation ou électro-décontamination est un procédé développé conçu à traiter entre autres, les sols à grains fins et les sédiments peu perméables avec un bon rapport coût / efficacité, qui peut également être appliqué in-situ. Il vise une large variété de polluants inorganiques et organiques. Cette méthode prometteuse a été le sujet de nombreuses études en laboratoire, concernant son application sur plusieurs types de polluants (métaux) pour vérifier l'efficacité de cette technique dans le traitement des sols.

Le principe de base de l'électro-remédiation est de permettre le déplacement des espèces chimiques variées dans les sols sous un champ électrique entre deux ou plusieurs électrodes.

Lorsqu'un potentiel électrique est appliqué, des processus électrocinétiques sont générés, tels que : électro-osmose, électromigration et électrophorèse (Acar et Alshawabkeh, 1993), ce qui conduit au transport des contaminants vers leurs électrodes de charge opposée, d'où leur récupération.

III.2. Facteurs affectant le traitement électrocinétique

III.2.1. Type de sols et teneur en eau

Le traitement des sols par la méthode électrocinétique est une technique de remédiation et stabilisation émergente, qui est applicable dans les sols à grains fins avec une faible conductivité hydraulique et une grande surface spécifique. La structure et les propriétés du sol peuvent apporter de nombreuses modifications au cours du traitement électrocinétique des sols. Certains minéraux argileux, comme la montmorillonite présentent des changements spectaculaires dans les propriétés physiques et chimiques (par exemple changement de couleur) qui se traduisent par des fissures et la perte d'eau, lors de l'application d'un champ potentiel.

Le degré de saturation du sol est un autre facteur qui modifie le débit électroosmotique des sols (Mitchell et Yeung, 1990). L'humidité du sol doit être suffisamment conductrice et élevée pour permettre l'électro-remédiation. Dans la littérature, il est indiqué que les distributions d'humidité inégales dans le sol peuvent avoir lieu pendant le traitement électrocinétique avec le développement de pression interstitielle causée par les variations du pH, l'intensité du courant et le potentiel.

Le dessèchement des sols pendant le traitement électrocinétique est l'effet Joule du courant électrique et l'élévation de la température du sol (Shapiro et Probstein, 1993). Certaines des conséquences du dessèchement du sol pendant le traitement électrocinétique sont le rétrécissement, le développement des fissures (dessiccation) et l'arrêt éventuel des fluides.

III.2.2. Gradient de pH

L'application d'un courant électrique continu à travers le sol entraîne une oxydation à l'anode (générant un front acide) et une réduction à la cathode (produisant un front basique). Par conséquent, le traitement électrocinétique modifie le pH du sol et provoque la décomposition de l'eau via la réaction de l'oxydoréduction, du flux d'eau entre les électrodes et de la migration des ions vers l'électrode de signe opposé. Ces ions comprennent les ions présents dans le sol, les ions des agents stabilisants ajoutés aux électrodes et les ions libérés en raison de la dégradation des électrodes (Liaki et al, 2010). Au cours du processus EK, du fait de l'électrolyse de l'eau, des ions H^+ et de l'oxygène se formeront à l'anode et des ions OH^- et de l'hydrogène se formeront à la cathode. Le résultat immédiat est un changement local du pH de la solution interstitielle, de sorte que l'acidité augmente avec le temps à l'anode et que l'alcalinité augmente à la cathode. À cet égard, l'effet du pH sur les minéraux du sol génère une complication supplémentaire. Le front acide se déplace à travers le sol de l'anode vers la cathode et le front de base se déplace de la cathode vers l'anode (Acar et al, 1990). Le front acide se déplace plus rapidement que le front de base en raison de la mobilité plus élevée du H^+ que celle de l' OH^- . Aux endroits où ces fronts d'acide et de base se rejoignent, de l'eau se forme, ce qui entraîne une modification brutale du pH, qui influe sur la solubilité des espèces chimiques présentes dans le sol et leur adsorption sur les particules du sol. Au cours du temps de traitement, la majorité du volume de sol devient acide, sauf près de la cathode. Le processus de cette précipitation dépend de nombreux facteurs tels que le type de sol, la nature des espèces chimiques dans la solution interstitielle du sol et les conditions de traitement. Cependant, dans certains sols possédant un pouvoir tampon relativement élevé, la migration des ions hydrogène

sera entravée. Le pH du sol ayant un effet significatif sur la valence, la solubilité et la sorption des ions, le développement de ces conditions de pH extrêmes formées au niveau des électrodes est considéré comme un facteur important dans le traitement électrocinétique des sols. Certains chercheurs estiment que la génération du H^+ et l'acidification à l'anode devraient être contrôlées ; sinon ce processus retarderait les ions transportant de manière à ce que la plus grande partie de l'énergie soit consommée par la génération et la migration des ions d'hydrogène entre les électrodes plutôt que par le transport des ions chargés.

III.2.3. Densité du courant

Le choix d'un courant et d'une tension appropriée dépend de nombreuses propriétés électrochimiques, en particulier la conductivité électrique CE dans les sols avec une CE plus élevée devant nécessiter plus de charge et des courants plus élevés que les sols à faible CE.

Wise (2000) a suggéré un gradient de tension de 100 V/m pour le traitement électrocinétique initial. Cependant, l'augmentation de la densité de courant entraînera une augmentation du taux de transport de la migration ionique, tandis que le coût du processus en question, augmentera en même temps.

De ce fait, une tension optimale appliquée sera considérée en fonction de la composition chimique et minéralogique du sol, de la distance entre les électrodes et de la durée de traitement.

III.2.4. Configuration des électrodes

L'utilisation des électrodes inertes est préférée généralement lors du processus EK, car elle évite d'introduire une contamination par dissolution du matériau de l'anode.

L'introduction d'acier, de fer et de cuivre comme électrode est plus efficace que le carbone noir, le plomb ou le platine. Le cuivre et le graphite est un choix préféré de matériaux en laboratoire, pour des raisons économiques. La disponibilité du matériau, la facilité de fabrication et de son coût d'installation, sont des facteurs essentiels pour le choix du matériau des électrodes.

Les électrodes doivent être perforées, afin de faciliter le transport des solutions et l'évacuation des gaz générés et peuvent avoir plusieurs formes géométriques (linéaire, radiale, alternée) et peuvent aussi être installées horizontalement ou verticalement. La taille, la forme, l'arrangement et la distance entre les électrodes affectent également la performance du traitement électrocinétique.

III.2.5. Durée de traitement

Pour un type de sol et un type de fluide interstitiel donnés, le temps de traitement requis dépendra des niveaux de courant et de tension, de la vitesse de transport, la configuration et l'espacement des électrodes.

