

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche
Scientifique

Université Ahmed Draia Adrar
Faculté Des Sciences et de Technologie
Département Des Sciences et Technologie



Mémoire De Fin D'étude En Vue De L'obtention Du Diplôme :

Master En Génie Civil

Option : Géo-matériaux et Structures

Présenté Par :

Hafsi Khadidja

Mekki Fatima

THEME

**Amélioration des caractéristiques
physiques et mécaniques de l'argile
rouge de Mraguen (Adrar)**

Soutenu Le 21/09/2015 Devant Le Jury Composé De :

Pr SEMCHA Abdélaziz
Mme BELAIDI Khadidja
Pr MEKERTA Belkacem
Mr MOULAY OMAR Hassan

Président
Examinatrice
Encadreur
Co-Encadreur

Année Universitaire 2014-2015

Remerciements

*Ce travail à été effectué au sein de l'université Ahmed Draya d'Adrar
Nous adressons nos profonde gratitude à*

*Mr : MEKERTIA BELKACEM, professeur à l'Université D'Adrar,
qui à dirigé et encadré ce travail de recherche.*

Nous remercions également,

*Monsieur Semcha Abdélaziz professeur à l'Université D'Adrar qui m'a
fait l'honneur de présider le jury de ce mémoire.*

Mme : Belaidi Khadija d'avoir accepté d'examiner ce travail.

Monsieur : Moulay Omar Hassan qui à dirigé notre travail,

Monsieur : Abbou Mohammed pour son aide dans se mémoire,

*À tous les responsables de l'université d'Adrar enseignants et
administrateurs, nous leur exprime nos profondes gratitude, et leur grande
générosité tout au long de nos formation.*

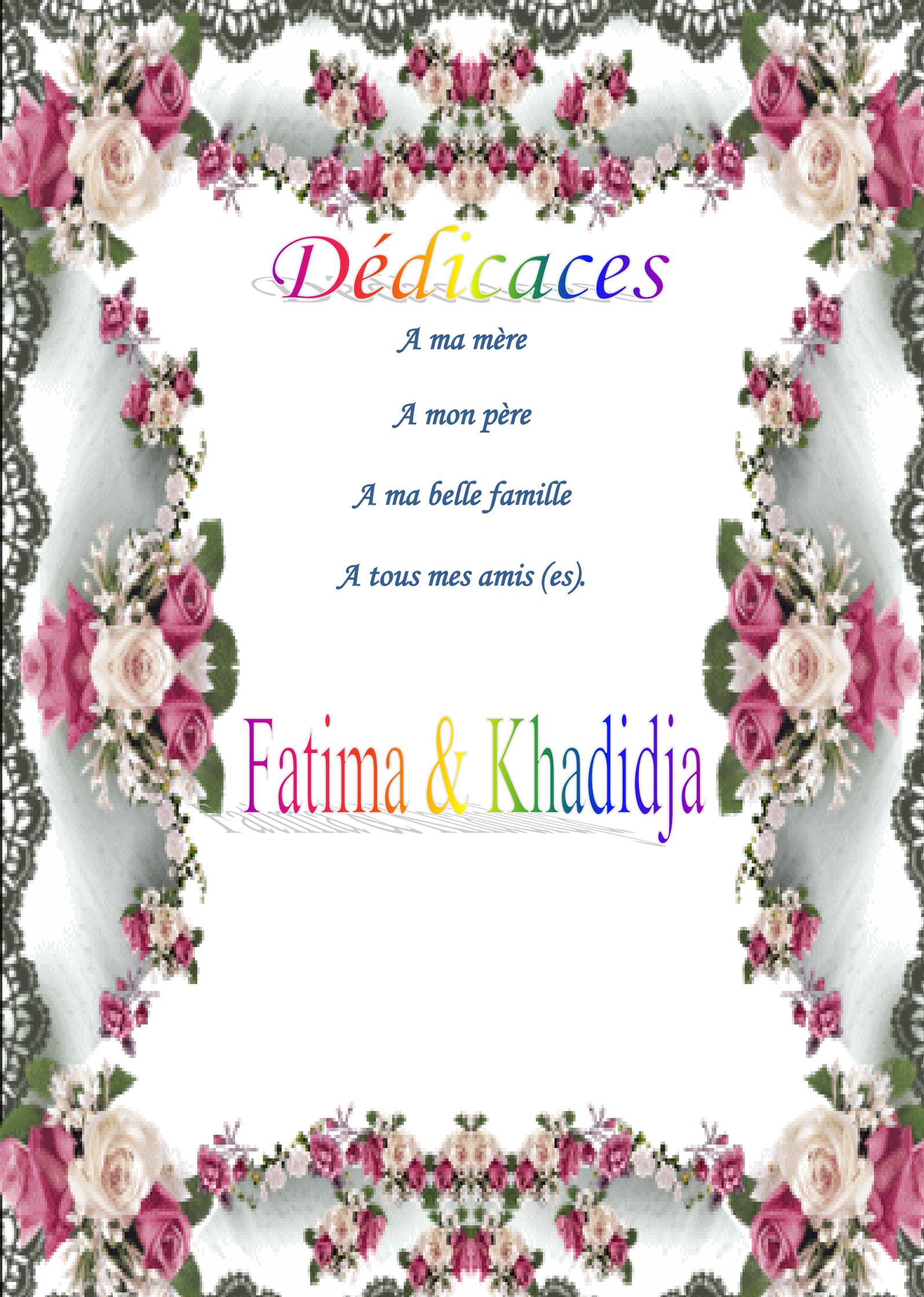
*Nous remercions pareillement l'ensemble des membres du laboratoire de génie
civil de l'Université d'Adrar qu'il côtoyée quotidiennement, notamment
Yaaichi Abdelkrim, Houtiya Abdarahim.*

*Nous ne saurais oublions tous les responsables de la faculté de science et de
technologie surtout le département de Génie civil, de l'université d'Adrar de
d'avoir facilité notre accès au laboratoire.*

Mes pensées vont également à toute ma famille

À mes parents pour leur soutien et leur encouragement permanent

*Enfin nous remercions aussi nos amis (es) pour leur soutien moral et leur
encouragement à suivre nos études, ainsi tous ce qui contribuer à la
réalisation de ce mémoire. Merci pour votre soutien.*



Dédicaces

A ma mère

A mon père

A ma belle famille

A tous mes amis (es).

