



وزارة التعليم الالى و البحث العلمي  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique  
جامعة عبد الحميد بن باديس  
Université Abdelhamid Ibn Badis de Mostaganem  
كلية العلوم و التكنولوجيا  
Faculté des Sciences et de la Technologie



## MEMOIRE DE FIN D'ETUDE

Filière : génie civil

Spécialité : structure

### *Thème*

*Influence de la bentonite sur les propriétés mécaniques  
des sols sableux  
Recherche bibliographique et étude de cas sur le sable de  
kharrouba*

Présenté par :

**BENAMER Ghania Fedoua**

**DENOUNE Bouchra**

*Soutenu le 25/06/2023 devant le jury composé de :*

**Président : Pr LAREDJ.N**

**Examineur : Dr MOSTEFA. F**

**Encadrant : Mr KERAOUTI.R**

**Année Universitaire : 2022/2023**



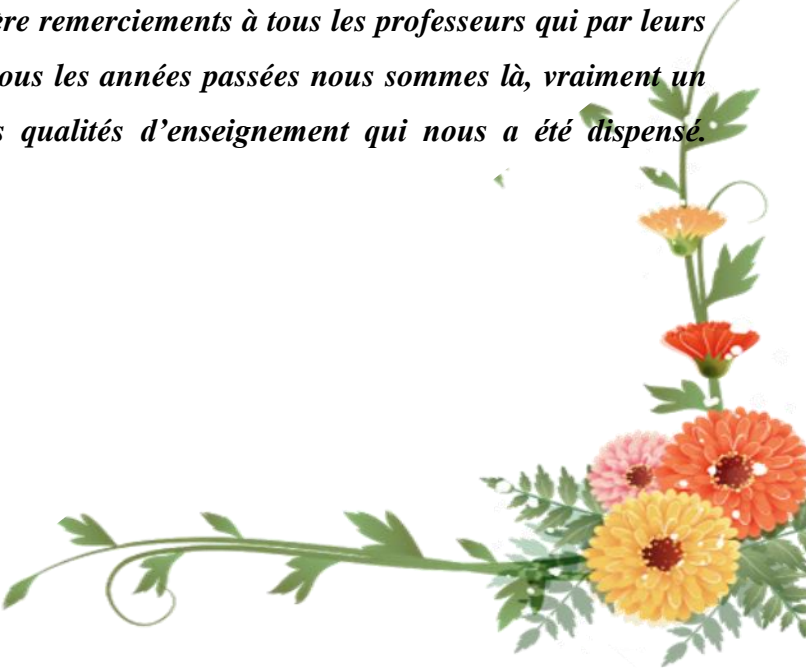
# Remerciement

*Tous d'abord nous tenons à remercier le bon Dieu tout puissant et miséricordieux de nous avoir donné la force et le courage de mener à bien ce modeste travail.*

*Nous exprimons nos profondes gratitude et respectueuses reconnaissances à notre encadrant Monsieur KERAOUTI Rabah pour son encadrement, conseils et sacrifices afin de donner le meilleur et pour son suivi durant la période de préparation de notre mémoire d'afin d'étude.*

*Nos remerciements vont aux membres du jury Mme LAREDJ.N et Mme MOSTEFA. F qui nous ont fait l'honneur d'accepter de jurer notre modeste travail.*

*Nous adressons nos sincère remerciements à tous les professeurs qui par leurs conseils et leurs efforts durant tous les années passées nous sommes là, vraiment un grand remerciement pour leurs qualités d'enseignement qui nous a été dispensé.*





# Dédicace

*En témoignage d'amour et d'affection, je dédie ce modeste travail avec une grande fierté à tous ceux qui me sont chers :*

*\*Ma très chère mère, qui a œuvré pour ma réussite, de par son amour, son soutien, tous les sacrifices consentis et ses précieux conseils, pour toute son assistance et sa présence dans ma vie.*

*\* Mon très cher père, qui peut être fier et trouver ici le résultat de longues années de sacrifices et de privations pour m'aider à avancer dans la vie.*

*\*\*Que Dieu vous protège et que la réussite soit toujours à ma portée pour que je suis puisse vous combler de bonheur.*

*\*Mon chère frère KADA ET OMAR et mes belles sœurs ASMA et AYCHA ET TIMA puisse Dieu vous donne santé, bonheur et réussite.*

*\*MES AMIES mon modèle merci pour tous ce que tu me donne.*

*\* Ma cher binôme DENOUN BOUCHRA*



# Dédicace

*Je dédie ce modeste travail à mes plus chers êtres au monde :*

*A mes chers parents : ma mère et mon père pour leur amour, leur tendresse, et pour leur soutien durant toutes les étapes de ma vie. J'espère qu'un jour, je pourrai leur rendre un peu de ce qu'ils ont fait pour moi, que Dieu leur prête tout le bonheur.*

*A mon cher frère et mes belles sœurs. Pour leurs encouragements et pour leur soutien moral et physique.*

*A ma chère binôme : BENAMER Ghania Fedoua .*

*A mon très cher marie*

*A tous ce qui ont enseigné moi au long de ma vie scolaire. Pour tout leur amour, leur soutien, leur encouragement, leur assistance et leur présence dans ma vie.*

*A toute mes chers amis*

*Merci de votre présence, soutien et de m'avoir encouragée à aller plus loin.*

*A tous les autres que je n'ai pas cités mais à qui je pense aussi.*

*A toute ma famille*

.



## Liste des figures

Figure 01	Caractéristiques des sols sableux .....	4
Figure 02	Les sols sableux se forment par l'érosion .....	5
Figure 03:	Région de Mostaganem .....	10
Figure 04:	vue a l'échelle microscopique des grains de sable de kharrouba.....	15
Figure 05:	analyse granulométrique du sable de kharrouba .....	16
Figure 06:	Courbe de la limite de liquidité et plasticité .....	23
Figure 07 :	Structure de la montmorillonite .....	25
Figure 08:	pourcentage cumulés.....	30
Figure 09 :	Types de compactage de surface [Lawton, 2004].....	31
Figure 10:	Chantier d'un compactage dynamique profond. ....	32
Figure 11:	Vibrocompactage. ....	38
Figure 12:	Courbe contrainte-déplacement du sol naturel 0% de Bentonite .....	38
Figure 13:	Courbe contrainte-déplacement du SN+2% Bentonite .....	39
Figure 14:	Courbe contrainte-déplacement du SN+4% Bentonite .....	39
Figure 15:	Courbe contrainte-déplacement du SN+6% Bentonite .....	46
Figure 16:	Courbe contrainte-déplacement du SN+8% BENTO .....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
Figure 17:	Courbes contrainte-déplacement de comparaison entre sol naturel et traités sous la charge de 60 KGF.....	40
Figure 18 :	Courbes contrainte-déplacement de comparaison entre sol naturel et traités sous la charge de 80 KGF.....	41
Figure 19:	Courbes contrainte-déplacement de comparaison entre sol naturel et traités sous la charge de 120 KGF.....	41
Figure 20:	Evolution l'angle de frottement en fonction de la teneur en Bentonite .....	42
Figure 21:	Evolution de la cohésion t en fonction de la teneur en Bentonite.....	42
Figure 22:	Evolution de la cohésion t en fonction de la teneur en Bentonite.....	

## Liste des tableaux

Tableau 01: identification classification du sol .....	12
Tableau 02 : Pourcentage moyen en éléments présents dans l'argile.....	20
Tableau 03: Paramètres intrinsèques des sols. ....	37

## Table des matières

INTRODUCTION GENERALE.....	2
Introduction générale.....	3
Chapitre I.....	5
I.1 Introduction :.....	6
I.2 Amélioration et renforcement du sol.....	6
I.3 Les différentes techniques.....	7
I.3.1.Amélioration des sols, sans adjuvant, pour sols pulvérulent et remblais.....	7
I.3.2.Amélioration des sols, sans adjuvant, pour sols cohérents.....	8
I.3.3.Amélioration des sols, avec adjuvant ou inclusions, pour sols pulvérulent et remblais.....	8
I.3.4.Amélioration des sols avec injections.....	9
II.4.Conclusion.....	13
Chapitre II.....	15
Recherche bibliographique sur les sols sableux.....	15
II.1 Introduction :.....	15
II.2 Caractéristiques des sols sableux :.....	16
II.3 Formation des sols sableux :.....	17
II.4 Utilisation des sols sableux.....	17
II.5 Les sols sableux :.....	18
II.6 les propriétés géotechniques des sols sableux.....	18
II.7 Conclusion.....	19
Chapitre III.....	20
Caractérisation et identification du sol sableux de kharrouba.....	20
III.1 Introduction :.....	21
III.2 localisations du site de prélèvements :.....	21
III.3 Matériaux utilisés :.....	22
III.4 Caractéristiques physiques du sable de Kharrouba :.....	23
III.4.1 Détermination des caractéristiques physiques :.....	23
III.4.1.1 teneur en eau initiale :.....	23
III.4.1.2 Masse volumique absolue/Apparente :.....	24
III.4.1.3Masse volumique des particules solides $\rho_s$ :.....	24
III.4.1.4 masses volumiques humides :.....	25
III.4.1.5 masse volumique sec :.....	25

III .4.2. Caractéristiques dimensionnelles : .....	26
III .4.2.1 Indice des vides : .....	26
III .4.2.2 la porosité : .....	26
III.4.3 Masse volumique minimale est maximale.....	26
III.4.1.3 Analyse granulométrique : .....	27
III.5 Déterminations de la perméabilité.....	29
III.6 Valeur du bleu de Mytilène .....	30
III.7 Conclusion : .....	31
Chapitre IV .....	32
Identification et classification de la bentonite de M <sup>z</sup> zila -Mostaganem.....	32
IV.1 Introduction : .....	33
IV.2 Structure des sols argileux et liaisons structurelles .....	34
IV.3 La bentonite : .....	37
IV.4 Origine de la bentonite : .....	37
IV.5 Structures de la bentonite : .....	38
IV.6 La Bentonites de Mostaganem : .....	39
IV.6.1 Introductions : .....	39
IV.6.2 Analyse granulométrique : .....	39
IV.6.3 Propriétés physiques et mécaniques de la bentonite de Mostaganem .....	40
IIV.6.3.1 Propriétés physiques : .....	41
IV.7 Conclusion.....	42
Chapitre V .....	43
Effet de la bentonite sur les paramètres intrinsèques du sol ( $c$ ; $\varphi^\circ$ ) .....	43
V.1 Introduction : .....	44
V.2 Mode Opératoire : .....	44
V.3 Résumé des résultats obtenus : .....	44
.....	50
V.4 Interprétation des résultats : .....	52
CONCLUSION GENERALE ET RECOMMANDATIONS .....	54
CONCLUSION GENERALE ET RECOMMANDATIONS : .....	55
BIBLIOGRAPHIE .....	56
Les références bibliographiques .....	58



# INTRODUCTION GENERALE

## Introduction générale

Le domaine du génie civil est un domaine très large, Il concerne un ensemble de disciplines, parmi lesquelles on peut citer la géotechnique, le calcul des structures et l'étude des matériaux de construction, Ces disciplines permettent la sécurité des ouvrages d'une part et leurs économies d'autre parts (réaliser au moindre coût).

Le mot « géo » indique le «sol » ; La géotechnique est donc l'ensemble des techniques qui permettent d'étudier un sol afin d'éviter la majeure partie des dégâts et accidents qui seront éventuellement dus à l'inadaptation de l'ouvrage au site. C'est la résolution de tous les problèmes induits par le sol ; Elle comprend l'étude des propriétés physique, mécanique et hydraulique de sol. Elle concerne les travaux de construction, la maintenance et la réparation de tout type d'aménagement et d'ouvrage-routier, voie ferrée, canal, aménagement de montagnes, de cours d'eau et du littoral, pont et viaduc, tunnel, barrage, puits et forage, carrière, immeuble, etc., l'exécution de tout type de travaux de terrassement, fondation, drainage... dans tout type de site qu'il soit terrestre, fluvial ou maritime.

L'étude du sol est intéressante puisque le sol est souvent le support de l'ouvrage considéré, et reçoit les charges transmises par la structure de l'ouvrage ou bien les matériaux constructifs dans un projet, le sol est un ensemble des minéraux de différentes tailles, il peut être classé à partir de la dimension des grains (grossier et fin), le comportement mécanique (cohérent et pulvérulent) et son état Hydraulique (perméable et imperméable) .... etc.

Les sols fins sont les sols qui présentent le plus de dégâts particulièrement quand ils sont en présence d'eau, ils sont caractérisés par un comportement compliqué, parmi les sols fins on a la bentonite, largement utilisée dans de nombreux secteurs industriels, la bentonite joue généralement le rôle d'un composant «viscosifiant» dans les boues de forage des puits ou pieux sous le nom «boue bentonite» on la trouve dans les couches imperméables puisqu'elle est imperméable et parfois utilisée dans l'industriels et dans les produits esthétiques.