Par exemple, un grand espacement des électrodes réduit le nombre de trous de forage et les coûts d'installation, mais augmente le temps de traitement et les coûts d'exploitation. Par conséquent, il est nécessaire d'optimiser toutes ces variables avant de sélectionner une configuration et des dispositions d'espacement.

III.2.6. Coût de traitement

Durant le traitement électrocinétique in situ, le coût peut comprendre des éléments majeurs, tels que :

- ❖ Coût de l'énergie électrique : Celui-ci dépend des propriétés du sol, du fluide interstitiel, de l'espacement des électrodes et du temps de traitement.
- ❖ Coût de fabrication, d'installation et de remplacement des électrodes : Il dépend du type du matériau de l'électrode, des dimensions, de la configuration et de l'espacement des électrodes, de la méthode d'installation, de la profondeur des électrodes et le nombre des électrodes à installer.
- ❖ Coût d'équipement : Ce coût dépend des caractéristiques du sol, du type de la profondeur du contaminant, de la conductivité électrique du sol et de l'eau interstitielle, ainsi que du type du procédé utilisé et des exigences de préparation du site et du coût des électrodes cités et de main d'œuvre.

III.2.7. Avantages et inconvénients du procédé électrocinétique

Le processus électrocinétique est développé principalement pour traiter les sols à grains fins, peu perméables. Les avantages et inconvénients de ce procédé de remédiation sont résumés comme suit :

III.2.7.1. Avantages

- Simplicité : Facile à utiliser avec l'installation d'un équipement simple.
- Sécurité : Exposition minimale aux personnels de fonctionnement et à l'environnement
- Economique : Peu de demande énergétique

- Flexible : Peut être employé au laboratoire et sur le terrain pour une vaste gamme de milieux : des sols, des boues, des dépôts et/ou des eaux souterraines et pour plusieurs types de contaminants (métaux, composés organiques...)

III.2.7.2. Inconvénients

- Le traitement électrocinétique est limité par la solubilité du polluant et sa désorption.
- Le contrôle du pH est critique, afin d'éviter la précipitation du contaminant au voisinage de la cathode, en provoquant leur immobilisation.
- L'humidité du sol doit être suffisante pour assurer le transport des contaminants.

La difficulté de généralisation des conditions de traitement pour tous les types de sols et de polluants.

III.3. Conclusion

Le traitement électrocinétique est une technique émergente, utilisée principalement pour traiter le sol fin, peu perméable et saturé. La facilité d'installation de l'équipement électrocinétique, nous permettons de traiter le sol au niveau de laboratoire et in-situ sur une surface de terrain étendu. La technique électrocinétique assure la caractérisation et la remédiation du sol dans le même temps de traitement.

Le traitement électrocinétique peut être influencé par plusieurs facteurs tels que : le niveau de courant, le temps de traitement, la texture du sol, la teneur en eau et le gradient de pH.

Chapitre IV :

Identification et caractérisation du sol étudié

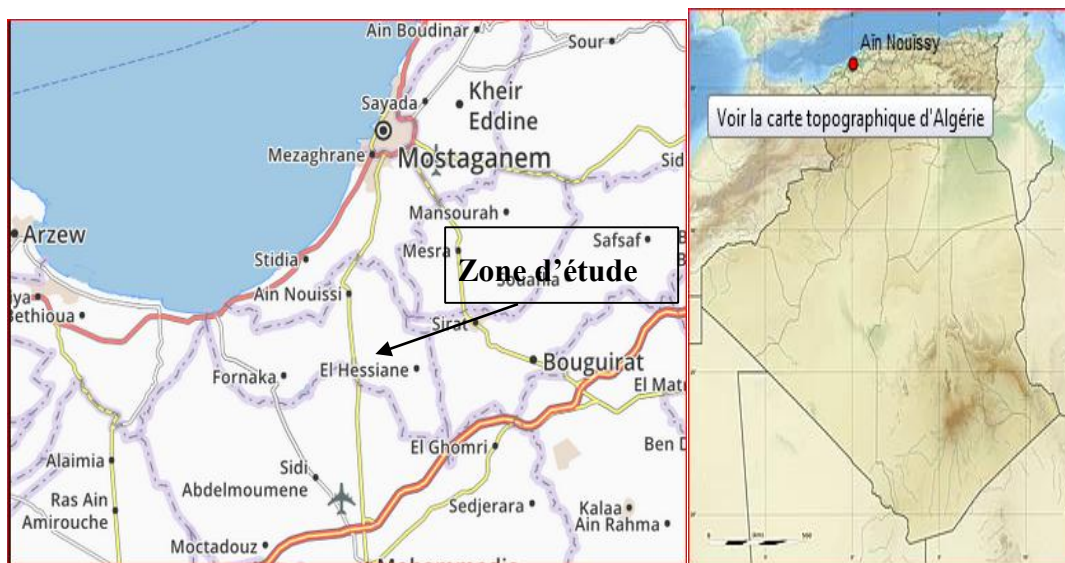
Chapitre IV : Identification et caractérisation du sol étudié

IV.1.Introduction

Ce chapitre présente une description détaillée des matériaux et les méthodes utilisées pour identifier et mesurer les diverses propriétés physico-chimiques de sol prélevé à Bordjia (Mostaganem).L'étude expérimentale a été réalisée au sein du laboratoire de mécanique des sols du département de génie civil de l'université Abdelhamid Ibn Badis de Mostaganem.

IV.2. Localisation de la région étudiée

Le sol étudié est situé dans la région Bordjia, Mostaganem (nord-ouest de l'Algérie), qui s'étale sur une superficie de 54 km², Elle est distante de 20 Km de Mostaganem, comme le montre la figure (IV.1).La région étudiée 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.



Figure(IV.1) : Localisation du site Bordjia Mostaganem



Figure (IV.2): Photo satellitaire de la zone d'étude Bordjia (Mostaganem).

IV.3. Analyse du sol étudié

Le sol a été extrait à une profondeur d'environ 0,5 m. Après l'extraction, le sol a été placé dans des sachets en plastique et transporté au laboratoire pour préparation et exécution des essais géotechniques d'identification et de caractérisation. Au laboratoire, nous avons procédé au concassage et broyage des échantillons de sol prélevés à l'aide d'un broyeur (figure IV.3).



Figure(IV.3) : Broyeur.



Figure(IV.4) :Echantillons d'argile avant et après broyage.

IV.4. La caractérisation géotechnique du sol étudié

IV.4.1. La teneur en eau (NF P 94-050)

La teneur en eau est déterminée selon la norme NF P 94-050. L'échantillon est séché à l'étuve à 105°C pendant 24 h. La différence entre le poids avant et après étuvage exprime la teneur en eau de l'échantillon initial. La teneur en eau de notre échantillon est déterminée à 13,57%.

Elle s'exprime en pour-cent.

$$w = \frac{W_w}{W_s} \cdot 100 \quad (\text{IV.1})$$

Avec :

W_w : poids de l'eau.