Fatima & Khadidja

Introduction Générale

Chapitre I

Synthèse bibliographique sur les caractéristiques des argiles

I.1. Généralité sur les argiles.....	1
I .1.1 Introduction.....	1
I .1.2 Minéraux argileux	1
I.1.3 Structure des argiles.....	2
I.2. L' argile et l'environnement	2
I.2.1 composition générale de l'argile.....	2
I.2.2 propriétés des argiles.....	3
I.2.3 classification des argiles.....	3
I.2.3.1 Minéraux de type 1 :1 (ou T-O).....	3
I.2.3.2 Minéraux de type 2 :1 (ou T-O-T).....	4
I.2.3.3 Minéraux de type 2 :1 :1 (ou T-O-T-O).....	4
I.2.3.4 Minéraux inter stratifiés.....	4
I.3 principaux type d'argile et leurs utilisations.....	4
I.3.1 La Kaolinite	5
I.3.2 L'illite	5
I.3.3 La montmorillonite	6
I.4 Phénomènes de gonflement des argiles	7
I.4.1 Mécanisme de gonflement	7
I.4.2 Description du phénomène de gonflement	7
I.4.3 Facteurs affectant le gonflement	8
I.4.4 Activité des argiles.....	9
I.4.5 Facteurs externes affectant le gonflement.....	10
I.4.5.1 Teneur en eau initiale.....	10
I.4.5.2 Densité sèche.....	11
I.5 Analyse des désordres dus au gonflement.....	11
I.6 Conclusion.....	12

Chapitre II

Liste des figures

Les caractéristiques de l'argile étudiée

II.1 Introduction.....	13
II.2 Les essais d'identification.....	13
II.2.1 Le poids volumique des grains solides.....	13
II.2.2 Limites d'atterberg ou limites de consistance.....	15
II.2.2.1 La limite de liquidité (WL).....	16
II.2.2.2 La limite de plasticité (WP).....	17
II.2.2.3 La limite de retrait (WR).....	20
II.2.3 Analyse granulométrique.....	20
II.2.4 Essai au bleu de méthylène à la tache.....	22
II.2.5 la teneur en calcaire (% CaCO ₃).....	25
II.2.6 Etude du phénomène de gonflement de notre argile.....	26
II.3 Les essais mécaniques.....	28
II.3.1 Caractéristique de compactage Norme (NF P 94-093).....	28
II.3.2 Amélioration ,stabilisation et renforcement des sols.....	31
II.4 Conclusion.....	31

Chapitre III

Amélioration et stabilisation des paramètres physiques et mécaniques de l'argile rouge d'Adrar

III.1 Introduction	33
III.2 La stabilisation des sols gonflants.....	33
III.3 Les techniques de stabilisation.....	33
III.3.1 La stabilisation mécanique.....	33
III.4 Etude expérimentale de la stabilisation de l'argile rouge.....	34
III.5 Etude de formulation des mélanges du matériau argileux avec le sable.....	36
III.5.1 Les limites d'atterberg.....	36
III.5.2 Essai d'identification de compactage.....	40
III.5.3 Stabilisation du gonflement de l'argile.....	42
III.5.3.1 Mesure du gonflement libre.....	42

Liste des figures

III.5.3.2 Influence du sable sur le potentiel de gonflement.....	43
III.6 Conclusion.....	45

CONCLUSION GENERALE

Liste des figures

Chapitre I

Figure I.1 : Compositions des argiles (Hafsi, 1993).....	03
Figure I.2 : Quelques types d'argiles.....	04
Figure I.3 : Structure de la Kaolinite (Hafsi, 1993).....	05
Figure I.4 : Structure de l'illite (Hafsi, 1993).....	06
Figure I.5 : Structure de la montmorillonite (Hafsi, 1993).....	06
Figure I.6 : Courbe du gonflement en fonction du temps (Chen, 1988).....	08
Figure I.7 : Potentiel de gonflement en fonction de la teneur en eau initiale.....	10
Figure I.8 : Variation de la pression de gonflement en fonction du poids volumique sec.....	11
Figure I.9 : Fissure de forme oblique, horizontale ou verticale sur cloisons intérieures.....	12
Figure I.10 : Fissure de forme oblique sur murs de façades.....	12
Figure I.11 : Déformation du dallage périphérique avec revêtement de chaussée fissuré.....	12
Figure I.12 : Affaissement du dallage périphérique.....	12

Chapitre II

Figure II.1: Localisation du site Mraguen (Adrar nord).....	13
Figure II.2 : Appareil de casagrande.....	16
Figure II.3 : Courbe de la limite de liquidité W_L	17
Figure II.4 : Différents états de consistance d'un sol fin en fonction de la teneur en eau.....	19
Figure II.5 : Abaque de plasticité de Casagrande selon la classification L.C.P.C des sols fins.....	20
Figure II.6 : Courbe granulométrique de l'argile.....	22
Figure II.7 : Schéma synoptique du processus opératoire de l'essai du bleu à la tâche (Shaeffner, 1989 ; in Gueddouda, 2005).....	24
Figure II.8 : Classification de l'argile étudié en fonction de la valeur au bleu de méthylène (VBS).....	25
Figure II.9 : Détermination du pourcentage de $CaCO_3$ (calcimètre).....	26
Figure II.10 : appareillage de l'essai proctor normal et modifié	29
Figure II.11 : Essai de densification (compactage : W_{opt} , γ_{dopt}) de l'argile.....	31

Chapitre III

Figure III.1 : Le gisement du sable des dunes d'Adrar (Bouda).....	34
Figure III.2 : Courbe granulométrique du sable de dunes.....	35
Figure III.3 : L'effet de sable sur la limite de liquidité.....	37
Figure III.4 : L'effet de sable sur les limites d'Atterberg de l'argile d'Adrar.....	38
Figure III.5 : Effet du sable sur les limites d'Atterberg de l'argile d'Adrar.....	39
Figure III.6 : Les courbes de compactage Proctor normal des différents mélanges.....	41
Figure III.7 : Résultats de l'optimum Proctor.....	42
Figure III.8 : Courbe de l'essai œnométrique de gonflement.....	45

Liste des tableaux

Chapitre I

Tableau I.1. Comparaison des différents d'argiles essentielles	7
Tableau I.2. Relation entre les types de cations et le gonflement.....	9
Tableau I.3. Activité des différents minéraux (Skempton , 1953).....	10

Chapitre II

Tableau.II.1.Poids volumique secs de quelques minéraux Withman et Lambein in Costet et Sanglérat,1983.....	15
Tableau .II.2. Résultats de l'essai de la limite de liquidité W_L	17
Tableau .II.3. Degré de plasticité des sols.....	19
Tableau II.4. Paramètres physiques de l'argile étudiée.....	21
Tableau II.5. Résultats de l'essai de bleu de méthylène.....	25
Tableau II.6. Estimation du potentiel de gonflement, SNETHEN et al. 1977 in BENHAMOU, 2015.....	27
Tableau II.7. Estimation du potentiel de gonflement, O'NELL et POORMOAYED (1980) in BENHAMOU,2015.....	27
Tableau II.8. Estimation du potentiel de gonflement selon HOLTZ et al. 1973 in BENHAMOU, 2015.....	27
Tableau II.9.Potentiel de gonflement d'après le BRE (1980)in (Bourabah M.A, 2012).....	27
Tableau II.10. Synthèse des paramètres de notre argile.....	28
Tableau II.11.Les résultats de l'essai proctor normal.....	30
Tableau II.12. Les paramètres de l'optimum Proctor.....	31