Nous présentons dans ce modeste travail de recherche le sujet d'amélioration des

sols qui s'articulant autour de cinq chapitres. D'abord, nous présentons dans le premier chapitre une recherche bibliographique sur les sols sableux ; ensuite nous abordons un deuxième chapitre l'amélioration des propriétés mécaniques des sols puis un troisième chapitre sur les propriétés du sable de kharrouba, un quatrième chapitre sur la bentonite de Mostaganem et à la fin un dernier chapitre sur l'effet de la bentonite sur les paramètres intrinsèques du sol et en fin la conclusion et les recommandations

# Chapitre I

## Amélioration et renforcement des sols

## I.1 Introduction :

*Le renforcement des sols est un domaine récent et particulier de l'amélioration des sols ; le concept de sol renforcé a été utilisé pour la première fois par Henri Vidal, dans la technique de la terre armée qu'il inventée et développée au début des années 60.*

*Ce concept a depuis été étendu par d'autres auteur à des techniques variées telles que : micropieux, colonnes ballastées, colonnes en sol stabilisé, clouage des sols, texsol, membranes, etc.....*

*L'aménagement de sol de qualité médiocre est de plus en plus nécessaire, contenu de la croissance de l'humanité et de ses activités ; certains types de sol, jusqu'à la délaissé, car présentant des caractéristiques mécaniques faible doivent être renforcés pour assurer la stabilité des édifices et des infrastructures de génie civil qu'ils sont appelés à porter.*

## I.2 Amélioration et renforcement du sol

*De manière générale, l'objectif des procédés de renforcement et amélioration du sol est de conférer à celui-ci de nouvelles caractéristiques générales et /ou locales afin que des fondations de type superficielles ayant un comportement prévisible, justifiable et compatible avec les règlements et tolérances puissent être envisagées.*

*Quel que soit le projet, le constat de la performance doit être considéré en analysant le degré de renforcement su sol et le comportement de celui-ci par rapport à une situation sans renforcement de sol.*

### I.3 Les différentes techniques

#### I.3.1. Amélioration des sols, sans adjuvant, pour sols pulvérulents et remblais

- *Compactage dynamique et substitution dynamique*
- *Vibrocompactage Compactage*
- *Compactage à l'explosif*

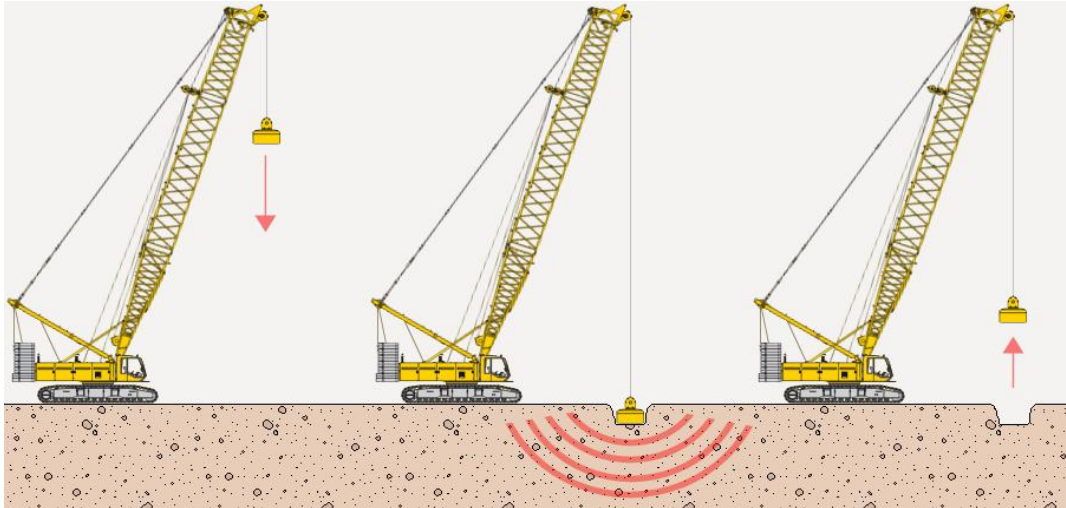


Figure II. : compactage dynamique

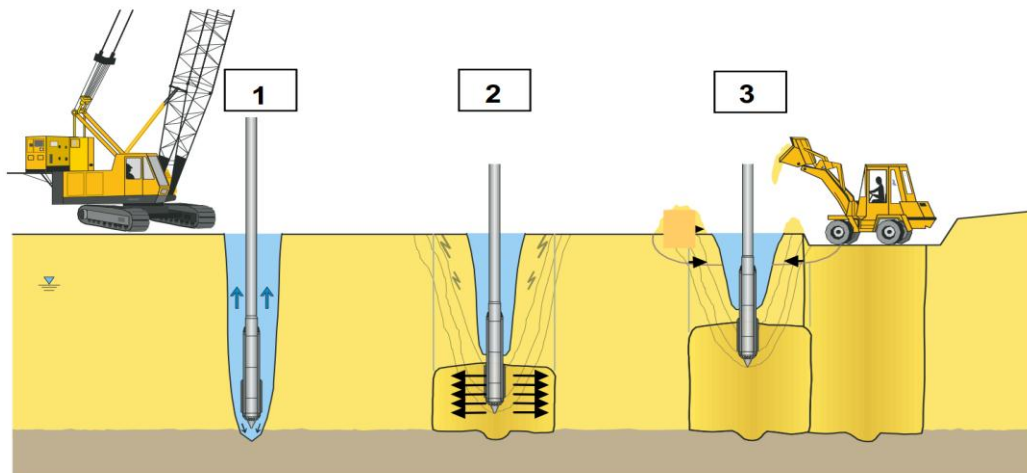


Figure I.2 : vibro-compaction

### I.3.2. Amélioration des sols, sans adjuvant, pour sols cohérents

- *Remplacement, allègement, compensation*
- *Préchargement avec remblai avec ou sans drains*
- *Consolidation atmosphérique*

### I.3.3. Amélioration des sols, avec adjuvant ou inclusions, pour sols pulvérulents et remblais

- *Colonnes ballastées*
- *Inclusions rigides verticales*
- *Géosynthétiques*

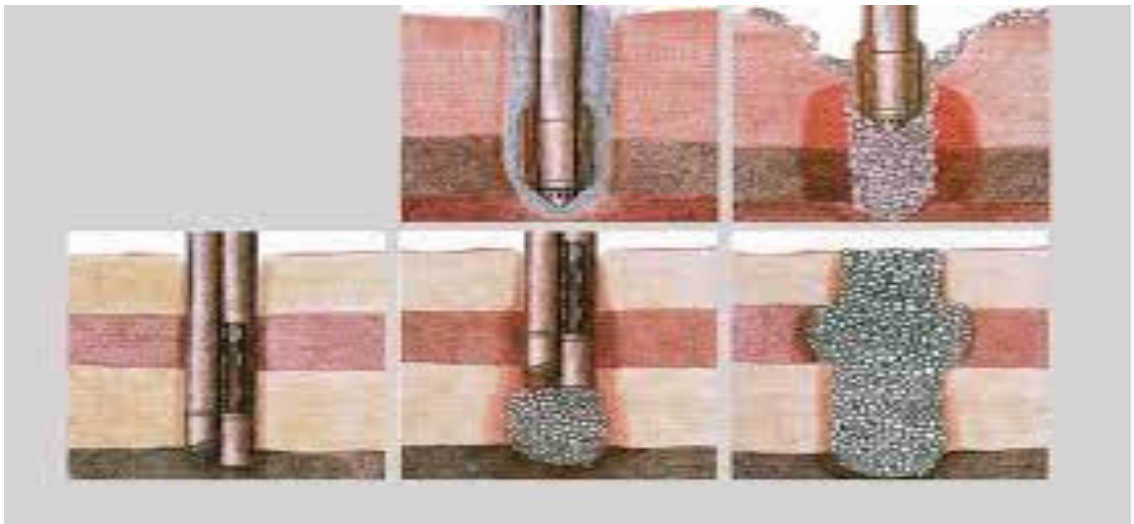
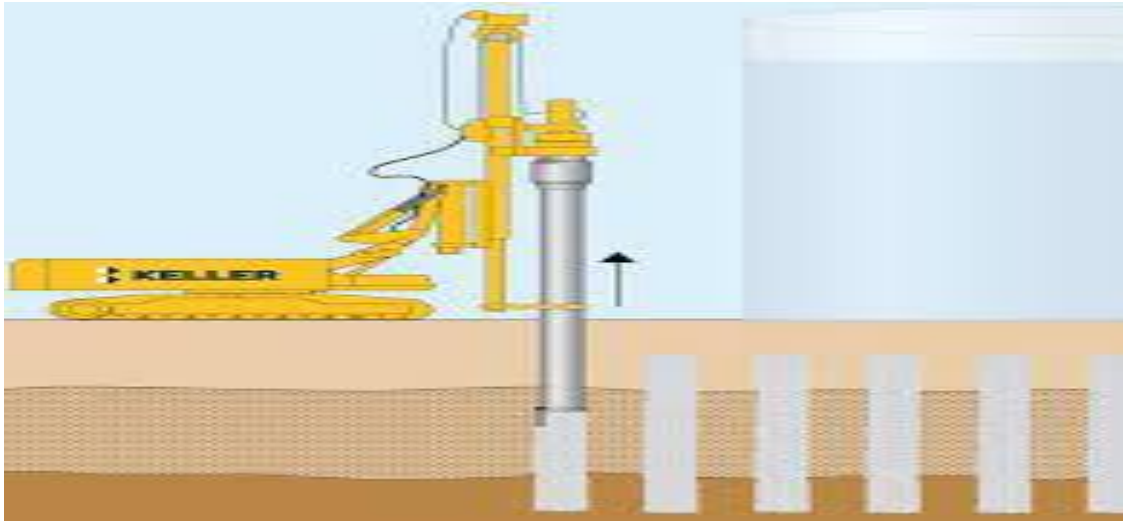


Figure I.3 : colonnes ballastées



*Figure I.4 : inclusions rigides verticales*

#### I.3.4. Amélioration des sols avec injections

- *Méthodes biologiques*
- *Injections ciment et chimiques*
- *Sol ciment (Jet grouting)*
- *Injection solide*
- *Injection de résine expansive*

*Autres techniques du domaine des terrassements*

*Traitement chaux/chaux ciment (Luis Carpinteiro ;2018). Amélioration et renforcement des sols présentation.*



**Tableau I.1 : Récapitulatif des retours d'expérience des principaux procédés**

Procédé	Type De sol	Profondeur Maximale du traitement	Disposition et maillage	Caractéristiques améliorées	Avantages	Inconvénients et limites d'utilisation	Fiabilité du procédé
<b>Vibro-Compactage</b>	Sables, Sable très légèrement limoneux, graviers	> 30 m	Maille carrée et triangulaire Maille de 4 à 10m	$D \geq 80 \%$ $q_c \geq 10-15 \text{ MPa}$	Economique Efficacité éprouvée Uniformité en profondeur	Peu adapté dans les blocs Vibration Dégagement exigé	Très bonne
<b>Compactage dynamique</b>	Sables et sables limoneux, graviers	5 à 7 m	Maille carrée ou triangulaire Maille de 4 à 16 m	$D \geq 80 \%$ $q_c \geq 15 \text{ MPa}$	Economique Efficacité éprouvée Adapté dans les sols hétérogènes avec blocs	Profondeur limitée et effet du compactage décroissant en profondeur Vibration Dégagement exigé	Faible à très bonne en fonction de la profondeur
<b>Drains de graviers vibrés</b>	Sables et sables limoneux	> 20 m	Maille carrée ou triangulaire Maille de 3 à 9 m	Réduction des pressions interstitielles	Economique et adapté pour traverser des horizons compacts	Augmentation des caractéristiques du sol en place faible	Très bonne
<b>Drains plats</b>	Tous types de sols	> 20 m	Maille 1 à 2,25 m	Réduction des pressions interstitielles	Economique	Faible transmissivité Efficacité dans le temps pas assurée	Faible
<b>Injection solide (compactage horizontal statique)</b>	Tous le sols	> 20 m	Maille carrée ou triangulaire de 1 à 4,5 m d'espacement, et habituellement de 1,5 à 2 m	$D \geq 80 \%$ $(N1)_{60} = 25$ $q_c \geq 10 \text{ à } 15 \text{ MPa}$ (en fonction du type de sol)	Utilisé dans les sols fins Pas de vibration Foreuse de petit gabarit	Rendement faible	Bonne

**Tableau I.2 : Récapitulatif des retours d'expérience des principaux procédés**

RENFORCEMENT PAR INCLUSIONS SOUPLES							
Procédé	Type De sol	Profondeur Maximale du traitement	Disposition et maillage	Caractéristiques améliorées	Avantages	Inconvénients et limites d'utilisation	Fiabilité du procédé
<b>Colonnes ballastées</b>	Sable limono-argileux, limon argileux, argile	> 20 m	Maille carrée et triangulaire Esp. 1,5 à 3 m	$q_c > 10 \text{ MPa}$ $P_1 > 1,2 \text{ MPa}$	Efficacité éprouvée, renforcement de sol et drainage	Equipement spéciale peu adapté dans galets et blocs et matériaux fluants	Très bonne

<b>Plots ballastés</b>	Sable limono-argileux, limon argileux	4 – 5 m	Maille carrée et triangulaire Esp. 3 à 5 m	$q_c > 10 \text{ MPa}$ $P_1 > 1,2 \text{ MPa}$	Efficacité éprouvée, renforcement de sol et drainage	Profondeur limitées, vibration, dégagement exigé Peu adapté dans les matériaux fluants	Très bonne
<b>RENFORCEMENT PAR INCLUSIONS RIGIDES</b>							
<b>Inclusions béton ou mortier de petit diamètre</b>	La plupart des sols	40 m	Maille carrée ou triangulaire de 3 à 9 m	Dépend du mortier ou de béton (E variable de 5 à 10 000 MPa)	Réduit fortement les tassements	Ne traite pas la liquéfaction Armature à envisager dans certain cas	Faible à moyenne
<b>Inclusions de sol traité aux liants (Deep Soil Mixing)</b>	La plupart des sols	20 m	Paroi disposée en alvéoles	Dépend de la taille, de la résistance et de la configuration des éléments	Confinement du sol liquéfiable, résistance fonction du sol et du dosage en liants	Sols fortement organiques et blocs	Bonne
<b>Jet Grouting</b>	Tous les sols, mais difficultés dans les argiles plastiques	Pas de limites	Dépend de l'application en paroi ou en colonnes taux de substitution de 15 à 25 %	« Solidification » du sol selon la taille, la résistance et la configuration des éléments injectés	Sols fins, forage de petit diamètre pouvant être incliné, petite foreuse	Rendement faible	Bonne

**Tableau I.3 : Domaine d'application des principaux procédés**

Méthodes	TYPES DE SOLS					
	Matériaux évolutifs tourbe	Argile très moles	Argiles-limons compressibles	remblais fins	Sables / graviers	Cailloux remblais à blocs
Amélioration de sol dans la masse	PRECHARGEMENT + DRAINAGE					