W_s : poids des grains solides.



Figure (IV.5) :Le séchage des échantillons du sol à l'étuve.

IV.4.2.Le poids volumique des grains solides

La masse volumique des grains solides du sol (ρ_s) est le quotient de la masse de ces grains solides (m_s) par leur volume (v_s).

$$\rho_s = m_s / v_s \quad (IV.2)$$

L'échantillon de sol est séché à l'étuve puis pesé. Le volume des grains est déduit par pesée à l'aide d'un pycnomètre en substituant de l'eau de masse volumique connue aux particules solides.



Figure (IV.6) :Détermination du poids volumique des grains solides

IV.4.3.la masse volumique apparente

C'est la masse de l'unité de volume apparent du corps, c'est-à-dire de la Volume constitué (v) par la matière du corps et le vide qu'elle contient (p).

$$\rho_h = P / V \quad (IV.3)$$



Figure (IV.7) :L'essai la masse volumique apparente

IV.4.4. Analyse granulométrique

La granulométrie (répartition granulométrique des particules) :

Pour bien décrire un sol, il faut donc connaître sa granulométrie, c'est-à-dire la répartition de ses particules suivant leurs diamètres équivalents. Elle se fait par tamisage par voie sèche après lavage pour les sols dont les éléments supérieurs à 80 mm (NF P94-056) et par sédimentation pour les éléments inférieurs ou égaux à 80 mm (NF P94-057).

IV.4.4.1.L'analyse granulométrique par tamisage

L'essai consiste à faire passer un échantillon représentatif de sol à travers des tamis superposés dont les ouvertures vont en décroissant du haut vers le bas. Les particules les plus grosses restent donc emprisonnées sur les tamis les plus hauts (refus ou retenu), tandis que les particules plus fines se dirigent vers les tamis inférieurs (tamisa ou passant).

Lorsque les masses retenues sur chaque tamis deviennent constantes, le tamisage est terminé et tous les refus sont pesés. La masse de chaque refus est ensuite comparée à la masse totale de l'échantillon, ce qui permet de calculer les pourcentages de refus cumulé et de passant.

Les résultats sont portés sur un graphique semi-logarithmique ou ils construisent une courbe granulométrique.



Figure (IV.8) : vibration manuelle

IV.4.4.2.L'analyse granulométrique par sédimentation

Afin d'estimer la distribution granulométrique des particules de silt et d'argile, on procède à une analyse granulométrique par sédimentation. La méthode consiste à mesurer le temps de sédimentation dans une colonne d'eau, c'est-à-dire la vitesse de chute des particules.



Figure (IV.9) : *Essai de Sédimentation.*

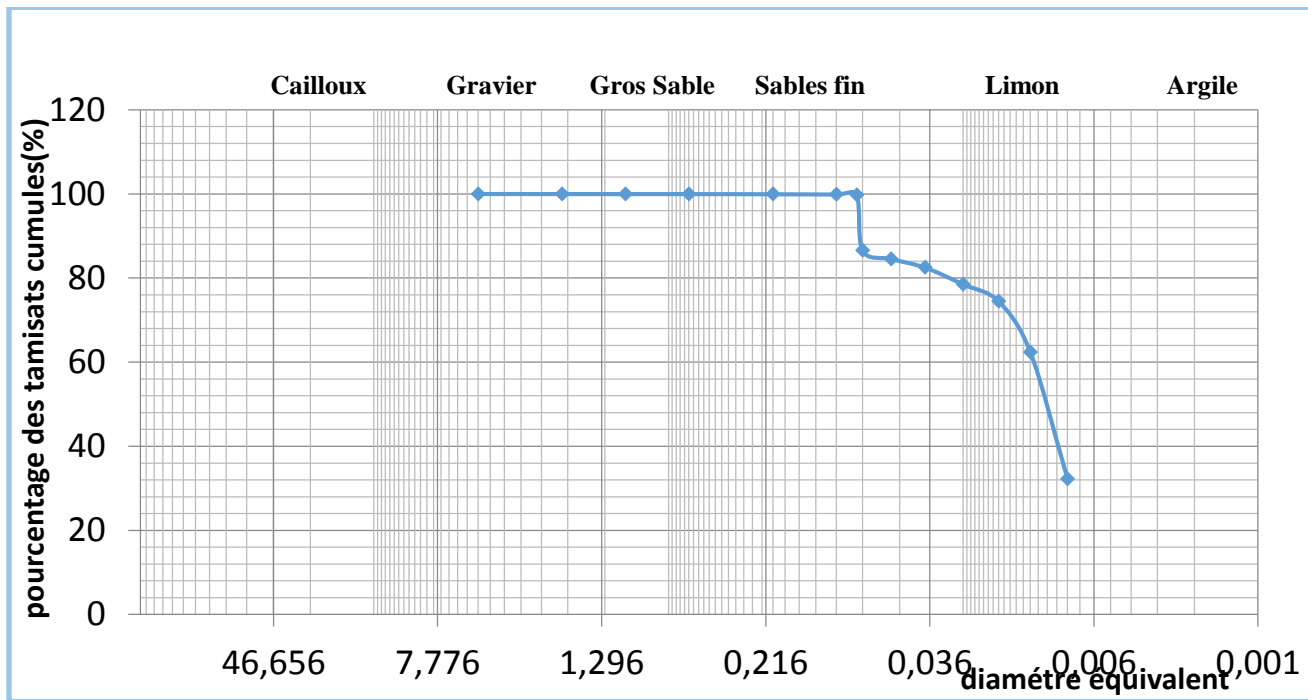
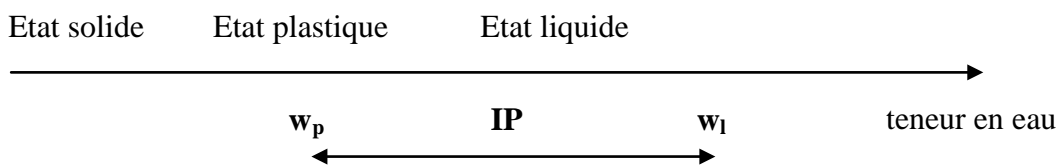


Figure (IV.10): Courbe granulométrique

IV.4.5.Limites d'Atterberg

La consistance d'un sol peut varier dans de larges limites avec la quantité d'eau interstitielle que contiennent ses pores et l'épaisseur des couches d'eau adsorbées qui enrobent ses grains. Les limites d'Atterberg sont des constantes physiques conventionnelles qui marquent les seuils entre le passage d'un sol de l'état liquide à l'état plastique (limite de liquidité) et le passage d'un sol de l'état plastique à l'état solide (limite de plasticité). Ces limites ont pour valeur la teneur en eau du sol à l'état de transition considéré, exprimée en pourcentage du poids du matériau sec. La différence entre la limite de liquidité et de plasticité qui définit l'étendue du domaine plastique est particulièrement importante, c'est l'indice de plasticité (figure IV.11).