Liste des tableaux

Chapitre III

Tableau III.1. L'analyse granulométrique du sable des dunes.....	35
Tableau III.2. Les résultats de la limite de liquidité des différents mélanges.....	36
Tableau III.3. Les résultats de l'essai de la limite de plasticité des différents mélanges.....	36
Tableau III.4. Résultats des limites d'Atterberg de l'argile et des différents mélanges.....	37
Tableau III .5. Résultats des paramètres de l'essai Proctor Normal γ_d et W des différents mélanges.....	40
Tableau III.6. Résultats de l'essai œnométrique de gonflement.....	44

Chapitre II

Photo II.1 : Mode opératoire de l'essai du poids du poids volumique sec.....	14
Photo II.2 : Images présentant le mode opératoire de la limite de liquidité W_L	17
Photo II.3 : Mode opératoire de la limite de plasticité.....	18
Photo II.4 : Vues de l'état semi-solide à solide	20
Photo II.5 : Photos présentant le mode opératoire de l'essai de sédimentométrie.....	21
Photo II.6: Photos présentant le mode opératoire de l'essai de bleu de méthylène.....	23
Photo II.7 : Photos présentatant le mode opératoire de l'essai proctor.....	30

Chapitre III

Photo III.1 : Appareillage de l'essai œnométrique de gonflement.....	44
--	----

Notations

Abréviations et symboles utilisés

Al⁺³	: Ion d'aluminium ;
Al₂O₃	: Oxyde d'aluminium ;
C	: Paramètre de cohésion ;
C₂	: Pourcentage des éléments inférieur à deux microns (%) ;
Ca⁺⁺	: Ion de calcium ;
C.E.C	: Capacité d'échange cationique (meq/100g) ;
Cm	: Correction due au ménisque ;
Ct	: Correction due à la variation de température au cours de l'essai ;
H₂O	: Eau ;
Hr	: Hauteur (m) ;
W_L	: Limite de liquidité ;
W_P	: Limite de plasticité ;
W_R	: Limite de retrait ;
I_p	: Indice de plasticité ;
I_R	: Indice de retrait ;
K⁺	: Ion de potassium ;
Mg⁺²	: Ion de magnésium ;
N	: Nombre d'Avogadro ;
Na⁺	: Ion de sodium ;
O⁻²	: Ion d'oxygène ;
Si⁺⁴	: Ion de silicium ;
SiO₂	: Oxyde de silicone ;
Sst	: Surface spécifique totale (m²/g) ;
t	: Temps (s) ;
T-O	: Tétraédrique- octaédrique ;
T-O-T	: Tétraédrique- octaédrique- Tétraédrique ;
T-O-T-O	: Tétraédrique- octaédrique- Tétraédrique- octaédrique ;

Notations

Fe⁺²	: Ion de fer ;
OH	: Hydroxydes ;
Δh	: variation de l'Enthalpie (cal/mole) ;
γ_s	: Poids spécifique des particules solides ;
W_s	: poids du sol sec ;
V_s	: volume des particules solides ;
W1	: poids du pycnomètre vide(g) ;
W2	: poids du pycnomètre + l'eau distillé (g) ;
W3	: poids de pycnomètre + l'argile(g) ;
W4	: poids de pycnomètre +l'argile +l'eau distillée (g) ;
σ_w	: poids volumique de l'eau à 20°C ;
W	: teneur en eau (%) ;
VB	: valeur au bleu ;
Wopt	:La teneur en eau optimale(%) ;
γ_{dopt}	: Le poids sec optimale (KN/m³) ;
γ_d	: Le poids sec (KN/m³) ;
A	: Argile ;
S	: Sable ;

Introduction générale

En Génie Civil, le comportement des formations argileuses en sous-sols, a souvent orienté les recherches des ingénieurs vers le sol d'assise des constructions. Il peut apparaître dans des cas précis des phénomènes de gonflement dans le temps, qu'on peut estimer et expliquer en fonction des conditions climatiques de teneur en humidité et de saturation des sols (régions arides et semi-arides). L'apparition de fissures à travers les ouvrages construits de construction (bâtiment, fondation superficielle, ouvrage de soutènement, remblais, routes ... ; ou bien les ouvrages enterrés, tunnel, pieux, canalisation, fondation profonde,...) a toujours constitué une préoccupation majeure ; évidemment, après avoir exclu l'action sismique lorsque la région n'a pas connu de séisme dans le proche passé, qui elle aussi, engendre des dégâts similaires. Ce phénomène de gonflement est prépondérant dans les matériaux argileux et dépend surtout des caractéristiques minéralogiques des minéraux argileux.

Les matériaux argileux constituent souvent des mélanges naturels complexes de minéraux dont la granulométrie et les propriétés physiques, chimiques et mécaniques sont très variables.

Les minéraux argileux et les argiles sont étudiés dans de nombreux domaines tel que:- pour les géologues, les argiles apportent des informations sur les conditions environnementales (source, condition de formation, diagenèse ...) ;

- les ingénieurs civils, s'intéressent aux propriétés des argiles en tant que matière industrielle (réfractaires, matériaux de construction), tandis que les agronomes analysent les propriétés d'hydratation et d'adsorption des argiles pour concevoir les fertilisants.

C'est dans ce contexte que s'inscrit notre thème de master, puisqu'il se trouve que la région d'Adrar est connue géologiquement qu'elle possède des gisements importants d'argiles de différentes natures et caractéristiques minéralogiques. La région se caractérise aussi par un climat aride, le phénomène de gonflement-retrait est favorablement excité.

L'étude présentée permettra une connaissance des caractéristiques physico-chimiques et mécaniques d'une argile particulière qui se trouve en abondance dans la région d'Adrar d'une part ; et d'autre part on recherchera une amélioration de ces caractéristiques par ajout de sable à des pourcentages bien déterminées.

Introduction générale

Nous avons organisé le présent mémoire en trois chapitres structurés comme suit:

- le premier chapitre est une synthèse bibliographique sur les caractéristiques des argiles ;
- le second chapitre abordera une étude expérimentale sur les caractéristiques physiques, chimiques et mécaniques de l'argile rouge d'Adrar qui se trouve à quelques kilomètres au nord de la ville d'Adrar (Est de la RN6).
- le troisième chapitre développera les méthodes d'amélioration, stabilisation et renforcement de cette argile par ajout de sable.

En dernier, une conclusion générale rassemblera les points importants de ses travaux de recherche, les remarques pouvant être tirées ainsi que les perspectives sur lequel on peut prendre connaissance.

Résumé

Les problèmes posés aux ouvrages de génie civil par le comportement de certains sols dits « **gonflants** » sont largement répandus. Le phénomène de gonflement des sols a été abordé aussi longtemps dans le domaine de la géotechnique, car il cause beaucoup d'endommagements et désordres à travers le monde qui se chiffrent à un coût très élevé. L'objet d'étude de ce mémoire s'inscrit dans le cadre de la connaissance, l'amélioration et la stabilisation d'une argile très plastique et gonflante au niveau d'un gisement à ciel ouvert de la région d'Adrar. Cette région se caractérise par un climat aride à grandes variations climatologiques de température, et se distingue aussi de point de vue géologique par des formations argileuses dominantes.