		VIBROCOMPACTAGE	
		COMPACTAGE DYNAMIQUE	
		INJECTION SOLIDE	
Renforcement des sols par inclusions souple		COLONNES BALLASTEES	
		PLOT BALLASTES	
Renforcement des sols par inclusions et éléments rigides			
		DE TYPES PIEUX A RENFORCEMENT/ SANS REFOULEMENT ET JET GROUTING	
		DE TYPES COLONNES DEEP SOIL MIXING	

## II.4.Conclusion

*Devant les problèmes des sols à faible capacité portante, et la rareté des bon sols l'ingénieur doit trouver des solutions innovantes pour pallier aux problèmes de liquéfaction, tassement et destruction des bâtis.*

*La difficulté de ces solutions ne se situe pas dans le dimensionnement, puisque les règles usuelles de calcul des fondations superficielles sont utilisées, mais par contre le choix de la technique la plus appropriée et les moyens à mettre en œuvre pour arriver aux objectifs de compacité escomptée.*

# Chapitre II

## Recherche bibliographique sur les sols sableux

### II.1 Introduction :

*Le sable est l'un des types de sol les plus courants dans le monde, couvrant environ 20% de la surface terrestre. Les sols sableux présentent des caractéristiques uniques en termes de propriétés*

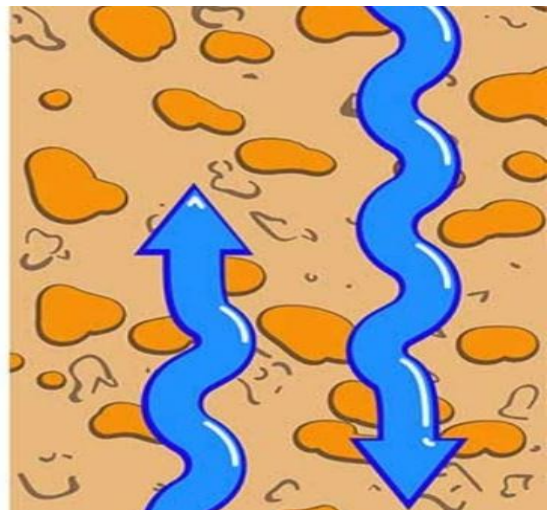
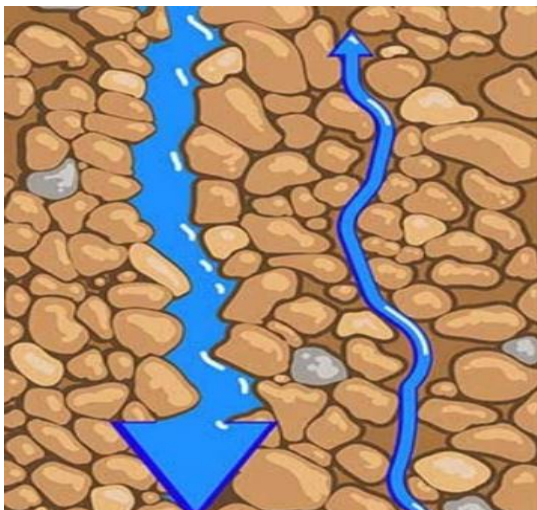
*physiques et mécaniques qui ont un impact significatif sur leur utilisation dans différents domaines.*

*Cette recherche bibliographique a pour objectif de présenter une synthèse des connaissances actuelles sur les sols sableux, en se concentrant sur les caractéristiques des sols, leur formation, leur utilisation et les différentes techniques d'amélioration des propriétés des sols sableux, en particulier l'utilisation de la bentonite (Du Broeucq. J .2004).*

## II.2 Caractéristiques des sols sableux :

Les sols sableux se caractérisent par leur granulométrie, leur porosité, leur densité, leur perméabilité, leur résistance et leur compressibilité.

- La granulométrie est l'une des propriétés les plus importantes des sols sableux car elle influence directement la perméabilité, la résistance et la compressibilité.
- La porosité des sols sableux est relativement élevée en raison de la taille des grains, ce qui leur confère une capacité de drainage rapide.
- La densité des sols sableux est relativement faible, ce qui les rend plus perméables et moins résistants à la charge.
- Enfin, les sols sableux ont une faible capacité de rétention d'eau et sont donc plus susceptibles à la sécheresse.



## Figure II.1 Caractéristiques des sols sableux

### II.3 Formation des sols sableux :

Les sols sableux se forment par l'érosion, le transport et l'accumulation de sédiments, qui peuvent provenir de différentes sources, telles que les rivières, les lacs, les glaciers ou les déserts. Les processus environnementaux qui influencent la formation des sols sableux comprennent le climat, la topographie, la végétation et les mouvements tectoniques.

Il existe plusieurs types de sols sableux, notamment les sols de dunes, les sols de plage, les sols de fonds de vallées et les sols de collines. Chacun de ces types présente des caractéristiques uniques en termes de granulométrie, de densité et de perméabilité *(Du Broeucq. J .2004)*.



Figure II.1 Les sols sableux se forment par l'érosion

### II.4 Utilisation des sols sableux

Les sols sableux ont de nombreuses utilisations dans différents domaines, tels



que la construction, l'agriculture, l'extraction de ressources naturelles et la production d'énergie. En construction, les sols sableux sont utilisés comme matériaux de remplissage, de remblai ou pour la construction de fondations. En agriculture, les sols sableux sont utilisés pour la culture de légumes, de fruits et de plantes de serre.

L'extraction de ressources naturelles telles que le pétrole, le gaz ou les minéraux peut également se faire dans des sols sableux. Toutefois, ces utilisations peuvent avoir des impacts environnementaux négatifs, tels que la dégradation des sols et la destruction de l'habitat naturel *(Du Broeucq. J .2004)*.

#### II.5 Les sols sableux :

Sont des sols caractérisés par une forte proportion de grains de sable, qui sont des particules minérales de taille comprise entre 0,063 et 2 mm Ils peuvent être trouvés dans divers environnements, notamment les plages, les déserts et les zones côtières, ainsi que dans les terres agricoles et les sites de construction *(Le Boissonnais, Y., & Daroussin, J ; 1999)*.

#### II .6 les propriétés géotechniques des sols sableux

Les sols sableux ont des propriétés géotechniques : spécifiques qui les rendent adaptés à certaines applications de construction et de génie civil. Par exemple, en raison de leur faible capacité de rétention d'eau, les sols sableux peuvent être utilisés pour la construction de fondations de bâtiments et d'infrastructures qui nécessitent une bonne capacité de drainage.

Cependant, les sols sableux présentent également des limites en termes de stabilité et de capacité portante, en raison de leur faible cohésion et de leur perméabilité

élevée. Ils peuvent être sujet à l'érosion, à l'affaissement et à la liquéfaction sous des charges dynamiques, tels que des séismes.

Afin d'améliorer les propriétés géotechniques des sols sableux, différentes techniques ont été développées, notamment l'ajout de matériaux tels que la bentonite, le ciment, le calcaire et le sable stabilisé au sol. L'ajout de ces matériaux peut améliorer la cohésion et la résistance des sols sableux, réduire leur perméabilité et leur tassement, et augmenter leur capacité portante et leur résistance au cisaillement **(RQBQH, 2020)**.

## II.7 Conclusion

Les sols sableux sont des sols courants qui présentent des avantages et des limites en termes de propriétés géotechniques. L'ajout de matériaux tels que la bentonite peut être une solution efficace pour améliorer les propriétés des sols sableux pour des applications de construction et de génie civil.

# Chapitre III

## Caractérisation et identification du sol sableux de kharrouba

### III.1 Introduction :

La mécanique des sols fournit aux constructeurs les données nécessaires pour étudier les ouvrages des génies civils et de bâtiment et stabilité en fonction des sols sur lesquels ils doivent être fondés, pour cette raison il est nécessaire de reconnaître les propriétés du sol étudié. La connaissance de ces propriétés nous permet de classer le sol, par la classification la plus adéquate est la classification géotechnique, afin de caractériser et d'identifier les principaux paramètres.

La démarche expérimentale adoptée consiste à étudier notre sol à partir des analyses physico-chimiques suivies par des analyses mécaniques d'une part et d'autre déterminer ses caractéristiques de résistance et de déformabilité, qui jouent un rôle important dans la stabilité des ouvrages fondés en surface.

Dans notre cas et faute de moyens nos échantillons ont fait l'objet uniquement de caractérisation physique.

### III.2 localisations du site de prélèvements :

Les échantillons qui ont fait l'objet de notre étude ont été prélevés du site de Kharrouba exactement à côté de l'hôpital universitaire de Mostaganem à des profondeurs qui ont varié de 2 à 4 m en 2019 et qui ont été conditionnés au niveau du laboratoire Mécasol de la faculté des sciences et technologie.



Figure 21: Région de Mostaganem

### III.3 Matériaux utilisés :

Le sable étudié est un sable moyen mélangé avec un pourcentage du limon constituant des grains se forme sous arrondie. Ce sol a été soumis a des essais de caractérisation et d'identification comme il est présenté ci-dessous.



Figure III.2: Sable de kharrouba vue à l'échelle microscopique

### III.4 Caractéristiques physiques du sable de Kharrouba :

Un sol se caractérise par sa granulométrie, sa propreté et sa plasticité les essais d'identification géotechnique en laboratoire permettent de déterminer les paramètres suivants :

#### III.4.1 Détermination des caractéristiques physiques :

##### III.4.1.1 teneur en eau initiale :

Pour la détermination de teneur en eau un ensemble des échantillons sont mises dans des tares w st le rapport du poids de l'eau inclus dans un certain volume de sol, au poids des éléments solides compris dans le même volume, après dessèchement d'eau a l'étuve à 105 dg

L'expression de la teneur en eau est donc :  $\omega(\%) = \left(\frac{W_w}{W_s}\right) \cdot 100$

**Tableau III.1 Détermination de la teneur en eau**

PROFONDEUR 0 m ÷ 4 m						
N° de la tare	1	2	3	4	5	6
Poids total humide	28,6	26,3	25,5	29,8	27,3	27,8
Poids total sec	28	25,8	25,1	29,1	26,7	27,3
Poids de la tare	7,4	7,5	7,4	7,5	7,6	7,6
Poids du sol humide	21,2	18,8	18,1	22,3	19,7	20,2
Poids du sol sec	20,6	18,3	17,7	21,6	19,1	19,7
Poids d'eau	0,6	0,5	0,4	0,7	0,6	0,5
Teneur en eau (w%)	2,91	2,73	2,26	3,24	3,14	2,54
Moyenne	<b>2,80</b>					

### III.4.1.2 Masse volumique absolue/Apparente :

### III.4.1.3 Masse volumique des particules solides $\rho_s$ :

La détermination de la masse volumique a été par l'immersion du sol dans l'eau) échantillon remanie) pour obtenir les valeurs du poids de ses grains solides  $M_s$  et le volume absolu  $V_s$  et de donner la valeur de  $\rho_s$  par l'expression :  $\rho_s = M_s/V_s$

Le principe est de mesurer la masse volumique au moyen de pycnomètre, ceci permet de calculer le volume absolu des grains de l'échantillon.

La masse des particules solides est obtenue par pesage (à l'état sec) et le volume est mesuré au pycnomètre d'après la relation :

Le tableau présente les résultats obtenus pour le sable d'après l'essai :

$$M_1 = \text{masse de sol} = 44.8\text{g}$$

$$M_2 = \text{masse de pycnomètre + sol au repaire} = 271.4\text{g}$$

$$M_3 = \text{masse de pycnomètre + eau + sol au repaire} = 299.3\text{g}$$

$$V_s = (M_2 + M_1 - M_3) / \rho_{\text{eau}}$$

$$\rho_s = 2.67\text{g/cm}^3$$

### III. 4.1.4 masses volumiques humides :

Pour mesurer la masse volumique humide, on peut opérer soit par la méthode hydrostatique, par pesées à sec et dans l'eau, soit en pesant la quantité de matériaux prélevés dans un volume de capacité connue.

La détermination de  $\gamma_h$  a été faite d'après les étapes suivantes

La masse de l'échantillon est obtenue par pesage  $m = p_2 - p_1$

Avec  $\rho_h = M/V$

$$\rho_h = 3.92 \text{ g/cm}^3$$

### III.4.1.5 masse volumique sèche :

La masse volumique sèche correspondant  $\gamma_d$  ( $\text{g/cm}^3$ ) celui de la même unité de volume après étuvage

Avec  $\rho_d = m/v$

$$\rho_d = 3.78 \text{ g/cm}^3$$



### III .4.2. Caractéristiques dimensionnelles :

#### III .4.2.1 Indice des vides :

L'indice des vides  $e$  est égal au rapport du volume des vides sur celui des grains solides est exprimé comme suit :

$$E=V_v/V_s$$

L'indice des vides de notre sol a l'état naturel est  **$e=0,86$**

#### III .4.2.2 la porosité :

$$n=e/1+e$$

$$n= 46\%$$

#### III.4.3 Masse volumique minimale est maximale



**Figure III.3** Calcule de la masse volumique minimale est maximale

**Tableau III.2 : la masse volumique minimale est maximale**

	ESSAI N°01	ESSAI N°02	ESSAI N°03
H(cm)	9,54	9,54	9,54
$\Delta H$ (cm)	0,3	0,3	0,28
$V_0$ (cm <sup>3</sup> )	748,89	748,89	748,89
$V_{1(\text{cm}^3)}$	725,34	725,34	726,91
M (g)	1093,9	1095,6	1097,5
$\rho_{\text{maximale}}$ (g/cm <sub>3</sub> )	1,461	1,463	1,466
$\rho_{\text{maximale}}$ (g/cm <sub>3</sub> ) moyenne	1,463		
$\rho_{\text{minimale}}$ (g/cm <sub>3</sub> )	1,508	1,510	1,510
$\rho_{\text{minimale}}$ (g/cm <sub>3</sub> ) moyenne	1,509		

#### III.4.1.3 Analyse granulométrique :

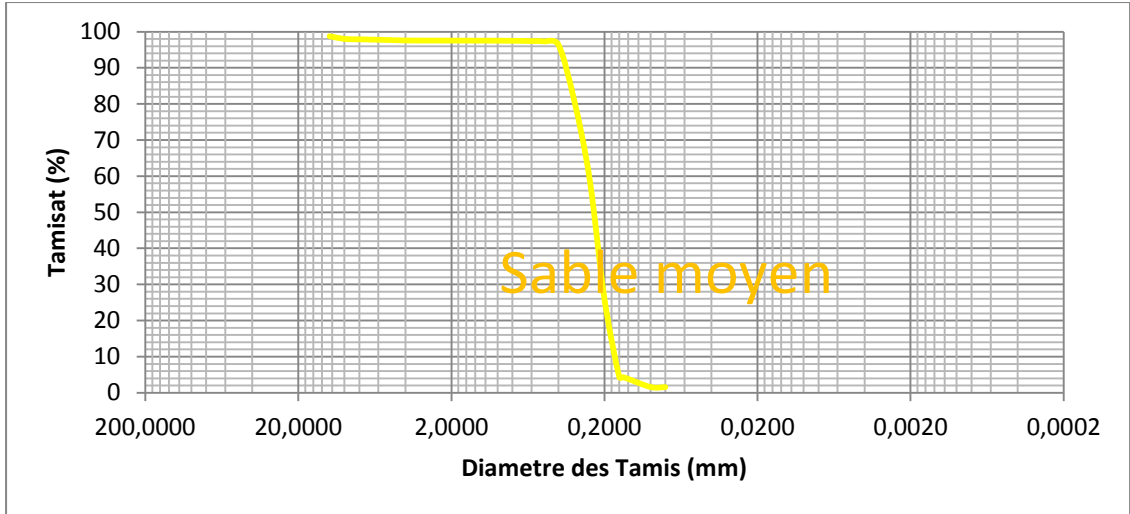
Elle représente le poids des tamisages cumulés (échelle arithmétique), en fonction du diamètre équivalent D des particules solides (échelle logarithmique).