Figure(IV.11) : Etats de consistance.

Les limites d'Atterberg (limite de liquidité et limite de plasticité) ont été déterminées selon la norme NF P 94-051. Les sols préalablement broyés et séchés à l'air (passant au tamis N°40) ont été initialement mélangés à l'état sec avec des quantités prédéterminées de la chaux. Ensuite l'eau distillée a été ajoutée au mélange et pour améliorer la diffusion de l'eau dans le mélange, figure (IV.12).



Figure(IV.12) : Imbibition des échantillons.

IV.4.5.1.Détermination de la limite de liquidité

La totalité du matériau est malaxée afin d'obtenir une pâte homogène et presque fluide. On reparti dans une coupelle propre et sèche avec la spatule une masse d'environ 250g de pâte. Cette pâte est étalée en plusieurs couches afin d'éviter d'emprisonner des bulles d'air, présente en fin d'opération un aspect symétrique pas rapport à l'axe vertical de la coupelle. Ensuite, on partage la pâte en deux parties au moyen de l'outil à rainurer (figure IV.13).



Figure (IV.13) : réalisation de la rainure.



Figure (IV.14) : Fermeture de la rainure.

L'opération complète est effectuée au moins quatre fois sur la même pâte mais avec une teneur en eau différente à chaque fois. L'essai n'est poursuivi que lorsque N_c est compris entre 15 et 35. Les nombres de chocs de la série d'essais doivent encadrer 25 et l'écart entre deux valeurs consécutives doit être inférieur ou égale à 10. Enfin, on prélève dans la coupelle à l'aide d'une spatule, environ 5 g de pâte, de chaque côté des lèvres de la rainure pour en déterminer la teneur en eau (dessiccation à l'étuve).

La limite de liquidité (w_l) est la teneur en eau du matériau qui correspond conventionnellement à une fermeture sur 1 cm des lèvres de la rainure après 25 chocs. Elle est calculée à partir de l'équation de la droite moyenne ajustée sur les couples de valeurs expérimentales (N_c , w_l) pour

au moins quatre couples de valeurs. La limite (w_l) est obtenue pour une valeur de N_c égale à 25 coups. Elle est exprimée en pourcentage et arrondie au nombre entier le plus proche.

IV.4.5.2 Détermination de la limite de plasticité

On forme une boulette de la pâte préparée auparavant et la rouler sur une plaque lisse à la main de façon à obtenir un rouleau qui est aminci progressivement jusqu'à ce qu'il atteigne 3 mm de diamètre (figure IV.15).



Figure(IV.15) :Confection du rouleau pour la détermination de la limite de plasticité.

La limite de plasticité est obtenue lorsque, simultanément, le rouleau se fissure et que son diamètre atteint 3 mm. Une fois les fissures apparues, on prélève la partie centrale du rouleau et la place dans une capsule de masse connue, la pèse immédiatement et l'introduit dans l'étuve afin de déterminer sa teneur en eau (figure IV.16).



Figure(IV.16) :Fissuration du rouleau.

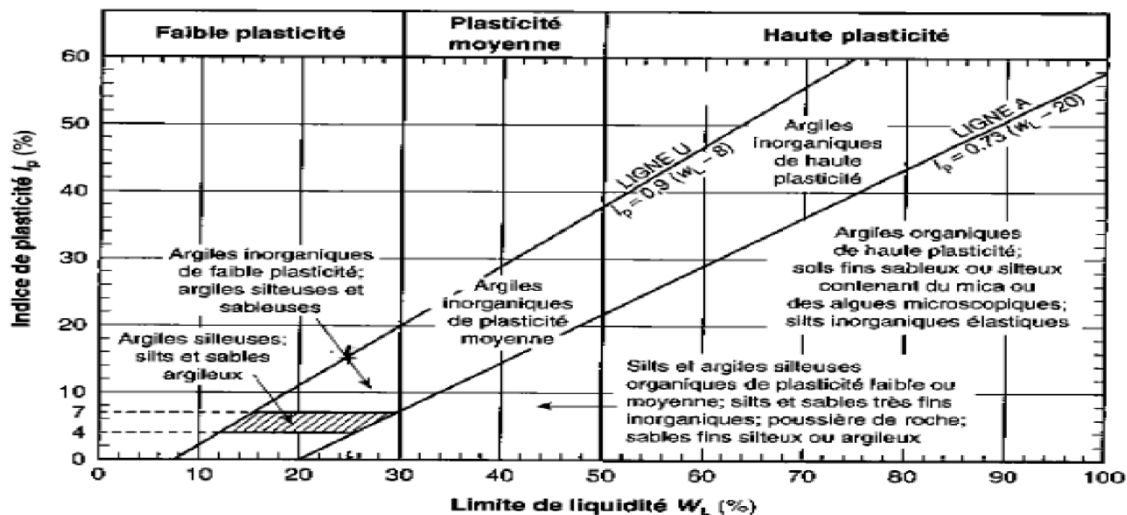
La limite de plasticité (w_p) est la teneur en eau conventionnelle d'un rouleau de sol qui se fissure au moment où son diamètre atteint 3 mm. Cette limite de plasticité est la moyenne arithmétique des teneurs en eau obtenues à partir de trois essais. La valeur est exprimée en pourcentage.

IV.4.5.3.Détermination de l'indice de plasticité

L'indice de plasticité (IP) représente la différence entre les valeurs des limites de liquidité et de plasticité.

$$IP = w_l - w_p \quad (IV.4)$$

Les résultats des essais sont représentés dans le tableau (IV.2).



Figure(IV.17) : Diagramme de plasticité (d'après Casagrande 1948).

D'après l'abaque de plasticité de Casagrande (1948) (figure IV.17), on peut conclure que le sol de Bordjia se situe parmi les sols argileux peu plastiques.

IV.4.6. Valeur de bleu de méthylène : Vbs (norme NF P 94-068)

Il s'agit aussi d'un paramètre permettant de caractériser l'argilosité d'un sol. Son application est récente. Ce paramètre, noté VBS (valeur de bleu du sol) représente la quantité de bleu de méthylène pouvant s'adsorber sur les surfaces externes et internes des particules argileuses contenues dans la fraction du sol considéré ; c'est donc une grandeur directement liée à la surface spécifique du sol.

L'essai consiste à introduire progressivement du bleu de méthylène dans une suspension de sol maintenue en agitation. On prélève périodiquement une goutte de la suspension que l'on dépose sur un papier chromatographique. Dès qu'une auréole bleutée se développe autour de la tache ainsi formée on peut considérer que l'adsorption du bleu de méthylène sur les particules d'argile est terminée. En effet, c'est l'excès de bleu de méthylène qui apparaît dans l'auréole.