Le présent travail fixe son objectif principal dans la connaissance des différentes caractéristiques minéralogiques, physiques et chimiques des argiles. Il consiste dans un premier temps d'analyser le phénomène de gonflement de ces matériaux particuliers et d'exploiter les études géotechniques, pour stabiliser et modifier les caractéristiques physiques chimiques et mécaniques de ces sols par ajout de sable.

Les résultats obtenus sur les sols prélevés ont permis de constater que la stabilisation par l'ajout de sable modifie considérablement les caractéristiques physiques, chimiques et mécaniques.

Mots clés : Argile d'Adrar, gonflement, amélioration, stabilisation, sable

ملخص

تعتبر مشكلة انتفاخ التربة من بين المشاكل المطروحة في هياكل الهندسة المدنية . وقد نوقشت هذه الظاهرة في عدة مجالات لأنها تسبب الكثير من الضرر والاضطرابات في جميع أنحاء العالم والتي تكلف أموال طائلة في مجال الهندسة الجيوتقنية.

في عملنا هذا قمنا بدراسة طين منطقة أدرار لتمييز هذه المنطقة بمناخ جاف مع تقلبات درجات الحرارة الكبيرة. وهدفنا الرئيسي هو كيفية الحد من ظاهرة انتفاخ التربة وذلك بتعديل الخصائص الفيزيائية والميكانيكية و الكيميائية لهذه التربة بإضافة الرمل. وقد أظهرت النتائج المحصلة عليها أن الرمل ساهم بشكل كبير في تحسين واستقرار الخصائص الفيزيائية والكيميائية والميكانيكية لهذه التربة.

الكلمات المفتاحية: طين ادرار ، الانتفاخ، تحسين ، استقرار ، الرمل

Chapitre I
Synthèse bibliographique sur
les caractéristiques des
argiles

I.1. Généralité sur les argiles

I.1.1 Introduction :

Le mot argile est défini par les géologues comme étant une particule dont la dimension est inférieure à 4 micromètres quelque soit sa nature minéralogique.

Certains sols argileux au contact de l'eau réagissent soit par gonflement ou par retrait. Ce phénomène qui est particulier dans les matériaux argileux dépend des caractéristiques minéralogiques des minéraux argileux et est provoqué lorsque le matériau est mis en contact avec l'humidité ou avec une solution possédant un degré de saturation exprimé S_r en pourcentage.

Lorsque l'eau pénètre dans les sols argileux, il conduit au gonflement qui dépend de l'état des contraintes *in situ*. Différents types d'hydratation provoquent le gonflement tels que la capillarité et l'adsorption. Ces phénomènes sont liés à la saturation initiale de matériau argileux d'une part, et aux propriétés électrochimiques des feuillets argileux d'autre part.

I.1.2 Minéraux argileux :

L'argile est une terre naturelle qui se présente comme une roche terreuse à texture très fine, imperméable lorsqu'elle est sèche et plastique lorsqu'elle est humide.

Les argiles sont des produits de décomposition des roches siliceuses, par désagrégation physique et mécanique puis par altération chimique du milieu environnant.

Le terme "ARGILE" désigne une formation rocheuse, mais définit aussi une caractéristique granulométrique comprenant des particules minérales dont le diamètre des grains est inférieur à deux micromètres ($< 2 \mu\text{m}$).

Les minéraux argileux proviennent de l'altération et de la dégradation des roches. On observe une altération physique sous l'effet des variations de température, et surtout l'altération chimique au contact de l'eau qui permet la dégradation en particules de moins de $2 \mu\text{m}$ de diamètre, d'après Homand et al (2000) in [10]. Le

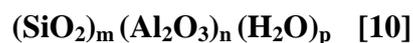
sol est défini comme argileux lorsqu'il contient plus de 50% de particules argileuses, et une

faible quantité de matière organique exprimée MO en pourcentage.

Mouroux et al (1988) in [10], définissent la minéralogie des argiles comme des phyllosilicates d'aluminium hydratés. La silice et l'alumine sont les constituants principaux, ces deux oxydes représentent souvent plus de 70% de la masse totale.

I.1.3 Structure des argiles :

Les argiles sont constituées de fines particules de dimensions inférieures à 2µm chargées négativement. La présence de ces fines particules rend l'argile fortement sensible à l'eau. Cette sensibilité se traduit par le gonflement, le retrait et le changement des paramètres mécaniques. C'est la variation de la teneur en eau qui est le facteur déclenchant des variations de volume. Une augmentation de la teneur en eau entraîne le phénomène de gonflement tandis que sa diminution induit le phénomène de retrait. Ces minéraux sont composés de particules de formes aplaties et de dimensions très petites, les cristaux ressemblent à des minces plaques ou plaquettes. D'après Hafsi, 1993 in [10]; leurs formules chimiques est de la forme suivante :



I.2. L'argile et l'environnement :

I.2.1 Composition générale de l'argile :

Les argiles sont des roches sédimentaires composées principalement de minéraux argileux. Ces minéraux sont des silicates en feuillet (phyllosilicates) d'aluminium plus ou moins hydratés dont les feuillets sont constitués de couches d'octaèdres $\text{Al}(\text{OH})_6$ et de couches de tétraèdres SiO_4 reliées par les atomes O et OH mis en commun. Les minéraux les plus connus sont : la kaolinite, l'illite et la montmorillonite.

Ces minéraux proviennent de la décomposition des roches préexistantes (appelées roches mères), telles que le granit, les micas et surtout les feldspaths. En fonction de sa composition physique et chimique dépend sa couleur ; elle peut être brune, verte, rouge, blanche, jaune ou grise.

L'environnement existant fait que l'argile est essentiellement constituée de silicates d'alumine hydratés, dans lesquels sont mélangés des éléments minéraux qui lui donnent sa coloration.

Ces éléments présents en quantités réduites sont des oxydes d'alumine, de titane, de calcium, de magnésium, de potassium et de sodium (voir Figure I.1, Hafsi, 1993)

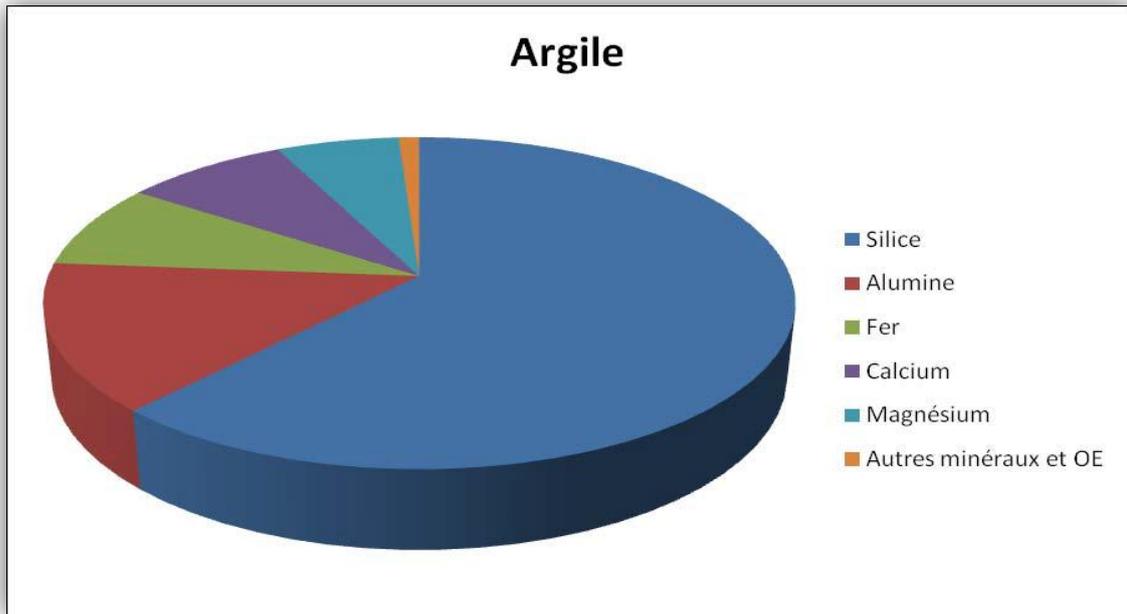


Figure I.1 : Compositions des argiles (Hafsi, 1993) in [6]