L'analyse granulométrique a été faite en deux étapes ; un tamisage pour la distribution des particules de dimensions supérieures ou égales à 80 µm selon la norme (NF P94 – 056) et la sédimentométrie pour la distribution dimensionnelle des particules de dimensions inférieures 80 µm selon la Norme (NF P94 – 057).

Les résultats des mesures granulométriques et sédimentométriques sur le sol naturel recueilli sur place à deux profondeurs différentes 1 et 4 m.

Ces courbes ont été obtenues par tamisage sur une série complète de tamis pour le sable

séparer sont reportés sur un diagramme semi-logarithmique.



$D_{60} = 0.26\text{mm}$  ;  $D_{30} = 0.22\text{mm}$  ;  $D_{10} = 0.18\text{mm}$      $C_u = 1.44$  ;  $C_c = 1.03$

**Figure III.4 : Analyse granulométrique du sable de kharrouba**

### III.5 Déterminations de la perméabilité

**Tableau III.3 : La perméabilité**

	ESSAI N°1	ESSAI N°2	ESSAI N°3
H1(cm)	73	68,5	74,3
H2(cm)	16,5	13,5	18,2
L1(cm)	13,5	13,5	13,5
L2(cm)	6,5	6,5	6,5
i	8,07	7,86	8,01
$\Delta t(\text{seconde})$	8	13	19
$\Delta V(\text{cm}^3)$	87,5	133	196,5
$A_c(\text{cm}^2)$	44,15	44,15	44,15
$\eta_{17}/\eta_{20}$	1,06	1,06	1,06
$K_{17^\circ}(\text{m/s})$	3,07E-04	2,95E-04	2,92E-04
<b><math>K_{20^\circ}(\text{m/s})</math></b>	<b>3,25E-04</b>	<b>3,13E-04</b>	<b>3,10E-04</b>

### III.6 Valeur du bleu de Mytilène

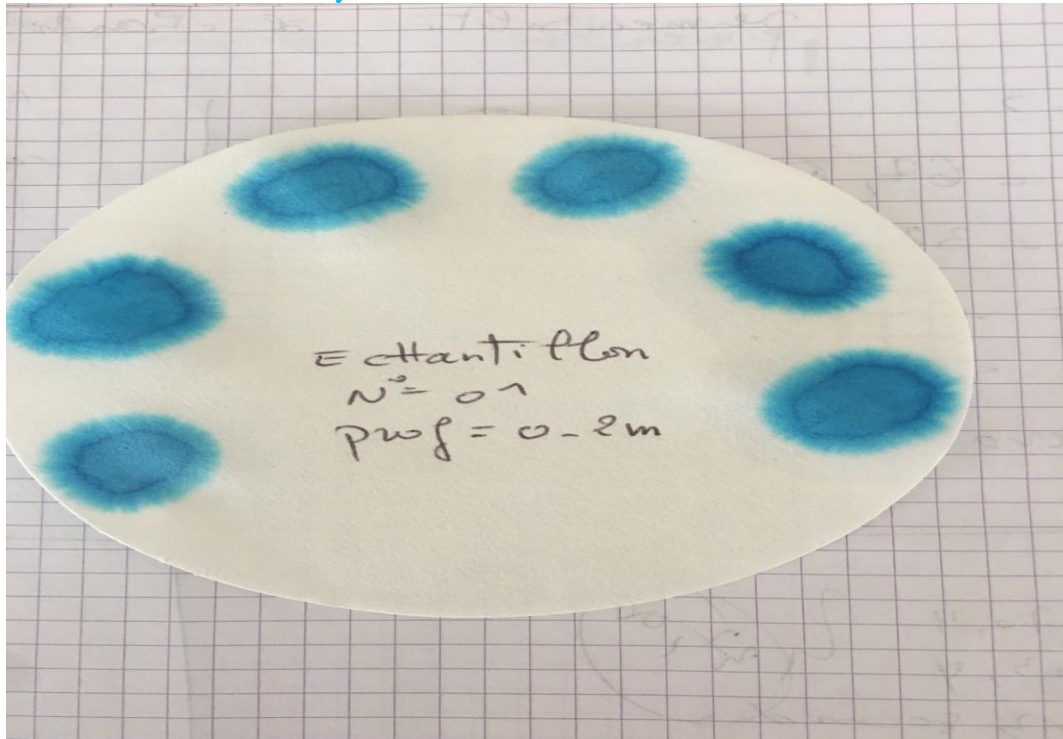


Figure III.5 : Valeurs du bleu de Mytilène

*VBS = 0.5 (sol sableux peu sensible à l'eau)*

**Tableau III.4 : Récapitulatif des caractéristiques du sol objet de l'étude**

<i>Paramètres</i>	<i>Valeur</i>	<i>Norme</i>	<b>Classification</b>
<i>Teneur en eau (w%)</i>	2.80		
<i><math>\gamma_h</math> (g/cm<sup>3</sup>)</i>	3.92		
<i><math>\gamma_d</math> (g/cm<sup>3</sup>)</i>	3.78		
<i><math>\gamma_s</math> (g/cm<sup>3</sup>)</i>	2,67		
<i>e</i>	0,86		
<i>n</i>	0,46		
<i>Sr (%)</i>	32,22		
<i>% passant tamis 80 <math>\mu</math>m</i>	80,74		
<i>% des grains &lt; 2 <math>\mu</math>m</i>	38		

### III.7 Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons présenté des différents essais de caractérisation et d'identification du sable naturel collecté sur le site de Kharrouba, D'après les résultats des essais, nous pouvons classer le sable comme uniforme mal gradué.

Dans le chapitre suivant, il sera abordé une étude expérimentale sur des essais de cisaillement au triaxial dans des conditions non drainées sur sable naturel et reconstitué. Les résultats de ces essais nous permettront étudier et d'analyser le comportement mécanique de ces sols en mettant l'accent sur l'influence de teneur en fines et des caractéristique granulométriques.

Chapitre IV  
Identification et classification de  
la bentonite de M'zila -  
Mostaganem

#### IV.1 Introduction :

Le minéral argileux qui fait l'objet de notre travail est une bentonite locale issue de l'ouest d'Algérie. L'une des propriétés essentielles de la bentonite est de se disperser au contact de l'eau pour former des suspensions plus ou moins stables.

Les cations inter foliaires sont en général échangeables par des cations organiques et minéraux. L'avantage des bentonites réside dans l'intercalation entre leurs feuillets de gros poly cations simples ou mixtes dans le but d'obtenir des matériaux microporeux, à structure rigide, avec un grand espacement inter foliaire.

L'argile brute contient généralement des particules élémentaires dont le diamètre des grains est inférieur à 2 micromètres ( $<2\mu\text{m}$ ) qui représente les individus cristallins (phase minérale Pure) appelés minéraux argileux responsable de ses propriétés tel que le gonflement, la Plasticité et les propriétés d'adsorption, aussi l'argile brute est constituée généralement d'un composant minéral de base (montmorillonite, kaolinite...) et de certaines impuretés. Les impuretés sont constituées des oxydes et hydroxydes de silicium (le quartz et le cristobalite), des minéraux ferrifères (hématite  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , la magnétite  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ), des carbonates (calcite  $\text{CaCO}_3$ , Dolomite  $\text{Ca Mg}(\text{CO}_3)$ ), des oxydes et hydroxydes d'aluminium (la gibbsite  $\text{Al}(\text{OH})_3$ ) et de la matière organique.

**Tableau IV.1: Pourcentage moyen en éléments présents dans l'argile**

Eléments	Silice	Alumine	Fer	Calcium	Potassium	Magnésium	Autre sels minéraux
Pourcentage (%)	40 à60	15 à 48	0.5 à 4	0.15 à 5	0.85 à 4	0.05 à 2	4 à 15



## IV.2 Structure des sols argileux et liaisons structurelles

La structure initiale des sols argileux se forme, en règle générale, lors de la sédimentation en milieu aqueux des produits de l'altération des massifs rocheux contenant des quantités importantes de petites particules de minéraux secondaires. Par la suite, des processus lents et variés de diagenèse peuvent modifier sensiblement la structure initiale de ces argiles. La combinaison de particules isolées et d'agrégats conduit à la formation d'un système structurel, c'est-à-dire une disposition ordonnée des particules et agrégats dans le sol indépendante de l'influence des parties gazeuses ou liquides du sol, qui se forme dans les processus de sédimentation, de diagenèse et de post-genèse.

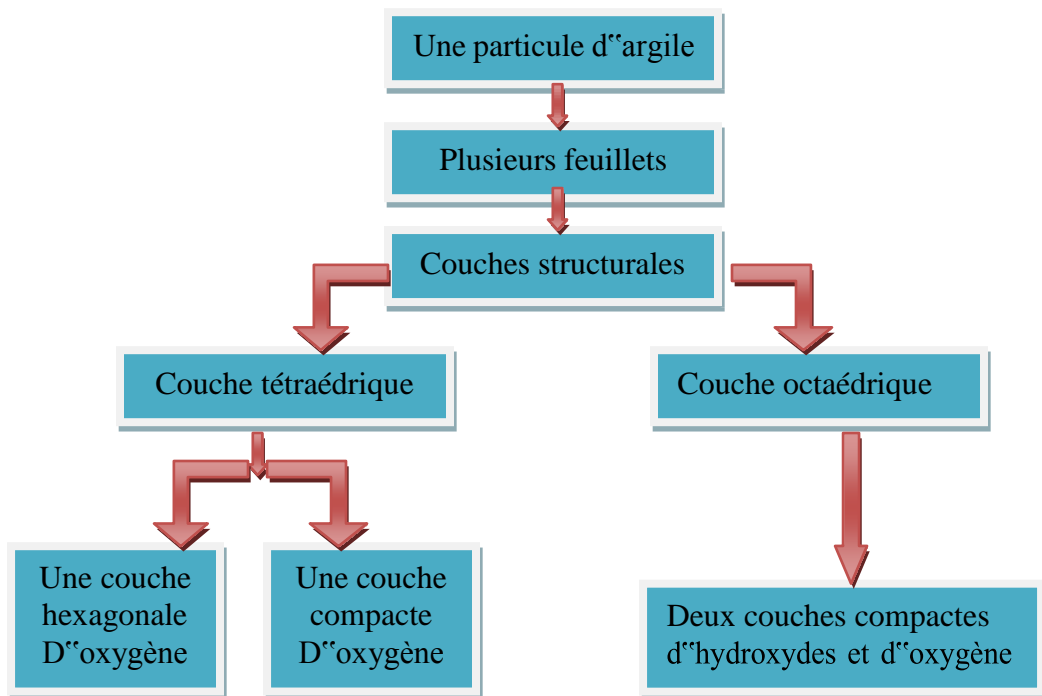


Figure IV.1: Représentation de la structure minéralogique d'une particule d'argile

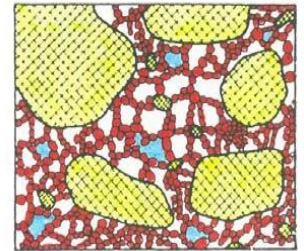
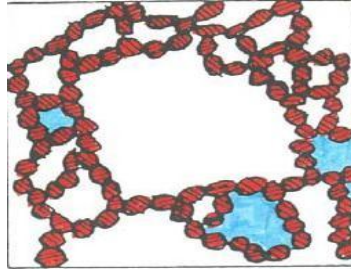
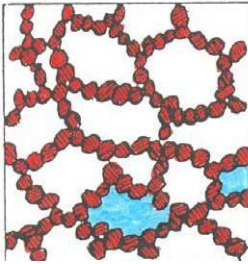
Les argiles monominérales (montmorillonite, illite, kaolinite, etc.) se présentent sous forme de structures élémentaires composées de feuillets élémentaires empilés les uns sur les autres, et souvent appelés « paquets ». Sous l'influence de l'altération chimique et d'autres phénomènes, ces paquets isolés peuvent se rassembler pour former des structures élémentaires appelées micro-agrégats **Filliat et al.( 1981)**.