La VBS traduit globalement la quantité et la qualité (activité) de la fraction argileuse du sol. Elle s'exprime en grammes de bleu pour 100g de sol.



Figure (IV.18) : La réalisation de l'essai au bleu de méthylène

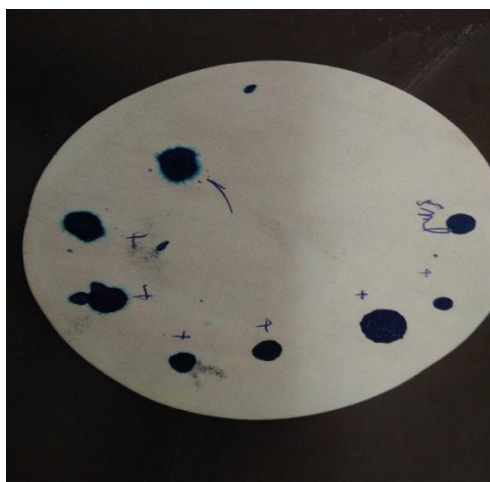


Figure (IV.19) : L'essai au bleu de méthylène

Tableau IV.1: Paramètres tirés de l'essai au bleu de méthylène

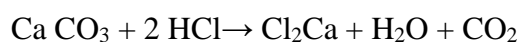
Paramètres	Borjia
Valeur du bleu VBS (%)	4
Surface spécifique totale SST (m ² /g)	83,72

La VBS de notre échantillon du site Bordjia mesurée est de 4% donc sol limoneux argileux.

IV.4.7. Dosage des carbonates CaCO₃ (NF ISO 10693)

La détermination de la teneur en Ca CO₃ s'effectue au calcimètre. L'essai consiste à mesurer à l'aide d'une burette à gaz le volume de CO₂ dégagé par la réaction du HCL sur le carbonate de calcium contenu dans l'échantillon.

L'acide chlorhydrique dilué décompose le carbonate de calcium selon la réaction :





Figure(IV.20) :*Dosage des carbonates*

Tous les résultats des essais effectués au laboratoire sont regroupés dans le tableau suivant :

Tableau IV.2.Propriétés d'identification du sol Bordjia.

Propriétés	Symbole	Valeur
Teneur en eau (NF P94-050)	w	13,57 %
Poids volumique des grains solides (NF P94-054)	γ_s	2,66 (g/cm ³)
Masse volumique apparent humide	γ_h	1,69(g/cm ³)
Masse volumique apparent sec	γ_d	1,49(g/cm ³)
Densité humide	G	1,69
Densité sèche	G	1,49
Poids de saturation	Ps	0,32

Chapitre IV : Identification et caractérisation du sol étudié

Indice de vide	e	0,76
Porosité	n	0,8
Poids volumique déjaugé	γ'	0,69 (g/cm ³)
Degré de saturation	Sr	42,4 %
Limite de liquidité (NF P94-051)	W _L	44,44 %
Limite de plasticité (NF P94-051)	W _p	28,85 %
Indice de plasticité (NF P94-051)	IP	15,59 %
Valeur de bleu de méthylène (NF P94-068)	VBS	4 (%)
Surface spécifique totale	SST	83,72 (m ² /g)
Teneur en carbonate de calcium (NF X31-106)	CaCO ₃	21 (%)

Conclusion

Les essais d'identification ont été réalisés afin de déterminer les caractéristiques physiques et chimiques des échantillons de sol provenant de la région Bordjia Mostaganem. Sur la base de ces essais on peut déduire que :

- D'après les analyses physiques, on constate qu'il s'agit d'un sol limoneux argileux peu plastique, à faible matière organique.

Chapitre V :
Traitement électrocinétique

CHAPITRE V : traitement électrocinétique

V.1. Introduction

La gestion de la salinité des sols par les méthodes traditionnelles peut être complexe, coûteuse et longue. De nos jours, la méthode électrique est devenue l'un des processus d'amélioration des sols les plus émergents, principalement 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. Dans cette partie du travail, le traitement électrocinétique a été appliqué sur des échantillons d'argiles saturées avec de l'eau distillée, et des solutions salines. Ce processus nous a permis à la fois, l'élimination des sels dans les sols salins, ainsi que la mesure de la variation de la résistivité électrique avec les paramètres géotechniques.

V.2 Protocole expérimental

V.2.1 Préparation des échantillons sans sels

Avant de procéder au traitement électrochimique, dans un premier temps les échantillons du sol ont été séchés à l'étuve à une température de 105° C. Et dans un deuxième temps, les échantillons secs étaient broyés jusqu'à obtention d'une poudre fine. Puis, on prend une masse de sol de 12 Kg a été mélangée avec de l'eau distillée jusqu'à l'obtention d'une teneur en eau de 5% supérieure à la limite de liquidité. Le matériau est mixé pendant une heure, jusqu'à l'obtention d'une pâte homogène, puis laissé au repos pendant une 17 heures, puis placé dans le réservoir central de la cellule expérimentale.

Ensuite, deux tubes de cuivre cylindriques perforés ont été insérés dans la cellule à 2 cm des extrémités des parois transversales pour servir d'électrodes. Les expériences ont été réalisées respectivement sous un gradient de tension de 25v.

V.2.2 Dispositif expérimental

Les expériences électrocinétiques ont été menées dans une cellule de forme parallélépipédique avec des parois en verre de 8mm d'épaisseur et dont les dimensions sont les suivantes : longueur 30 cm ; largeur 10 cm et hauteur 10 cm, comprenant trois compartiments correspondant à : l'anode, l'échantillon de sol et la cathode. (FigureV.1)

Les dimensions du compartiment central de l'échantillon du sol sont de : longueur 20 cm, largeur 10 cm et hauteur 10 cm.

La cellule a été recouverte d'une plaque en plexiglas sur toute la surface des trois compartiments, avec des ouvertures de ventilation qui ont été laissées afin de permettre l'évacuation du gaz dégagé au cours du traitement.