I.2.2. Propriétés des argiles :

Les argiles avec leurs faibles tailles transmettent une forte réactivité chimique et physique avec une importante surface de contact.

Les argiles sont des minéraux alumino-silicatés appartenant à la famille des phyllosilicates dont l'unité de base est le feuillet.

La présence des sels minéraux rend l'argile fortement sensible aux molécules d'eau. Cette sensibilité se traduit par le gonflement, le retrait et le changement des propriétés mécaniques.

Les argiles ont des propriétés chimiques du fluide hydratant.

I.2.3 Classification des argiles :

Il existe différentes classifications des argiles. La plus connue est basée sur l'épaisseur et la structure du feuillet. On distingue ainsi quatre groupes [11].

I.2.3.1) Minéraux de type 1:1 (ou T-O)

Le feuillet est constitué d'une couche tétraédrique et d'une couche octaédrique. L'équidistance caractéristique est d'environ $7,1 \text{ \AA}$, ce type correspond au groupe de la kaolinite.

I.2.3.1) Minéraux de type 1:1 (ou T-O)

Le feuillet est constitué de deux couches tétraédriques et d'une couche

d'octaèdres. L'équidistance caractéristique varie de 9,4 à 15 Å° selon le contenu de l'inter feuillet. A ce type correspond les groupes du talc, des **smectites**, des vermiculites et des micas.

I.2.3.3) Minéraux du type 2 :1 :1 (ou T-O-T-O)

Le feuillet est constitué par l'alternance de feuillets T-O-T et de couches octaédriques inter foliaire. L'équidistance caractéristique est d'environ 14 Å°, à ce type correspond le groupe du chlorite.

I.2.3.4) Minéraux inter stratifiés

Il existe des minéraux inters stratifiés, formés d'un empilement régulier ou irrégulier de feuillets de deux types différents. Lorsque l'un des feuillets est de type smectites, le comportement est du type gonflant. C'est le cas de la kaolinite-montmorillonite, la saponite-chlorite, la montmorillonite-mica et l'illite-montmorillonite.

I.3. Principaux types d'argile et leurs utilisations :

Parmi les deux cents types d'argiles rencontrées dans la nature et citées dans les travaux liés à la géotechnique, on distingue essentiellement les argiles monominérales suivantes : la kaolinite, l'illite et la montmorillonite (voir Figure I.2).



Figure I.2 : Quelques types d'argiles [12].

I.3.1 La Kaolinite :

Chaque feuillet de cette famille résulte de l'assemblage d'un feuillet tétraédrique

SiO_4 avec un feuillet octaédrique $\text{AlO}_2(\text{OH})_4$. La Kaolinite est une argile stable, non gonflante et sa structure élémentaire n'est pas affectée par la présence d'eau et ne peut être détruite que par chauffage à 450°C . La formule générale d'un feuillet de la kaolinite est donnée par la formule suivante (Hafsi, 1993) : $n [\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4]$; voir Figure I.3.

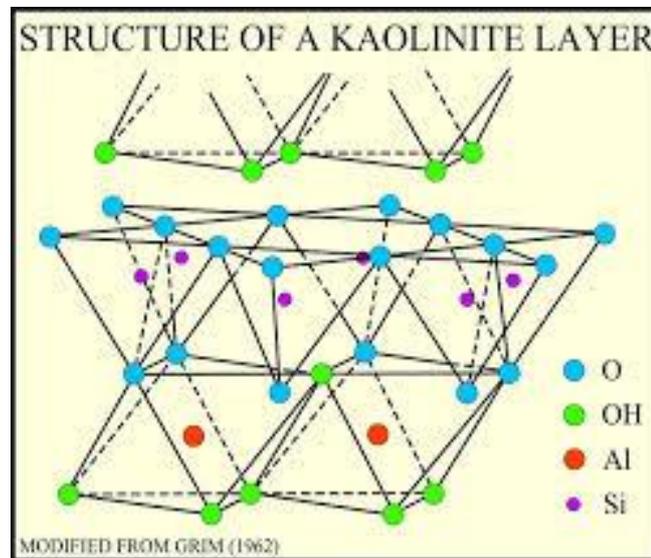


Figure I.3 : Structure de la Kaolinite (JASMUND et LAGALY, 1992), cité par CABANE, 2004.in [1].

I.3.2 L'illite :

Le feuillet élémentaire est 2/1. Dans les couches tétraédriques un cation Si^{4+} sur quatre est remplacé par un cation Al^{3+} . Le déficit de charge qui en résulte est compensé par des ions potassiums K^+ anhydres situés entre les feuillets. Le potassium situé entre les feuillets compense les charges internes et bloque toute hydratation et expansion foliaire (voir Figure I.4).

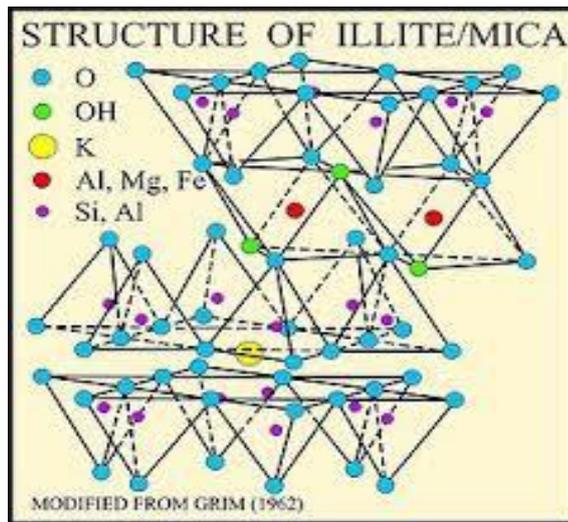


Figure I.4 : Structure de l'illite (JASMUND et LAGALY, 1992), cité par CABANE, 2004.in [1].