Sous l'effet de processus variés de diagénèse, la structure initiale des micro-agrégats peut subir des modifications importantes. Lorsque la sédimentation des particules argileuses se produit sans coagulation, c'est à dire sans assemblage préalable des particules en micro-agrégats sous l'effet de forces électro-moléculaires, il se forme une structure d'argile en nid d'abeille .La coagulation préalable des particules argileuses lors de la sédimentation produit une structure floconnée **Berezantsev et al.( 1961) ; Filliat et al..( 1981)**.

Dans ces deux types de structure, la disposition des particules d'argile est désordonnée (chaotique), ce qui s'explique par le fait que l'énergie potentielle de surface (et par conséquent aussi les forces d'attraction mutuelle des particules) est maximale dans les angles et sur les arêtes des particules minérales **Katti. (1988)**.

Sous l'influence d'une charge de compression (par exemple sous le poids des couches de sol sus-jacentes), cette disposition chaotique peut se transformer en une structure plus organisée, dans laquelle la plupart des particules sont en position horizontale et la porosité est sensiblement plus faible **Filliat et al.. (1981)**

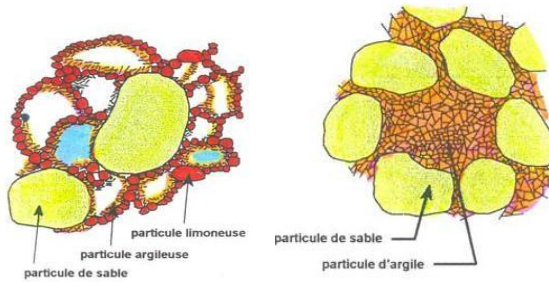
Plus les dépôts argileux sont récents, plus leur structure est voisine des formes en nid d'abeille ou en flocons et plus leur porosité est grande, pouvant atteindre 80% et plus, et leur résistance est faible.



a- Structure en nid d'abeille

b- Structure floculée.

c- Structure dispersée



*d- Sol à structure lâche*

*e- Sol à structure dense*

Figure IV.2 : Différentes structures d'argiles, d'après Terzaghi (1951)  
cité par Houssine EJJAAOUANI (2008)

### IV.3 La bentonite :

Le terme BENTONITE désigne les matériaux argileux à usage industriel, essentiellement composés de smaltites et plus particulièrement de montmorillonite. Les propriétés de gonflement et de perméabilité des bentonites dépendent étroitement de la nature du cation compensateur.

Le terme bentonite a été proposé en 1898 pour désigner une argile au toucher savonneux appartenant à la formation « Ben ton shale » et affleurant dans la région de Rock River (Wyoming, Etats Unies) ou la première exploitation de bentonite aurait été découverte en 1890, connue aussi sous le terme de terre à foulon Cette formation tire son nom de Fort-Ben ton situé à 650 Km environ au Nord d Rock River.

### IV.4 Origine de la bentonite :

Les bentonites sont des argiles d'origine volcanique, constituées principalement de montmorillonite ; l'altération et la transformation hydrothermale de cendres des tufs volcaniques riches en verre entraînent la néoformation des minéraux argileux, qui font partie principalement du groupe des smaltites. Les roches argileuses ainsi formées portent le nom de bentonite, d'après le gisement situé près de Fort Benton (Wyoming, Etats-Unis). Elle contient plus de 75 % de montmorillonite ; cette dernière fut découverte pour la première fois en 1847 près de Montmorillon, dans le département de la Vienne (France).

La bentonite est une dénomination de la montmorillonite, cette dernière a été découverte dans des gisements argileux situés près de Montmorillon dans la Vienne, en France. Les bentonites découvertes dès 1888 contiennent au moins 75% de montmorillonite. Sous sa forme brute naturelle, la bentonite est une roche tendre ayant à peu près la consistance du kaolin, c'est-à-dire friable, onctueuse au toucher, sa teinte est blanche, grise ou légèrement teinte de jaune. Elle provient de la dévitrification des couches volcaniques sous l'influence des eaux à réaction alcaline ou acide. En plus de la montmorillonite, cette terre peut contenir d'autres minéraux argileux (kaolinite, illite,)

ainsi que des impuretés sous forme de gypses, de carbonates ( **Bougdah ,N,2007** ) .

#### IV.5 Structures de la bentonite :

La montmorillonite est le constituant principal de la bentonite. C'est un phyllo silicates 2 :1 (famille de smaltites) dans lequel la charge négative de la couche est électriquement équilibrée par une charge égale, des cations échangeables ( $\text{Ca}^{+2}$ ,  $\text{Mg}^{+2}$ ,  $\text{H}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{NH}_4^+$  et  $\text{Na}^+$ ) situés principalement entre ces couches silicates ; ces cations ne font pas partie de la structure et principalement entre ces couches silicates ; ces cations ne font pas partie de la structure et garde une certaine mobilité ( **Bougdah ,N,2007** ) .

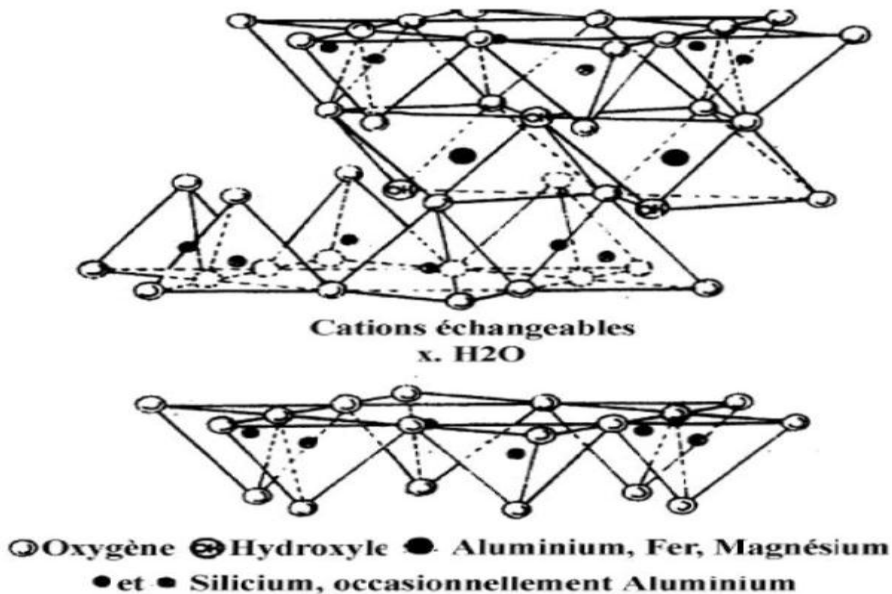


Figure 3 Structure de la montmorillonite

## IV.6 La Bentonites de Mostaganem :

### IV.6.1 Introductions :

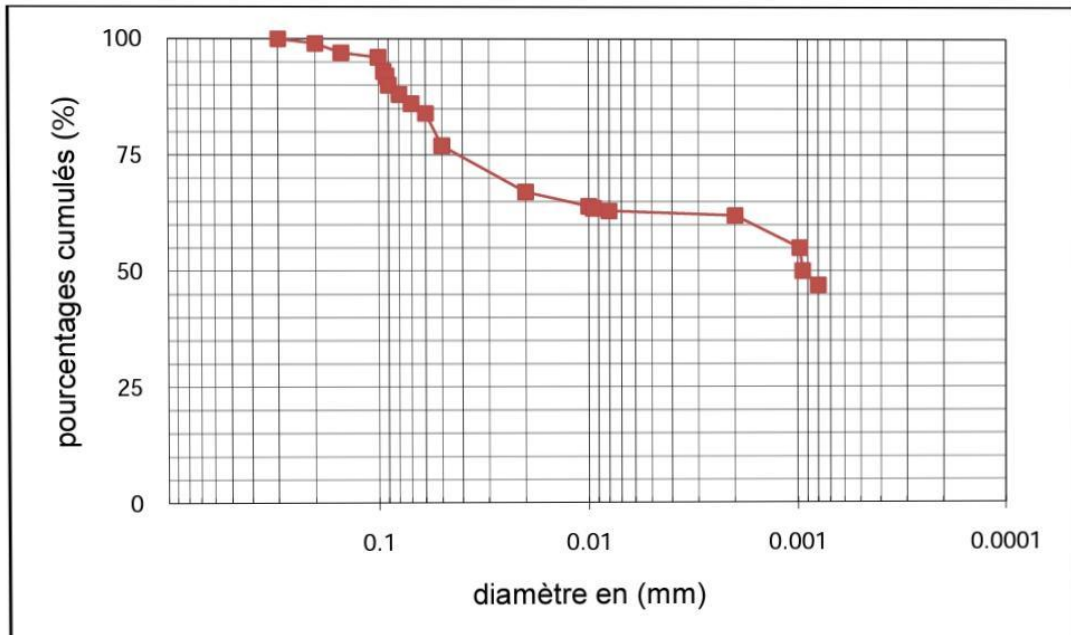
*L'unité de Mostaganem est formée de 02 sites distincts, avec une usine de traitement située en zone urbaine, à l'intérieur du port, et un gisement d'argiles bentoniques brutes (portant le nom de M'zila) distant d'environ 40 Km de cette dernière situé au Nord –Est de Mostaganem à environ 10 Km à l'est du chemin goudronné reliant la commune de Sour à la Daïra de sidi Ali à l'est du village Achats Amour, il y a à peu près 10 Km de piste pour atteindre les chantiers en exploitation.*

### IV.6.2 Analyse granulométrique :

*L'essai a pour but de déterminer en poids, la distribution des particules des sols suivant leurs dimensions. L'analyse granulométriques s'obtient par deux opérations successives et complémentaires : Le tamisage sous l'eau (par voie humide) pour les particules de dimensions  $\geq 80\mu\text{m}$  (0.08mm), l'essai est effectué selon la norme NF P94-056. La sedimentometrie pour les particules de dimensions  $< 80\mu\text{m}$  qui complète la première. Elle est effectuée selon la norme NF P94-057.*

*Les résultats de cette analyse sont traduits par des courbes représentées dans la figure IV.2.*

*On remarque que le taux des particules inférieures à  $2\mu\text{m}$  est de l'ordre de 62% ( $>50\%$ ) ainsi que le taux des particules inférieures à  $80\mu\text{m}$  est de l'ordre de 88 %, ce que nous indique que la bentonite de Mostaganem est une argile très fine.*



**Figure IV.4 : : Sedimentometrie**

Les propriétés physiques et mécaniques de la bentonite de Mostaganem peuvent être modifiées par des traitements chimiques et/ou thermiques. Par exemple, l'ajout de sels de sodium peut améliorer sa capacité d'absorption d'eau et sa résistance mécanique. Les traitements thermiques peuvent également augmenter la résistance mécanique de la bentonite (**. Meddour, H., Seta, A., & Aoues, M. (2016).**)

#### IV.6.3 Propriétés physiques et mécaniques de la bentonite de Mostaganem

La bentonite de Mostaganem est une argile naturelle qui possède des propriétés physiques et mécaniques intéressantes. Ces propriétés ont été étudiées dans plusieurs travaux de recherche.

En termes de propriétés physiques, la bentonite de Mostaganem est une argile fine,

de couleur gris-vert. Elle est principalement composée de silicates d'aluminium hydratés et de magnésium. Sa surface spécifique est élevée, ce qui lui confère une grande capacité d'absorption d'eau et de molécules organiques. Sa densité apparente varie généralement entre 0,7 et 1,2 g/cm<sup>3</sup>. Du point de vue des propriétés mécaniques, la bentonite de Mostaganem possède une faible résistance mécanique en compression. Sa résistance à la rupture est également relativement faible. Cependant, sa capacité à gonfler en présence d'eau lui confère une grande capacité de confinement des fluides.

Elle peut ainsi être utilisée comme matériau d'étanchéité pour les ouvrages hydrauliques

Les propriétés physiques et mécaniques de la bentonite de Mostaganem peuvent être modifiées par des traitements chimiques et/ou thermiques. Par exemple, l'ajout de sels de sodium peut améliorer sa capacité d'absorption d'eau et sa résistance mécanique. Les traitements thermiques peuvent également augmenter la résistance mécanique de la bentonite.

#### IIV.6.3.1 Propriétés physiques :

Voici quelques propriétés physiques et mécaniques typiques de la bentonite de Mostaganem avec leurs valeurs numériques correspondantes :

- Masse volumique : de 2,5 à 2,8 g/cm<sup>3</sup>
- Teneur en eau : de 8 % à 16 %
- Limite de plasticité : de 30 % à 40 %
- Limite de liquéfaction : de 80 % à 90
- Indice de plasticité : de 10 à 15
- Taux de gonflement : de 10 à 15 ml/2g
- Résistance à la compression non confinée : de 100 à 150 kPa
- Résistance à la traction : de 20 à 30 kPa
- Angle de frottement interne : de 20 à 30 degrés



Ces valeurs peuvent varier en fonction de la qualité de la bentonite, de sa provenance et des méthodes utilisées pour mesurer ces propriétés.

#### IV.7 Conclusion

La bentonite de Mostaganem est un matériau très utile dans les applications géotechniques en raison de ses propriétés physiques et mécaniques uniques. Elle est particulièrement utile dans les applications de confinement, de scellement et de stabilisation des sols sableux. La compréhension de ces propriétés est essentielle pour la conception et la mise en œuvre de projets géotechniques

Chapitre V  
Effet de la bentonite sur les  
paramètres intrinsèques du sol ( $c$  ;  
 $\varphi^{\circ}$ )

### V.1 Introduction :

Dans cette partie que nous supposons la plus importante dans notre sujet de recherche consiste à soumettre notre sols (sable de kharrouba) à l'essai de cisaillement direct rectiligne à plusieurs reprises avec de différents teneurs en Bentonite dont le but était de savoir si ce processus nous permettre d'améliorer les caractéristiques mécaniques de notre sol à savoir la cohésion et l'angle de frottement.

### V.2 Mode Opérateur :

1. Préparation de cinq échantillons à différentes teneurs en Bentonite (0% ;2% ;4% ;6% ;8%) ;
2. La mise en place de l'échantillon dans la cellule de cisaillement se fait par couche successive et après un léger compactage
3. Chaque échantillon d'une teneur en bentonite donnée à était soumis à trois charges normale 1.66 bar ; 2.22 bars et 3.33 bars
4. La vitesse de cisaillement à était fixée pour l'ensemble des essais.