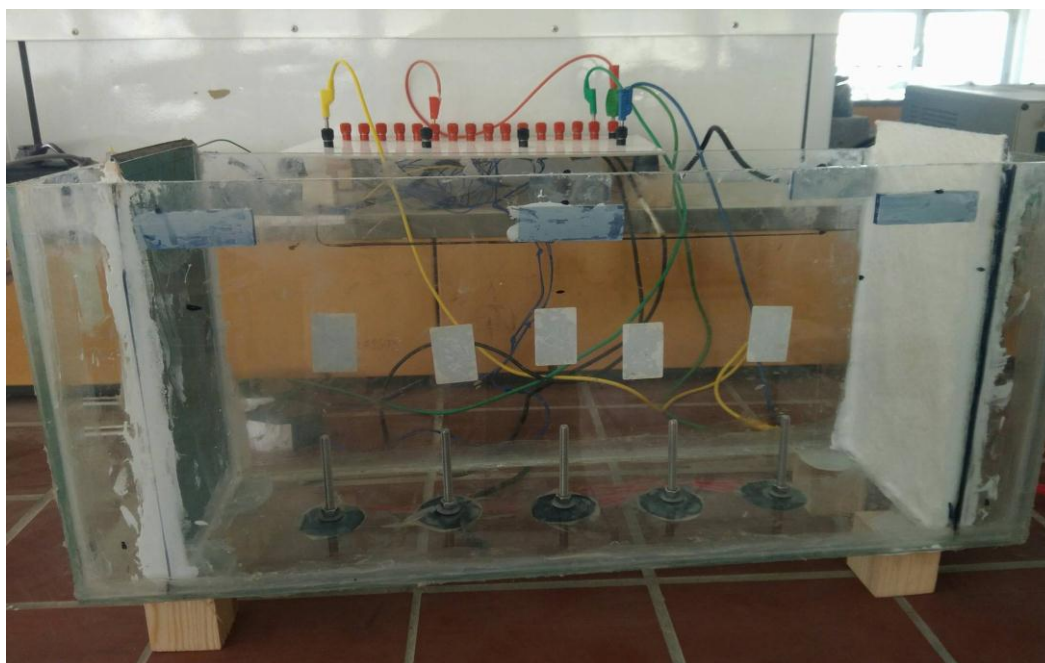


Figure (V.1) : Le dispositif expérimental de la cellule électrochimique

Pendant l'essai, les échantillons de sols étaient alimentés en continu en eau désionisée à travers l'anode, à l'aide d'un tuyau raccordé à un réservoir externe pour faciliter l'écoulement électro-osmotique. Des essais différents et successifs à des durées de 5 jours, ont été réalisés pour mesurer les différents paramètres, tels que : l'intensité du courant électrique, le flux électro-osmotique, ainsi que l'élimination des ions pour sol considéré.

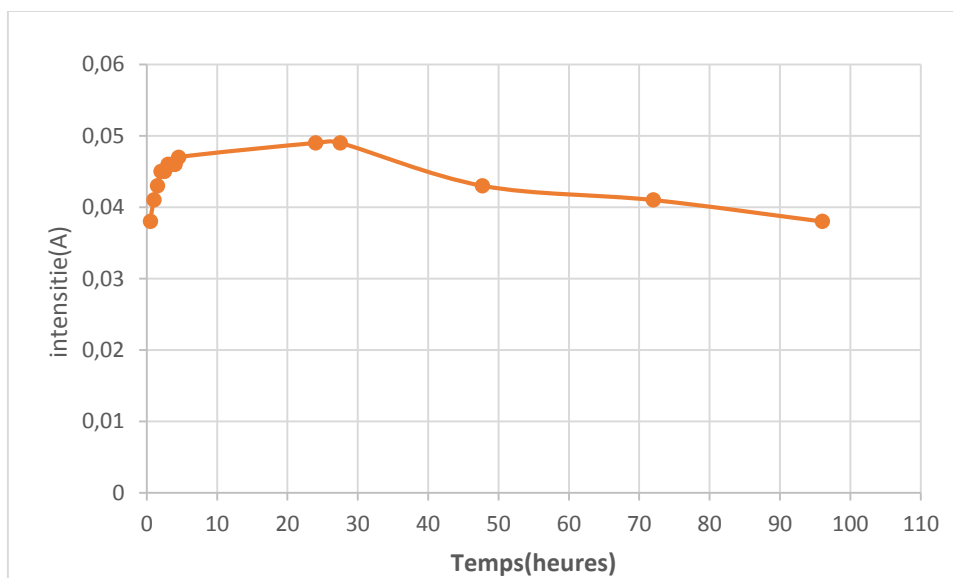
Aussi, le flux électro-osmotique contenu dans le compartiment cathodique a été collecté dans des éprouvettes graduées et mesuré quotidiennement. Sous un gradient de tension constant, l'intensité du courant a été mesurée à des intervalles de temps réguliers.



Figure (V.2) : mesure du courant électrique et du flux.

V.2. 3. Evolution de l'intensité du courant électrique

La variation de l'intensité du courant électrique en fonction de la durée du traitement, est illustrée dans la figure(V.3), ci-après.



Figure(V.3) : Variation de l'intensité du courant électrique avec le temps

Selon les résultats obtenus, on peut noter que l'intensité du courant électrique dans le sol étudié a augmentée pour atteindre une valeur maximale, puis a diminuée fortement pour atteindre enfin, une valeur constante. La raison en est que lorsque le gradient de tension a été établi, le courant électrique dans la cellule du sol était faible, car il a fallu un certain temps pour que

l'électrolyte pénètre dans un sol contaminé et pour que les contaminants et les minéraux du sol se dissolvent et se désorbent de la surface du sol. Après environ 24h d'essai, Selon Alshawabkeh&Sheahan (2003), l'augmentation du courant électrique est due à l'effet de l'électrolyse sur l'anolyte et le catholyte, pour libérer respectivement des ions hydrogènes et hydroxydes.

Cependant après 48 heures, les tendances des courants électriques semblent diminuer avec le temps, ce qui diminue la conductivité ionique et par conséquent la conductivité électrique du sol. De plus, la diminution du courant électrique est attribuée à l'interface sol-électrode, ce qui entraîne une chute de tension, comme indiqué par (Rittirong et al., 2008). De même, Liaki (2006) a noté que la variation du courant, tout au long de l'essai est due au contact du sol avec l'électrode.

V.2.4. Evolution du flux électro-osmotique

Après quelques heures de traitement, des volumes d'eau provenant de l'accumulation dans les éprouvettes des réservoirs cathodiques ont été enregistrés, puis calculés en tant que flux électro-osmotique (anode vers cathode) cumulatif à travers l'échantillon.