I.3.3 La Montmorillonite :

Le feuillet élémentaire est 2/1. Pour la montmorillonite, le déficit de charge interne aux feuillets est provoqué par des substitutions de cations Al^{+3} en couches octaédriques par des cations Mg^{+2} . Ce déficit de charge qui en résulte est compensé par des cations hydratés échangeables localisés entre les feuillets (Fig. 8). L'épaisseur des feuillets dépendra de l'état d'hydratation. Le mécanisme de l'hydratation est dominé dans les montmorillonites par la porosité inter agrégats et la porosité interparticulaire. La formule générale de la montmorillonite est la suivante (Hafsi, 1993) : $n[(Al_{1.67}Mg_{0.33})Si_4O_{10}(OH)_2]$; voir Figure I.5.

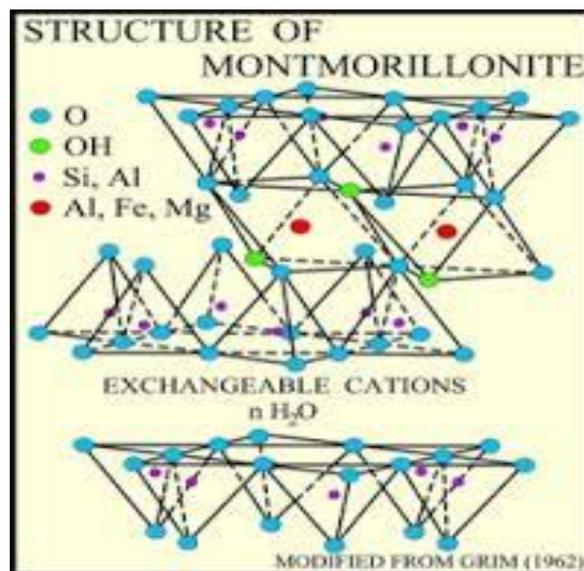


Figure I.5 : Structure de la montmorillonite (JASMUND et LAGALY, 1992), cité par CABANE, 2004.in [1].

Le **tableau I.1** synthétise et compare les caractéristiques de ces trois argiles [8].

Tableau I.1 : Comparaison des différents d'argiles essentielles [8].

<i>Type d'argile</i>	<i>Feuillets Elémentaires</i>	<i>Nombre de feuillets par particule</i>	<i>Dimensions d'une particule</i>	
			<i>largueur en μm</i>	<i>épaisseur en μm</i>
<i>Kaolinite</i>		100-150	1	0,1
<i>Illite</i>		10	0,3	0,01
<i>Montmorillonite (Na)</i>		1	0,1	0,001

I.4. Phénomènes de gonflement des argiles :

I.4.1 Mécanisme de gonflement :

Certaines argiles dont les liaisons interfeuillets sont très faibles, ont la propriété de fixer des molécules d'eau entre deux feuillets voisines, comme en généralement dans le cas des smectites. On remarque que l'eau pénètre à l'intérieur des particules et s'organise en couches monomoléculaires qui provoquent le gonflement.

I.4.2 Description du phénomène de gonflement :

- L'analyse des travaux antérieurs montre qu'on a deux types de gonflements, un gonflement intraparticulaire (interfoliaire) et un gonflement interparticulaire (voir Figure I.6), d'après Mouroux et al (1988) ; Popescu (1986) ; Holtz et Gibbs (1956) ; Chen (1988) in[10].
- Le gonflement interfoliaire est assez rapide et son amplitude est importante.

- Le gonflement interparticulaire résulte de l'apport d'eau supplémentaire avec une réaction lente et qui peut durer des années. Le gonflement interparticulaire à une ampleur assez limitée et affecte toutes les argiles contrairement au gonflement interfoliaire.
- La figure I.6 représente la variation relative de la hauteur d'échantillon en fonction du logarithme du temps, dans laquelle on distingue les deux phases de gonflement :
 - Gonflement primaire : qui débute très tôt, sa finalité est caractérisée par un point d'inflexion où on remarque le changement de l'allure de la courbe.
 - Gonflement secondaire : qui est caractérisé par la partie linéaire de la courbe.

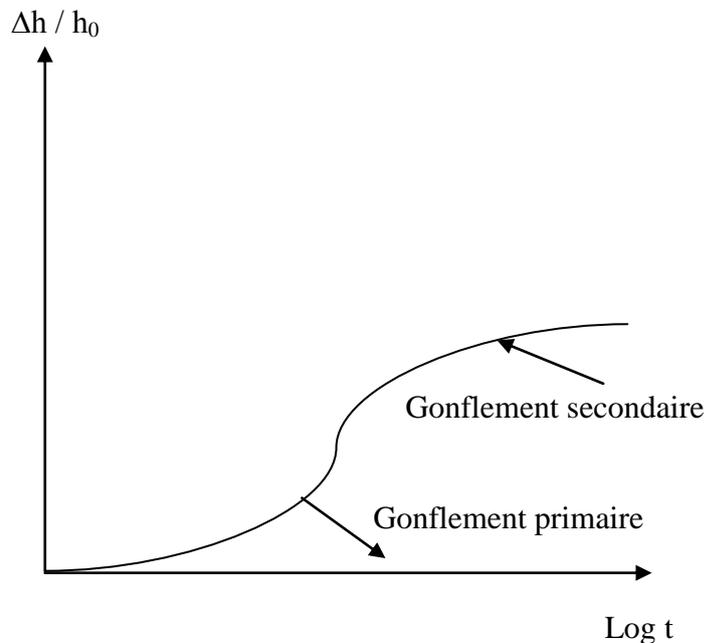


Figure I.6 : Courbe du gonflement en fonction du temps (Chen, 1988)in [6]

I.4.3 Facteurs affectant le gonflement :

Les caractéristiques de gonflement des sols argileux ont été largement étudiées ces dernières années. Les résultats de ces études ont montré que l'amplitude du gonflement et les forces qu'il engendre dépendent d'un certains nombre de facteurs, à savoir :

- La composition et la nature minéralogique, le gonflement du matériau est important que le pourcentage d'éléments argileux soit grand ($2\mu\text{m}$).

- La capacité d'échange cationique (CEC) qui exprime la capacité d'une argile à échanger des cations. Elle est exprimée en milliéquivalent par 100 grammes d'argile et représente la charge (sous forme de cations attirés à la surface de la particule). Cette aptitude des argiles à libérer leurs cations dépend de la valence et la masse atomique du cation présent dans la solution, selon l'ordre croissant suivant : $\text{Li}^+ < \text{Na}^+ < \text{K}^+ < \text{H}^+ < \text{Mg}^{++} < \text{Ca}^{++} < \text{Al}^{+++}$ (voir tableau I.2), d'après (Gupta et al 1967, cité par Gueddouda, 2005)in[10].

Tableau I.2 : Relation entre les types de cations et le gonflement [10]

Cations	Ordre de gonflement
Monovalents	$\text{Na}^+ > \text{K}^+ > \text{NH}_4^+ > \text{H}^+$
Bivalents	$\text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+} > \text{Sr}^{2+} > \text{Ba}^{2+}$
Trivalent	$\text{Al}^{3+} > \text{Cr}^{3+} > \text{Fe}^{3+}$

- La surface spécifique des minéraux argileux croît avec la diminution de la taille des particules, ce qui donne un pouvoir d'absorption plus important et par conséquent, un potentiel de gonflement plus grand (Didier, 1972) in[10].