### V.3 Résumé des résultats obtenus :

Tableau V.1: Paramètres intrinsèques des sols

Sol	Cohésion	Angle de frottement	Contrainte Normale (Bars)		
			1,66	2,22	3,33
/	/	/	<b><math>\tau</math> de rupture (Bars)</b>		
S NATUREL	0,10	35,52	1,266	1,649	2,514
SN+2% BENTO	0,20	31,42	1,340	1,570	2,518
SN+4% BENTO	0,38	31,29	1,498	1,746	2,541
SN+6% BENTO	0,54	31,08	1,672	2,033	2,921
SN+8% BENTO	0,78	31,13	1,860	2,164	2,905

L'évolution des courbes de cisaillement direct dans les figures qui suivent dans ce chapitre montrent que :

les contraintes de rupture correspondantes (courbes de cisaillement direct) obtenues sur les échantillons de sol compactés décrivent un comportement typique des sols raides caractérisés par une résistance au cisaillement croissante suivie d'un pic plus ou moins prononcé selon le niveau des contraintes normales considérées.

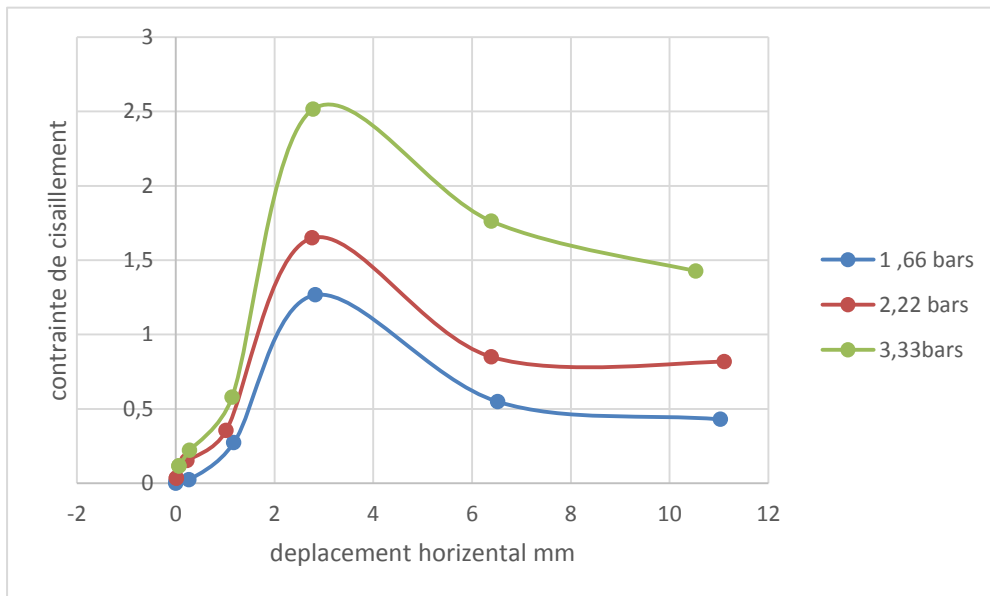
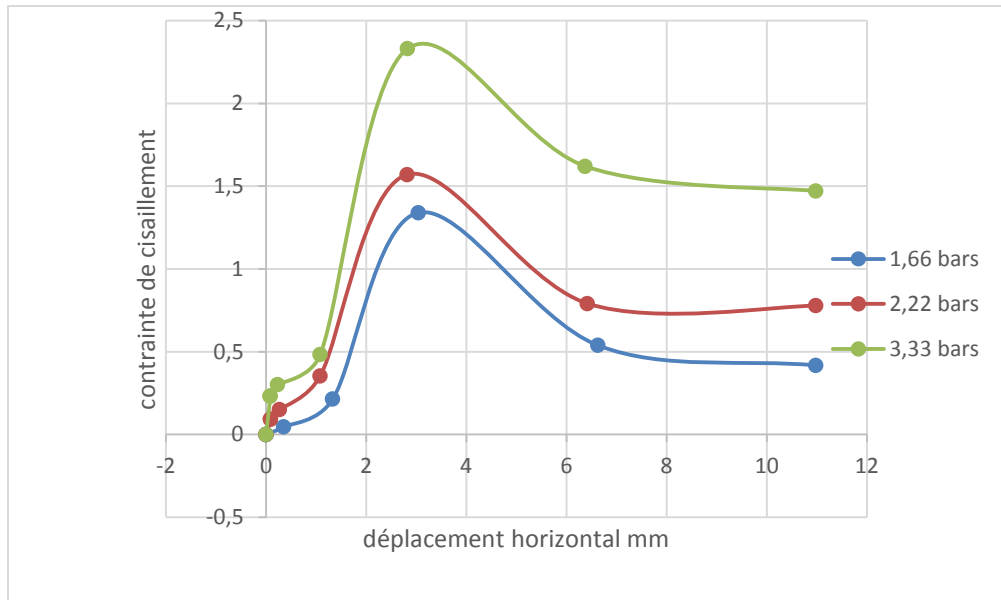
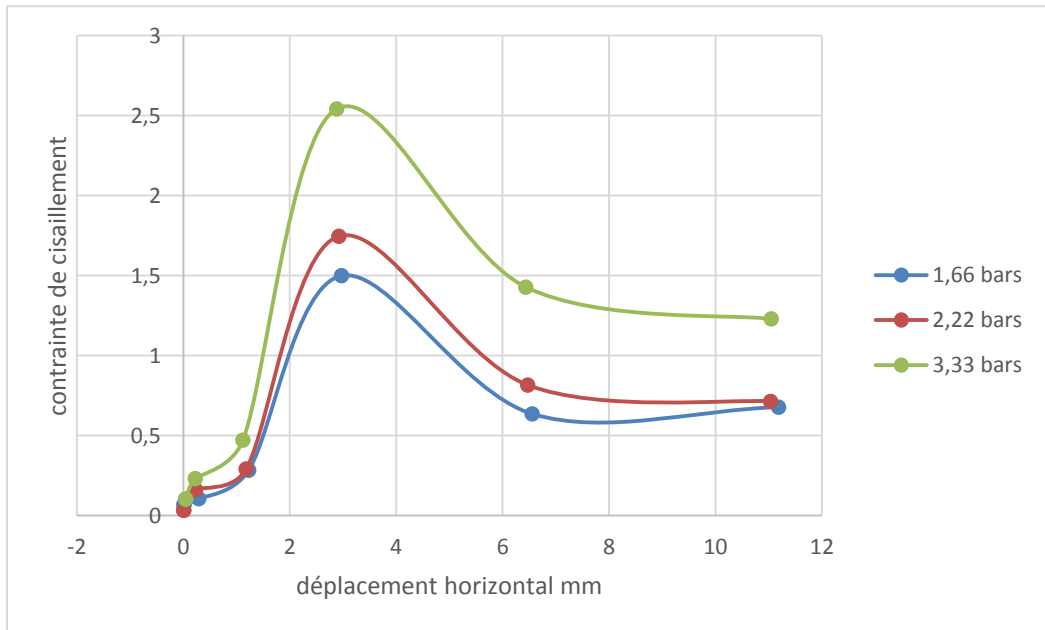


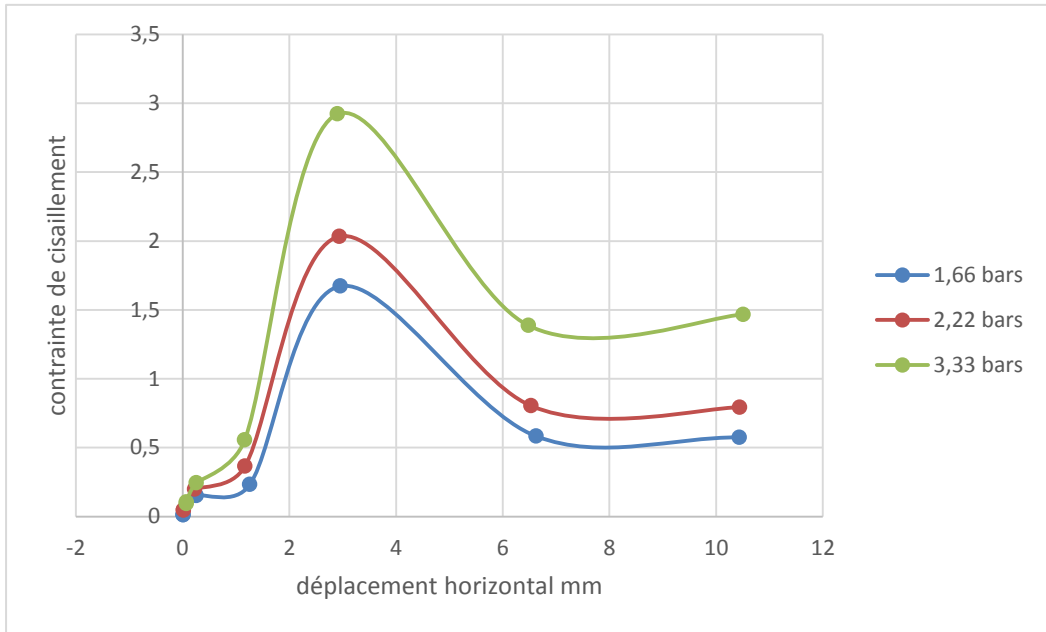
Figure V.1 : Courbe contrainte-déplacement du sol naturel



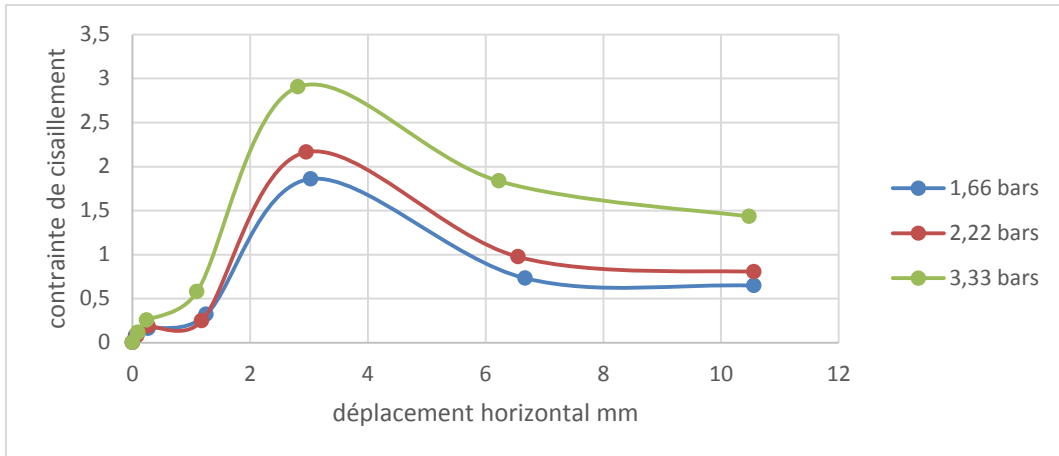
**Figure V.2 : Courbe contrainte-déplacement du SN+2% Bentonite**



**Figure V.3 : Courbe contrainte-déplacement du SN+4% Bentonite**



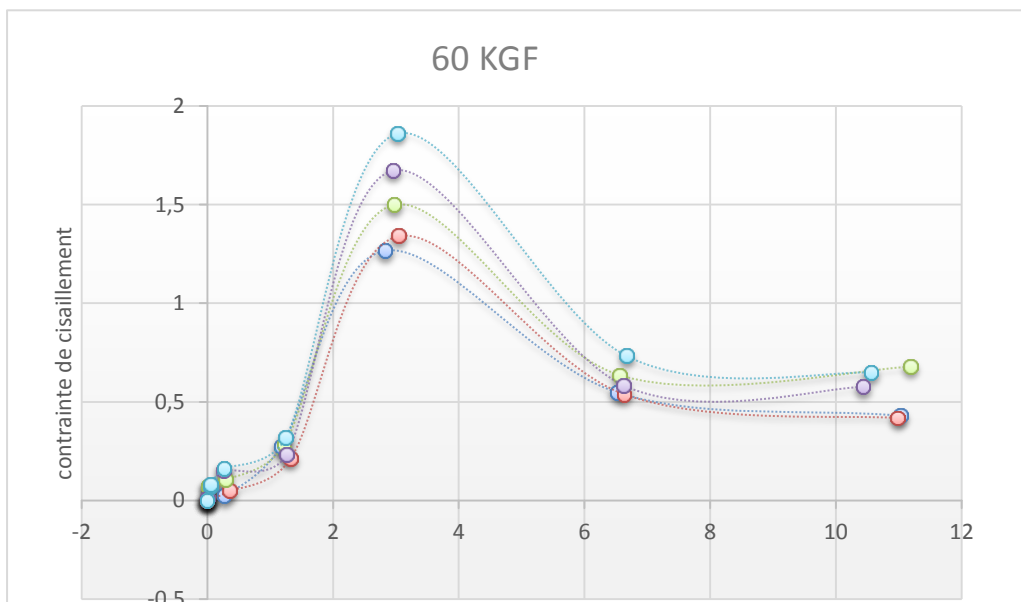
**Figure V.4 : Courbe contrainte-déplacement du SN+6% Bentonite**



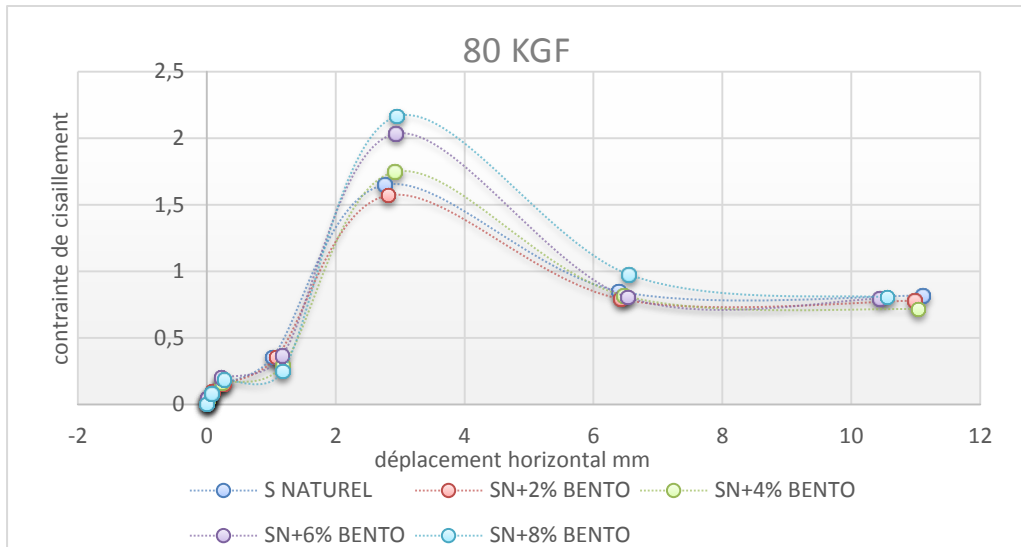
**Figure V5: Courbe contrainte-déplacement du SN+8% Bentonite**

L'augmentation du pourcentage de bentonite ajoutée provoque l'accroissement des contraintes tangentielles et la diminution des déformations correspondes, le comportement des échantillons devient de plus en plus dense pour chaque pourcentage .