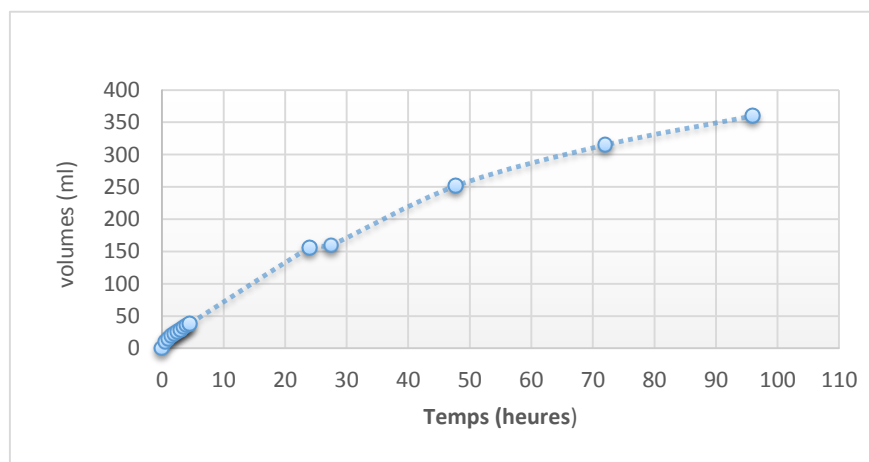


Figure (V.4) : Evolution du volume électro-osmotique cumulé au cours du traitement électrocinétique

La Figure (V.4) montre l'évolution du volume électro-osmotique avec le temps. On observe ainsi que le flux électro-osmotique augmente à la cathode avec le temps, durant tous les tests. Le flux électro-osmotique migre de l'anode à la cathode et suggère que la majorité des espèces présentes dans le sol sont des complexes anioniques ou cationiques. On peut noter que

les valeurs cumulées du flux électro-osmotique mesurées dans le compartiment cathodique, indiquent une augmentation linéaire du flux électro-osmotique au cours de la première période de l'essai.

V.2.5 Préparation des échantillons avec sels

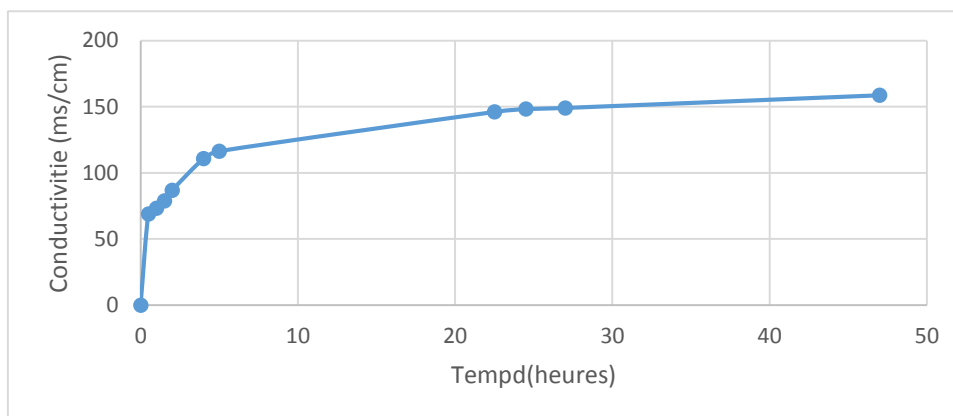
Une masse de sol de 13 Kg a été mélangée avec de l'eau distillée manuellement pour une durée d'une heure, puis laissé au repos pendant une 17 heures afin d'assurer la distribution uniforme de la teneur en eau. Une solutions saline de NaCl a été préparée en mélangeant une concentration de 0,5 mol/l de sels avec du l'eau distillée à l'aide d'un agitateur électrique pendant 15 min, pour bien diluer le sel dans l'eau.

V.2.6. Effet de la durée de traitement sur la conductivité électrique

La conductivité électrique (CE) est un paramètre pertinent, indiquant l'accumulation de sels dans l'échantillon du sol.



Figure (IV.5.) : La mesure de la conductivité électrique



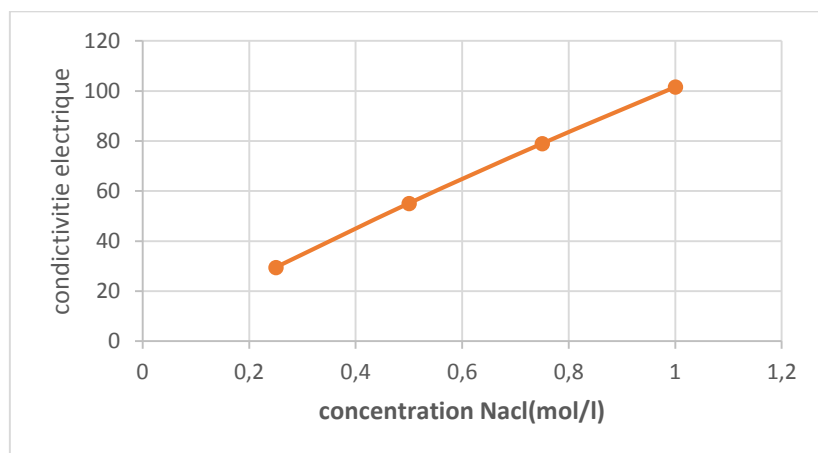
Figure(V.6) : Variation de la conductivité électrique du sol en fonction de la durée de traitement

La Figure (V.6) montre l'évolution de la conductivité avec le temps. On observe ainsi que la conductivité augmente à la cathode avec le temps. Nous constatons que les conductivités électriques sont plus élevées dans les régions près des électrodes. L'augmentation des valeurs de la CE à l'anode, est due à la génération d'ions H^+ lors de l'électrolyse de l'eau interstitielle.

V.2.7. Mesure de la conductivité électrique des solutions NaCl en fonction des concentrations :



Figure(V.7) : Préparation des solutions salines de NaCl avec différentes concentrations



Figure(V.8) : Variation de la conductivité électrique en fonction de la concentration.

On peut observer à partir de cette figure que la conductivité électrique des solutions de chlorure de sodium augmente avec l'augmentation de la concentration en sels

V.3.CONCLUSION

La méthode de traitement électrocinétique se base sur la mobilité et le transport des espèces ioniques chimiques (sels) à travers l'échantillon de sol étudiés, en appliquant un champ électrique favorisant leur extraction. Tous les essais ont été menés en utilisant une cellule expérimentale développée au Laboratoire de l'Université de Mostaganem. Cette cellule a été équipée d'un système d'acquisition automatique des données.

L'expérimentation a été réalisée par l'application d'un gradient de potentiel de 25V. Les paramètres considérés dans cette étude sont comme suit : l'intensité du courant électrique, la conductivité électrique, le flux et temps de traitement.

L'écoulement électro-osmotique cumulatif a montré une augmentation nette du flux, en raison de la mobilisation et la solubilisation des sels, sous traitement électrochimique. La conductivité électrique est affectée par le transport des solutés, présentant des valeurs élevées à proximité des électrodes. On peut aussi déduire qu'il existe une relation entre la résistivité électrique et la salinité des sols. La conductivité électrique dans un milieu particulière se produit par le mouvement des ions à travers l'eau des pores électrolytiques dans le vide et la charge de surface.

Conclusion générale

Conclusion générale

Dans ce mémoire de master, on s'est intéressé à l'étude de la technique de traitement électrocinétique qui permet la restauration et la remédiation des sols salins. Cette méthode de traitement se base sur la mobilité et le transport des espèces ioniques chimiques (sels) à travers l'échantillon de sol étudié. Les essais ont été menés en utilisant une cellule expérimentale développée au Laboratoire de l'Université de Mostaganem. Cette cellule a été équipée d'un système d'acquisition automatique des données.