I.4.4 Activité des argiles :

Les valeurs des limites d'Atterberg sont liées à la quantité d'eau retenue à la surface des particules et ce qui représente la quantité d'argile présente dans le sol. Skempton (1953) in[11], a défini l'activité d'une argile par le rapport de l'indice de plasticité (**Ip**) et le pourcentage des éléments inférieurs à deux microns ($C_2 < 2 \mu\text{m}$) ;

$$\text{Ac} = \text{Ip} / C_2$$

➤ Skempton a classé les argiles selon leurs activités comme suit :

1. Argile inactive : $\text{Ac} < 0,75$
2. Argile normale : Ac compris entre 0,75 et 1,25.
3. Argile active : Ac comprise entre 1,25 et 2.
4. Argile très active : $\text{Ac} > 2$.

Seed et al (1962) in [11]. Ont changé la définition de l'activité de Skempton pour les argiles compactées.

$$\text{Ac} = \text{Ip} / (C_2 - n)$$

$n = 5$ cas pour le cas des sols naturels et $n=10$, cas des sols reconstitués.

Le tableau I.3 présente l'activité des différents minéraux.

Tableau I.3 : Activité des différents minéraux (Skempton , 1953) in [11]

Minéral	Activité
Montmorillonite Na ⁺	4-7
Montmorillonite Ca ⁺	1,5
Illite	0,5-1,3
Kaolinite	0,3-0,5
Calcite	0,2
Quartz	0

I.4.5 Facteurs externes affectant le gonflement :

Ces facteurs sont définis à l'échelle macroscopique contrairement aux facteurs précédents qui interviennent à l'échelle microscopique. On distingue les facteurs suivants d'après différents auteurs [10] :

I.4.5.1 Teneur en eau initiale :

Il existe une teneur en eau critique de 22% pour laquelle on a un potentiel de gonflement apparent nul, d'après Alonso et al (1987) cité par Bengraa in[10], (2004), voir figure I.7.

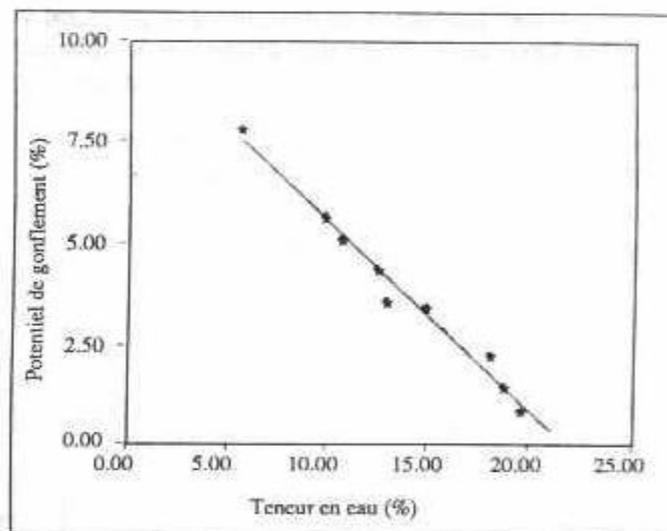


Figure I.7 : Potentiel de gonflement en fonction de la teneur en eau initiale. [10]

I.4.5.2 Densité sèche :

Les travaux de Chen (1988) in [6]. ont permis de montrer que la pression de gonflement varie considérablement avec le poids volumique sec du sol (voir Figure I.8).

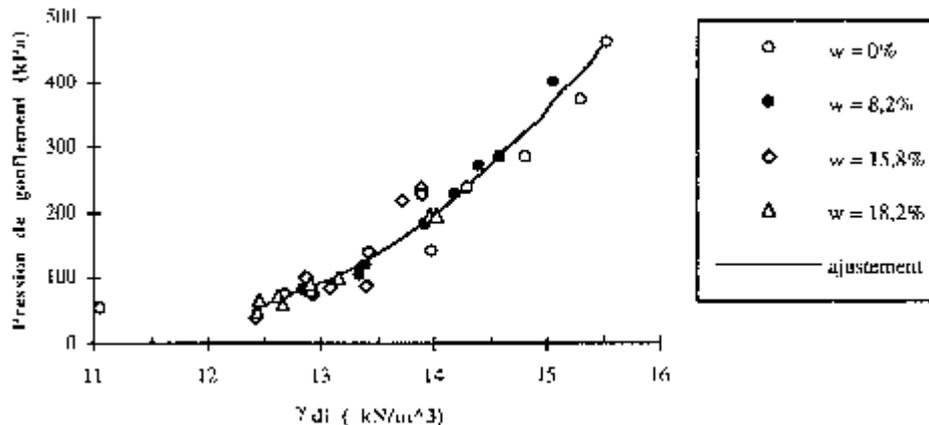


Figure I.8 : Variation de la pression de gonflement en fonction du poids volumique sec [10]

I.5. Analyse des désordres dus au gonflement :

Les problèmes posés aux ouvrages de génie civil par le comportement de certains sols dits « gonflants » sont largement répandus et affectent différents types d'ouvrages à travers le monde. Le phénomène s'étend sur de vastes secteurs géographiques, néanmoins il ne constitue généralement l'objet d'attention qu'après apparition des signes de sinistres. En Algérie, le constat est déjà relevé dans plusieurs régions à l'exemple d'Oran, Hassi-messaoud, In-amenas, Tlemcen, Mila, Souk-Ahras, etc... Il en reste d'autres régions où le phénomène prend de l'ampleur alors qu'il n'est pas suffisamment pris en charge.

Nous montrons sur les figures I.9, I.10, I.11 et I.12 des cas de désordres dus au gonflement des sols, apparus à l'échelle de la ville de Saida au niveau d'une école (Benhamou, 2015).[2]



Figure I.9 : Fissure de forme oblique, horizontale ou verticale sur cloisons intérieurs



Figure I.10 : Fissure de forme oblique sur murs de façades



Figure I.11 : Déformation du dallage périphérique avec revêtement de chaussée fissuré



Figure I.12 : Affaissement du dallage périphérique

I.6. Conclusion :

Ce chapitre fait comprendre que les sols argileux sont à craindre, puisque de par leur structure minéralogique, ils sont souvent à l'origine d'importants dégâts aux bâtis, notamment au cours des périodes de sécheresse prolongée. La maîtrise du phénomène de gonflement et la connaissance parfaite des éléments qui le font occasionner s'avère plus nécessaire afin de pouvoir minimiser les dégâts occasionnés par ce phénomène sur les différents ouvrages construits dans des formations argileuses.

Les sols susceptibles de gonfler sous l'action de l'eau, sont pour l'essentiel des argiles, à l'inverse, toutes les argiles ne sont pas forcément gonflantes. En effet et en se basant sur des théories élaborées, parmi cette grande variété de sols argileux, il existe certaines familles d'argiles, de par leur composition minéralogique, leur microstructure (texture) et en présence de facteurs environnementaux (climatique, géologique et hydrologique...), subissent des variations de volume en fonction de la teneur en eau. Il leur est attribué l'appellation de « **Sols-gonflants** » et le phénomène qu'ils subissent s'appelle « **Le retrait-gonflement** ».