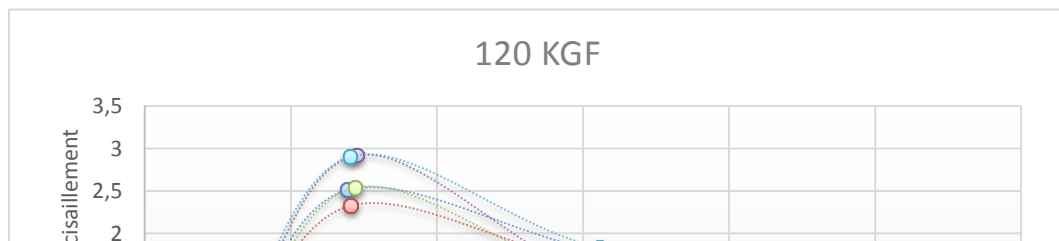
L'augmentation de la contrainte de cisaillement, peut s'expliquer par phénomène cohérent de la stabilisation, résultant des propriétés distinctives de l'argile, puisque ces dernières lui appartiennent(bentonite).



**Figure V.6 : Courbes contrainte-déplacement de comparaison entre sol naturel et  
Traité sou charge de 60 kgf**

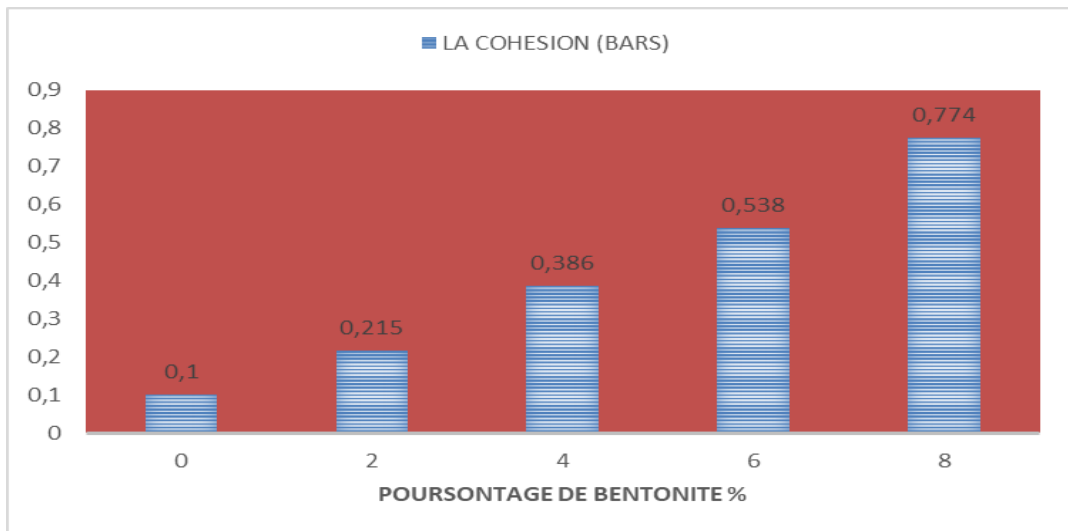


**Figure V.7 : Courbes contrainte-déplacement de comparaison entre sol naturel et  
traités sou charge de 80 kgf**

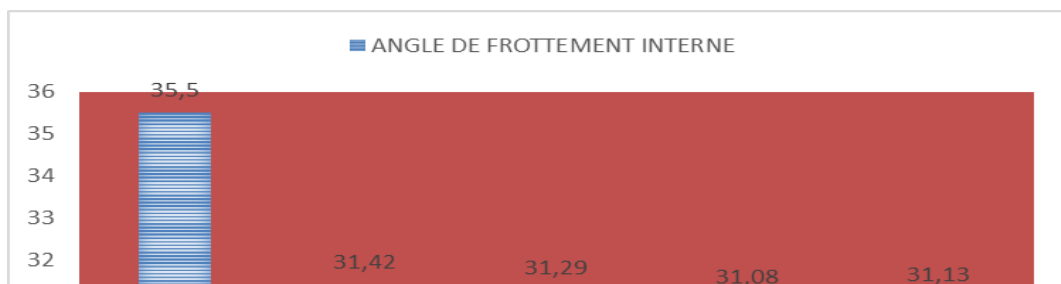




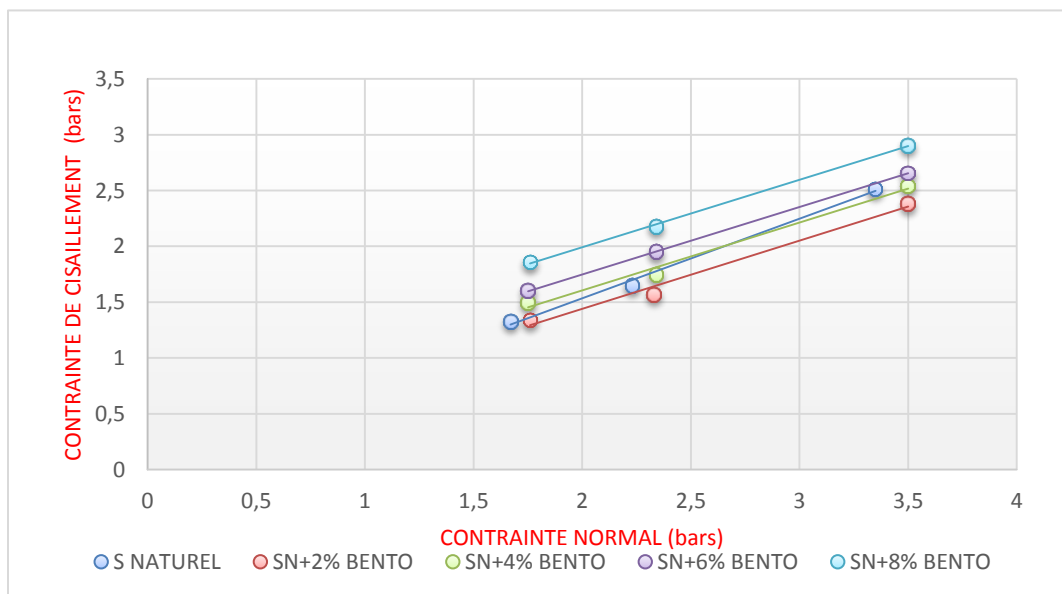
**Figure V.8 : Courbes contrainte-déplacement de comparaison entre sol naturel et traités sou charge de 1200 kgf**



**Figure V.9 : Histogramme Relation entre la cohésion et le pourcentage de la bentonite**



**Figure V.10 : Histogramme Relation entre la cohésion et le pourcentage de la bentonite**



**Figure V.11 : Courbe Intrinsèque de comparaison du sol naturel et traités**

#### V.4 Interprétation des résultats :

L'évolution des courbes de cisaillement direct montrent que les contraintes de rupture correspondantes (courbes de cisaillement direct) obtenues sur les échantillons de sol compactés décrivent un comportement typique des sols raides caractérisés par une résistance au cisaillement croissante suivie d'un pic plus ou moins prononcé selon le niveau des contraintes normales considérées

L'augmentation du pourcentage de bentonite ajoutée provoque l'accroissement des contraintes tangentielles et la diminution des déformations correspondes, le comportement des échantillons devient de plus en plus dense pour chaque pourcentage (figures 6,7 et 8). L'augmentation de la contrainte de cisaillement, peut s'expliquer par phénomène cohérent de la stabilisation, résultant des propriétés distinctives de l'argile, puisque ces dernières lui appartiennent (bentonite).

Aussi pour les paramètres intrinsèques ( $C$  et  $\varphi^\circ$ ) ; il est remarqué une relation de proportionnalité entre la cohésion ( $C$ ) et la quantité de bentonite ajoutée, la cohésion du sol naturel est de 0,10 bars, elle atteint une valeur de 0,78 bars pour 8% de bentonite.

Pour l'angle de frottement ( $\varphi^\circ$ ) qui est initialement de  $35,52^\circ$ , diminuer à la valeur de  $31,08^\circ$  dans l'intérêt 8% de la bentonite, et cela est dû à une diminution du taux de frottement entre les grains de sable par l'intervention des grains fins de bentonite, pour remonter à nouveau afin d'obtenir le forme 8% de Bentonite, et c'est ce qu'on appelle l'action inverse à la suite de l'augmentation du rapport (figures 20 et 21).

# CONCLUSION GENERALE ET RECOMMANDATIONS

## CONCLUSION GENERALE ET RECOMMANDATIONS :

Cette expérience dans le domaine de la géotechnique, nous permien de revoir nos connaissances en géotechniques et de les approfondirent malgré les difficultés que nous avons rencontrées. Dans ce modeste travail nous avons essayé de passer en revue les différentes méthodes d'amélioration des sols et nous avons expérimenté la méthode d'amélioration avec la bentonite de Mostaganem sur le sol sableux du lieu dite Kharrouba Mostaganem au laboratoire de Mécasol de la faculté des sciences et technologie.

Les essais de cisaillement que nous avons effectué par l'intermédiaire de la machine de cisaillement directe à la boîte de cassagnarde nous ont donnés des résultats concluants qui veut dire que nous avons amélioré le paramètre de la cohésion et celui l'angle de frottement, mais il s'est avéré que la maîtrise du procédé est très difficile vu que le comportement du sol est imprévisible sachant que le changement de ses deux paramètres entraine d'autre changement dans d'autres paramètre.

Ce sujet de recherche est un sujet d'actualité vu la rareté des sols à bonne capacité portante alloué au domaine de la construction, dans ce contexte nous recommandons que ce sujet soit plus affiné dans le future par des étudiants en géotechnique vu les difficultés que nous avons trouvés nous étudiantes de structur

## BIBLIOGRAPHIE

- Adda Neggaz H., 2008. Contribution à l'étude préliminaire de l'évolution des indices physiologiques .
- Abousamara F., 2004. Lignes directrices pour l'élaboration d'indicateurs d'états écologique et de Réduction du stress. 2004 Rapports techniques du PAM/PNUE, 114 p.
- Albakjaji M., 2011. La pollution de la mer Méditerranée par les hydrocarbures liée au trafic maritime.
- Azzolina J.F., 1988. à l'étude de la dynamique des populations de l'oursin comestible *Paracentrotus* Contribution lividus (Lmk). Croissance, recrutement, mortalité, migration. Thèse de Doctorat Ecologie, Univ. Aix- Marseille II, Marseille, Fr., : 242 pp.
- Asgari, A., & Askarinejad, A. (2011). Experimental Study of Soil Improvement by Bentonite. Australian Journal of Basic and Applied Sciences, 5(9), 672-677.
- Astéroïdes et les Holothuroïdes (Mezali, 2007).
- Beaumont A et Cassier P. 1978. Biologie animale des Protozoaires aux Métazoaires.
- Bowles, J. E. (1997). Foundation Analysis and Design. McGraw-Hill Education.
- Berland B., 1996. Introduction. In: Efflorescences toxiques des eaux côtières françaises, écologie, écophysiole, toxicologie. Berland et Lassus, (eds), IFREMER, p. 9-12.
- Barakat, A. A., & Ismail, M. A. (2015). Improvement of Sandy Soil Properties by Adding Bentonite. International Journal of Geotechnical Engineering, 9(4), 344-351.
- BOUGDAH N. , 2007. ETUDE DE L' ADSORPTION DE MICROPOLLUANTS ORGANIQUES SUR LA BENTONITE mémoire de fin d'étude pour l'obtention du diplôme magister, Université 20 Août 55, Skikda .P 30.
- BOUGDAH N. , 2007. ETUDE DE L' ADSORPTION DE MICROPOLLUANTS ORGANIQUES SUR LA BENTONITE mémoire de fin d'étude pour l'obtention du diplôme magister, Université 20 Août 55, Skikda .P 33-P 34-P 35.
- BOUGDAH N. , 2007. ETUDE DE L' ADSORPTION DE MICROPOLLUANTS ORGANIQUES SUR LA BENTONITE mémoire de fin d'étude pour l'obtention du diplôme magister, Université 20 Août 55, Skikda .P 38.
- BOUDJEMAA S. , 2011. Préparation et caractérisation du Vox supporté sur la Bentonite intercalée au chrome. P 11.
- BARLEYK.P.,GREACENE.L.-1967 Mechnniclnresist~nce8-S11soilfnctorinfluencingthegrowth ofrootsandundergrounEshoots Arlv.inAgron.19,1-43
- BLONDEL D.-1965 Prer :ri.ers618t1entssurl' influencedelndensit&appo.r-errtedusol surlacroissancerncin~iredel' nrnchiQeetdusorgho.SesconsGquencessurlesrendenents

Coll. sur 10. Cons. et l'Ani G. de 12. Fert. des Sols, Khr. r-boun (8-12 Nov', 65), OAU/STRC. Coran, n° 37 ; 173-101

BOUCHAÏDL.-1969 Résuné de ar~s' J. Itats acquis à l'ITIAI' ~ ; Ladng[', scQr concernant le tro..vail du solet rôle c'le : la lcti CII' corgan.ique, IRA. J :-

I' : o..d. ngn, sco, r. Corn. à 18. Conf. n~L'~, ' de Bour. ké ; doc. Bult. 5p.