L'expérimentation a été réalisée par l'application d'un gradient de potentiel de 25 volts. Les paramètres considérés dans cette étude sont comme suit : flux d'eau, intensité du courant électrique, conductivité électrique et temps de traitement.

L'écoulement électro-osmotique cumulatif a montré une augmentation nette du flux, en raison de la mobilisation et la solubilisation des sels, sous traitement électrochimique. Cependant, au cours du traitement, cette tendance a montré une diminution significative, en raison de la migration de l'eau et l'épuisement de la disponibilité des ions, ainsi que la prépondérance d'un front alcalin.

D'après les essais les résultats obtenus pour le sol étudié en fonction des durées de traitement, il ya lieu de noter que :

Le flux électro-osmotique de sol qui diminue.

L'augmentation du temps de traitement conduit à une meilleure élimination.

D'autres essais devront être effectués afin d'approfondir cette étude.

Références bibliographiques

Références bibliographiques

Aubert, G. (1975). Les sols sodiques en Afrique du Nord. *Annales de l'INA.*, Alger, pp 185-195.

Acar, Y. B., & Alshawabkeh, A. N. (1993). Principles of electrokinetic remediation. *Environmental Science & Technology*, 27 (13), 2638-2647.

Alshawabkeh, A.N., & Sheahan, T.C. (2003) "Soft soil stabilisation by ionic injection under electric fields." *Ground Improvement*, vol. 7, 177-185

Baize, D. (2000). Guide des analyses en pédologie: choix - expression, présentation – interprétation. Ed : INRA, Paris, 257p.

Bell, F.G., (1978). Méthodes de traitement des sols instables. Editions Eyrolles, France, 240p.

Ben Hassine, H. (2005). Effets de la nappe phréatique sur la salinisation des sols de cinq périmètres irrigués en Tunisie. *Étude et Gestion des Sols*, Vol.12, pp 281-300.

Bensaada, K. (2015). Etude du développement et architecture racinaire de plantules de palmier dattier sous stress salin. Thèse de Magistère, 85p

Bultel, F. (2001), "Prise en compte du gonflement des terrains pour le dimensionnement des revêtements des tunnels". Thèse doctorat de l'école nationale des ponts et chaussées

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

Cherbuy, B. (1991). Les sols salés et leur réhabilitation .Etude bibliographique. 124p

Chesworth, W. (2008). *Encyclopedia of Soil Science*, Ed. Springer Dordrecht, Berlin, 902p

IRD. (2008). Les dossiers thématiques de l'Institut de recherche pour le développement. Les sols sont fragiles. 21p.

Claude Michel, G., Christian, W., Jean-Claude, R., Jacques, B., et Jean-Louis, M. (2005). *Sols et environnement*. Sciences Sup, Edition Dunod. Paris.

Daoud, Y. (1993). Contribution à l'étude des sols plaines du chelif. Le phénomène de salinisation, conséquences sur les propriétés physiques des sols argileux, thèses Doct d'Eta. INA Alger, 233p

Duchaufour, P. (1977). Pédologie .Tome 1,Ed .Masson ,Paris ,477p

Duchaufour, P. (1983). Pédologie 1 : Pédogenèse et classification : Constituants et propriétés du sol. Éditions Masson, Paris., 459p.

Durand, J. H. (1983). Les sols irrigables. Etude pédologique. Ed. Imprimerie Boudin, Paris, 339 p.

FAO., (1972). La salinité ; Séminaire de Bagdad 272p.

Hamdan, S.H., Molelekwa, G.F., Bruggen, B.V. (2014). Electrokinetic remediation technique: an integrated approach to finding new strategies for restoration of saline soil and to control seawater intrusion. ChemElectroChem 1, 1104–1117 .

Halitim, A. (1988). Sol des régions arides d'Algérie. O.P.U., Alger, 384p

INSID. (2008).Les sols salins en Algérie. Institut national des sols, de l'irrigation et du drainage.

Jayasekera, S. (2007). Stabilising volume change characteristics of expansive soils using electrokinetics: a laboratory based investigation. In: International conference in geotechnical engineering, Colombo, Sri Lanka

Kloppmann, W., Bourhane, A., Asfirane, F. (2011). Méthodologie de diagnostic de l'origine de la salinité des masses d'eau, BRGM, Orléans, 123p

Liaki, C. (2006) "Physicochemical study of electrokinetically treated clay soils using carbon and steel electrodes." PhD thesis, University of Birmingham, UK.

Liaki, C., Rogers, C.D.F. & Boardman, D.I. (2010) "Physico-chemical effects on clay due to electromigration using stainless steel electrodes." Journal of Applied Electrochemistry 40:1225-1237.

Lukman, S., Mu'azu, N.D., Essa, M.H., Usman, A. (2015). Optimal removal of cadmium from heavily contaminated saline–sodic soil using integrated electrokinetic adsorption technique. Arab. J. Sci. Eng. 40, 1289–1297 .

Maillard, J. (2001). Le point sur l'Irrigation et la salinité des sols en zone sahélienne. Risqueset recommandations. Handicap International. Novembre 2001, 34 p.

Mathieu, C., Pieltain, F. (2003). Analyse chimique des sols, méthodes choisies. Ed. Tec & Doc, Lavoisier. 388p.

Mitchell, J. K., & Yeung, A. T. (1990). Electro-kinetic flow barriers in compacted clay. Transportation Research Record (1288).

Mitchell, J.K., Soga, K. (2005). Fundamentals of soil behavior, (3rd Edition). John Wiley & Sons Inc, New York, USA

Rittirong, A., Douglas, R.S., Shang, J.Q. & Lee, E.C. (2008) "Electrokinetic improvement of soft clay using electrical vertical drains." *Geosynthetics International*, 15, No. 5, 369-381.

Shahbaz, M., Ashraf, M. (2013). Improving salinity tolerance in cereals. *Crit. Rev. Plant Sci.* 32:237–249.

Shapiro, A.P. and Probstein, R.F. (1993) Removal of contaminants from saturated clay by Electroosmosis. *Environmental Science and Technologie*, 27, 283–91.

Szabolcs J., 1986 - Agronomical and ecological impact of irrigation on soil and water salinity. *Advances in Soil Science*. Volume 4 : 189-218.

Tabet, D.H. (1999). Intérêt d'une approche spatiale par suivi de la salinité des sols dans les systèmes irrigués. Cas de la subdivision de Panjab (Pakistan). Thèse Doctorat ENGREF, Montpellier, 435p.

U.S.S.L. (Unated State Salinity Laboratory Staff). (1954). Diagnosis and improvement of saline and alkali soils, US Department of Agriculture, Handbook n°60, U. S. Gov. Print. Office, Washington DC, 159p.

Wise, D. L. (2000). Remediation engineering of contaminated soils . New York.