Astéroïdes et les Holothuroïdes (Mezali, 2007).

Craig, R. F. (2013). *Soil Mechanics*. CRC Press.

Dufaure, J. P., Boulaine, J., & Jolly, Y. (1997). *Les sols sableux en France : leur connaissance et leur gestion*. Éditions INRA.

Dubroecq, D. (2004). *Géologie des sols sableux et des formations superficielles*. Éditions Quae.

Das, B. M. (2019). *Principles of Geotechnical Engineering*. Cengage Learning.

El Sawwaf, M., Abou El-Fadl, M., & El-Dieb, A. (2019). Effect of Bentonite on the Geotechnical Properties of Sandy Soil. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 56(3), 200-208.

Gaede, O., & Savidis, S. (2007). Soil Stabilization using Bentonite and Lime. In *Proceedings of the 10th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering (Vol. 3, pp. 2181-2184)*.

Holtz, R. D., Kovacs, W. D., & Sheahan, T. C. (2011). *An Introduction to Geotechnical Engineering*. Pearson Education.

Head, K. H. (2013). *Manual of Soil Laboratory Testing : Volume 1. Soil Classification and Compaction Tests*. CRC Press.

Lambe, T. W., & Whitman, R. V. (2012). *Soil Mechanics*. John Wiley & Sons.

Le Bissonnais, Y., & Daroussin, J. (1992). *Érosion des sols sur sables : influence des propriétés et des traitements*. Éditions INRA.

Mitchell, J. K., & Soga, K. (2005). *Fundamentals of Soil Behavior*. John Wiley & Sons.

Shahin, H. M., Ghalwash, A., & Abd El-Aziz, M. (2017). Effect of Bentonite on the Engineering Properties of Sandy Soils. *International Journal of Geotechnical Engineering*, 11(1), 85-94.

Terzaghi, K., Peck, R. B., & Mesri, G. (1996). *Soil Mechanics in Engineering Practice*. John Wiley & Sons.

Université de PARIS-Est, 298p.



## Les références bibliographiques

-AFNOR, « Norme française sol: reconnaissance et essais»:

NFP 94-041 : Analyse granulométrique, méthode de tamisage par voie humide.

NFP 94- 051: Détermination des limites d'atterberg la limite à la coupelle –  
limite de plasticité au rouleau.

NFP 94-093: Essai Proctor.

NFP 94-057 : «Analyse granulométrique des sols par  
sedimentométrie». NF P94-054 : L'essai de pycnomètre.

NFP94-048 : Teneur en calcaire ( $\text{CaCO}_3$ ).

NFP 94- 068: «Détermination de la valeur de bleu de méthylène d'un sol par  
l'essai à tache». NFP94-090: «Essai oedométrique – partie 1: Essai de  
compressibilité à sur matériau fins saturés avec chargement par paliers».

NF P 94-071 : l'essai de

cisaillement. NF P 94-078 :

L'ESSAI DE CBR.

ASTM D45-46-90 : Détermination de la pression et potentiel de gonflement.

-AISSIOU F.Z, NECHNECH .A: (SBEIDCO – 1<sup>st</sup> International Conférence on  
Sustainable. Built Environment Infrastructures in Developing Countries ENSET  
Oran (Algeria) – October. 12-14, 2009) amélioration de caractéristiques  
mécaniques d'un sol argileux par incorporation de chaux.

-AL-MUKHTAR. M, BELANTEUR. N, TESSIER. D, ET VANAPALLI. S.K,  
(1996) « The

fabric of a clay soil under controlled mechanical and hydraulic stress states”  
Applied Clay Science, vol. 11, 99-115.

-ALONSO. E, GENS. A. ET HIGHT, D. W, (1987) «Special problems soils  
» (session 5) General Report. 9<sup>th</sup> European Conference. Soil, mech. and Fond.  
Eng. Dublin.

-AL-RAWAS A..A, HUGO A.W, AL-SARMI H. (2005) Effect of lime, cement  
and sorooj

„artificial pozzolanne) on the swelling potential of an expansive soil from Oman.  
Building and environment, vol 40, Eesvier. pp 684-685.

-AZZOUZ F.Z (2006) « Contribution a l'étude de la stabilisation chimique de  
quelques argiles gonflantes de la région de Tlemcen ». Mémoire de magister

Université de Tlemcen 179p.

- BENGRAA.L (2004). « Contribution à l'étude de la stabilisation du gonflement par ajout de sable, application aux sols d'Oran ». Mémoire de magister .U.S.T.Oran, soutenue le 21.06.2004.102p.

- BENGUENEB Ahmed thèse de magister en génie civil (2009), Etude du gonflement des sols actifs sous différentes conditions de salinité.
- BENKADDOUR. M, KAZI AOUAL. F., SEMCHA. A : « Durabilité des mortiers à base de pouzzolane naturelle et de pouzzolane artificielle » Revue Nature et Technologie. n° 01/Juin2009. Pages 63 à 73.
- BEREZANTSEV V.G, KCENOFONTOV A.I, PLATONOV E.V., SIDOROV N.N., YAROSHENKO V.A. (1961). Mécanique des sols et fondations (en russe : Mekhanika gruntov, osnovaniya fundamenti). Moscou, Éditions du Ministère des Voies de Communications, Transzheldorizdat, 340 pages.
- BOUZID.F (1997). « Étude de l'aspect physico-chimique des caractéristiques mécaniques d'une argile gonflante : Bentonite ». Thèse de Magister (Université des Sciences et de la technologie Houari Boumediene Alger.1997.
- CHEN.F.H (1988). «Foundations on expansive soils».Developments in Geotechnical Engineering, Vol 54, Elsevier Publishing Co.Amsterdam, 464 pages.
- CHEN.F.H (1975). Foundations on expansive soils. Developments in Geotechnical Engineering, vol. 12. Elsevier Scientific Publishing Company, Amsterdam - Oxford -New York, 280 pages.
- COLLINS. K ET MCGOWN. A (1974) "The form and function of microfabric features in a variety of natural soils" Géotechnique, vol. 24, 223-254.
- CUI Yu-Jun-ENPC-CERMES, INSTITUT NAVIE consolidation des argiles
- DJEDID. A (2005) « L'identification des sols gonflants : pour une démarche unifiée ».2<sup>ème</sup> JESG.
- EDIL T.B. et ALANAZY A.S. (1992) « Lateral swelling pressures ». Proceedings of the 7th International Conference on Expansive Soils, Dallas, USA, vol. 1, pp. 272-323.
- EROL, O, DHOWIAN ET YOUSSEF, (1987) «Assessment of oedometer methods for heave prediction» Proc. of the 6<sup>th</sup> Int. Conf on Expansive Soils, New Delhi, 99-103.
- FILLIAT .G, ET AL. (1981). La pratique des sols et fondations. Éditions du

Moniteur, Paris, 1392 pages.

-FLORIN V.A. (1959). Bases de la mécanique de sols (En russe : Osnovy mekhaniki gruntov). Strojizdat, Moscou, 380 pages.

-GENS .A ET ALONSO. E.E., (1992) « A framework for the behaviour of unsaturated expansive clays” Revue Canadienne de Géotechnique, vol. 29, pp. 1013-1032.

-GOLDSHTEJN M.N. (1952). Propriétés mécaniques des sols (En russe : Mekhanicheskie svoystva gruntov). Strojizdat, Moscou, 310 pages.

- GRIM.R.E. (1959) «Physico-chemical properties of soils clay minerals». Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, Vol 85, N° SM 2, pp1-17.
- GRIM.R.E (1959). «Physico-chemical properties of soils clay minerals». Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, Vol 85, N° SM 2, pp1-17.
- GUEDDOUDA.K. (2005). « Stabilisation des argiles gonflantes par ajout de sable de dunes ;Cas : Région de Laghouat ». Thèse Magister soutenu le 14/06/2005. 136 pages.
- GUEDDOUDA.K ET AL (2007). « Caractérisation et stabilisation des sols expansifs ».Colloque. Tunisie pp 27-34
- HACHICHI. A, BOUROKBA .S.A, BENAÏSSA A., J.M, M. HATTAB, HATTAB S.TAÏBI  
19 ème Congrès Français de Mécanique Marseille, 24-28 août 2009: Etude des phénomènes retrait- gonflement et stabilisation des sols gonflants de la region d'Oran.
- HACHICHI.A. (2006). « Étude du comportement hydromécanique et de la stabilisation des sols gonflants de la région d'Oran. » Thèse Doctorat d'état 129 p.
- HACHICHI A et FLEUREAU. J.M, (1999) : «Caractérisation et stabilisation de quelques sols gonflants d'Algérie», Revue Française de géotechniques.
- HAFSI. A (1993). « Théories de la double couche et gonflement des argiles non. saturées »Euromech colloquium N°209: Mechanics of swelling, Rhodos, Greece, August 23- 27 .1993.
- HARAS NATIONAUX (2004). Fiche techniques génie hippique. Novembre 2004
- HUIDI JI, HASHEM MOURAD, ELIOT FRIED, JOHN DOLBOW, (2006); «Kinetics of thermally induced swelling of hydrogels». International Journal of Solids and Structures 43.pp: 1878–1907.
- HOLTZ.W.G, ET GIBBS .H.J. (1956). «Engineering properties of expansive soils». Trans of ASCE, Vol. 121, pp 641-679.
- HOLTZ, R.D., KOVACS, W.D., LAFLEUR, J. (1 991). Introduction à la

géotechnique. Édition de l'école Polytechnique de Montréal. Montréal, Québec. 808 p.

-HOMOUD.A. S. ET AL, (1985): «Cyclic swelling behaviour of clays» J of geotechnical and geoenvironmental engineering. pp 562- 564.

-HOUSSINE EJJAOUANI (2008). Thèse de doctorat de l'école nationale des ponts et chaussées « interactions des fondations et des sols gonflants : pathologie, calculs et études expérimentales »

-KATTI R.K. (1988). Shear strength and earth pressure in expansive soils. Proceedings of the International Conference on Engineering problems of regional soils, Beijing, China, International Academic Publishers, pp. 75-110.

- KOMINE. H, ET OGATA, N. (1996) "Prediction for swelling characteristics of compacted bentonite" *Revue Canadienne de Géotechnique*, vol. 33, 11-22
- LAMBE, T.W, (1953), « The structure of inorganic soil », *Proceedings, ASCE*, vol. 79, N°315, 49 pp.
- LOW P.F. (1973). Fundamental mechanisms involved in expansion of clays as particularly related to clay mineralogy.  
*Proceedings, Workshop on Expansive Clays and Shales in Highway Design and Construction*, vol. I.
- MENAD Kamal : thèse de magister en génie civil 2008, traitement des barrières hydraulique par la chaux (investigation hydraulique).
- MITCHELL, J.K. (1976). *Fundamentals of Soil Behavior*. University of California, Berkeley. John Wiley & Sons, Inc., New-York. NY. 422 p.
- MOUROUX, P., MARGON, P., ET PINTE, J.C., (1988), « La construction économique sur sols gonflants », *manuels et méthodes n° 14*, B.R.G.M, France.
- NICOLAS. C (2004). « Sols traités à la chaux et aux liants hydrauliques : Contribution à l'identification et à l'analyse des éléments perturbateurs de la stabilisation » Thèse doctorat soutenu le 20.12.2004. 189 p
- PARCEVAUX .P (1980). *Etude microscopique et macroscopique du gonflement des sols gonflants*. Thèse de docteur-ingénieur en géologie de l'ingénieur, Université Pierre et Marie - Curie et École nationale Supérieure des Mines de Paris.
- PHILIPPONNAT .G (1979). *Fondations et ouvrages en terre*. Éditions Eyrolles, Paris, 401 pages.
- RAO.A.A.S, ET SIVAPULLAIAH.P.V. (1986). « Swelling pressure of clays ». *Geotech.test,J.G.T.J.D.J*, Vol 9 N° 1, pp 24-33.
- SEED, H.B, R.J.WOODWARD ET R.LUNDGREN. (1962). « Prediction of swelling potential for compacted clays ». *Journal of the soil Mechanics and foundations division, ASCE*, vol.88, n° SM4, 1962, p.107-131.
- SERRATRICE, J.F et B.SOYEZ, (1996). « Les essais de gonflements ». *Bulletin des laboratoires des ponts et chaussées*.204.Juillet –Août 1996-réf

.4082-pp 65-85.

-SKEMPTON.A.W. (1953). « The collaidal activity of clays ». Proceedings of the Third International Conférence on Soil Mechanics and Foundations Engineering. Vol.1, pp 57-61.

-SMAIDA ALI thèse de magister en génie civil 2010 (Stabilisation des argiles gonflantes, l'effet de la chaux et du ciment sur les propriétés physico-mécaniques)

-SOROCHAN E.A. (1989). Construction d'ouvrages sur les sols gonflants (en russe Stroitelstvo sooruzhenij na nabukhayushchikh gruntakh). Moscou, Strojizdat, 310 Pages.



-SURATMAN.I. (1985) «Contribution à l'étude de la cinétique et de la stabilisation du gonflement des argiles ». Diplôme de Docteur -Ingénieur. Institut National des Sciences Appliquées de Lyon.

-TEFAL.M (1993). Évaluation de la pression de gonflement de l'argile de Berrechid à l'appareil triaxial. Travail de Fin d'Études à l'École Hassania des Travaux Publics, Casablanca.

-WAKIM.J, (2005) «Influence des solutions aqueuses sur le comportement mécanique des roches argileuses» Thèse doctorat de l'école nationale supérieure des mines de paris.France.