Chapitre II

Les caractéristiques de l'argile étudiée

II.1. Introduction

Dans ce chapitre, on s'intéresse à l'identification des propriétés physiques de l'argile à étudier. Notre objectif est de déterminer un ensemble des propriétés physiques, chimiques et mécaniques de l'argile qui permettent de le caractériser. Les essais d'identification servent de base aux divers systèmes de classification des sols. Notre sol est un gisement d'argile rouge à ciel ouvert qui se trouve en abondance dans la région d'Adrar.

II.2. Les essais d'identification :

Le gisement d'argile est une carrière qui se trouve à quelques kilomètres au nord de la ville d'Adrar (Est de la RN6). Le matériau a une couleur rouge et sert à alimenter la briqueterie d'Adrar.

La figure II.1 montre une vue aérienne du gisement d'argile rouge de Mragen.



Figure II.1: Localisation du site Mraguen (Adrar nord)

Les essais menés sur l'argile ont pour but de déterminer quelques paramètres essentielles, les indices permettant l'identification et la prédiction du comportement du gonflement.

Parmi ces essais on a :

- ✓ Le poids volumique des grains solides ;
- ✓ l'analyse granulométrique ;
- ✓ les limites d'Atterberg ;
- ✓ l'essai au bleu de méthylène ;
- ✓ le pourcentage de carbonate de calcium ;
- ✓ mesure des paramètres de gonflement.

II.2.1. Le poids volumique des grains solides, Norme (NF P94-054) :

Le poids volumique des particules solides γ_s est déterminé à l'aide d'un pycnomètre à eau conformément à la norme NF P 94-054. Elle est définie par le quotient du poids W_s de ces particules solides par leur volume V_s .

$$\gamma_s = W_s / V_s$$

avec :

γ_s : Poids spécifique des particules solides ;

W_s : poids du sol sec ; V_s : volume des particules solides.

La photo II.1 montre les différentes étapes expérimentales pour la détermination du poids volumique sec.



Photo II.1 : Mode opératoire de l'essai du poids volumique sec

$$\gamma_s = \frac{(W3 - W1) * \sigma_w(20^\circ)}{W2 - W1 - W4 + W3}$$

Avec : W1(g) : poids du pycnomètre vide ;

W2(g) : poids du pycnomètre + l'eau distillé ;

W3 (g) : poids de pycnomètre + l'argile ;

W4(g) : poids de pycnomètre + l'argile + l'eau distillé

σ_w : poids volumique de l'eau à 20°C.

Les calculs ont permis d'avoir le résultat suivant :

$$\gamma_s = 26,6 \text{ KN/m}^3$$

Le tableau II.1 montre les valeurs des poids volumiques secs de quelques minéraux caractéristiques d'après Withman et Lambein, in Costet et Sanglérat, 1983 [4].

Tableau II.1: Poids volumiques secs de quelques minéraux Withman et Lambein in Costet et Sanglérat, 1983 [4].

Argile	γ_s (KN/m ³)
<u>Quartz</u>	<u>26,6</u>
K-Feldpath	25,4 à 25,7
<u>Na-Ca- Feldpath</u>	<u>26,2 à 27,6</u>
Calcite	27,2
Dolomite	28,5
Muscovite	27 à 31
<u>Chlorite</u>	<u>26,1 à 29</u>
<u>Kaolinite</u>	<u>26,1 à 26,4</u>
Illite	28,4 à 27,4
Montmorillonite	27,5 à 27,8
Attapulgite	23,0

A première vue et suivant les valeurs du poids volumique sec, notre argile est proche du Quartz, Na-Ca-Feldspath, chlorite et la kaolinite.

II.2.2 : Limites d'Atterberg ou limites de consistance :

Compte tenu de leurs structures, les argiles ont la propriété d'absorber des quantités d'eau très importantes ou de se dessécher en fonction des conditions d'humidité auxquelles elles sont soumises.

Quel que soit la nature et le type d'argile, celle-ci malaxée à des quantités d'eau de plus en plus importantes, finit par se transformer en boue. L'argile est dans un comportement liquide.

Dans une situation contraire où l'argile est suffisamment desséchée, les grains sont très resserrés et les liaisons deviennent intenses. L'argile est dans un comportement solide.

Entre ces deux états extrêmes, l'argile est malléable : elle a un comportement plastique.

Les limites d'Atterberg ont pour but de définir les états d'humidité correspondant aux limites entre ces trois états, l'état d'humidité du sol étant exprimé par sa teneur en eau.

L'essai se fait sur une partie du matériau tamisé au tamis 0.40 mm.

La teneur en eau d'un sol est le rapport entre le poids d'eau contenu dans un certain volume de sol et le poids des grains solides contenus dans le même volume. Elle s'exprime en [%] et a pour symbole **W** de l'anglais water = eau. Elle est déterminée conformément à la norme NFP94-051 [3].

La limite de liquidité W_L traduit le passage entre l'état liquide et plastique.

La limite de plasticité W_p correspond au passage entre l'état plastique et l'état solide.

Ces deux caractéristiques sont reliées par l'indice de plasticité I_p qui s'exprime en % et est donné par la formule ci-après.

$$I_p = W_L - W_p$$
$$I_c = (W_L - W) / I_p$$

II.2.2.1 La limite de liquidité (W_L) : est mesurée à la coupelle de casagrande ou au pénétromètre à cône.



Figure II.2 : Appareil de casagrande

La photo II.2 montre les différentes étapes de l'essai de la limite de liquidité .

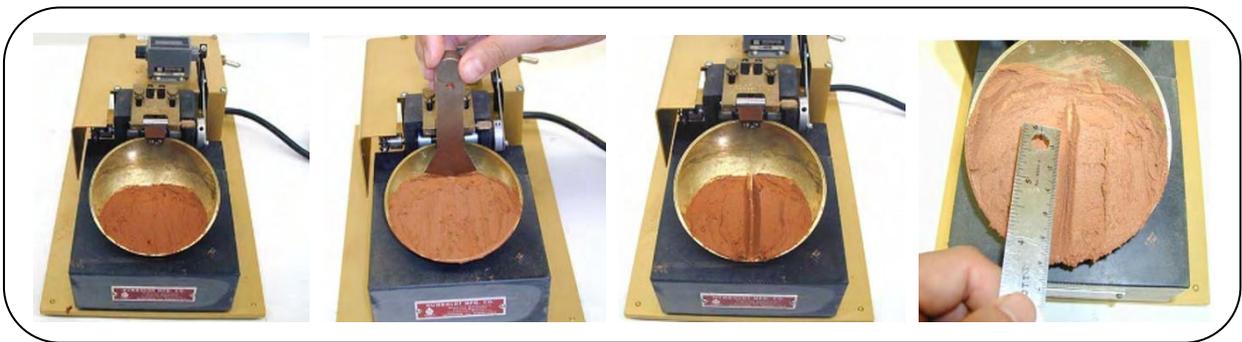


Photo II.2 : Images présentant le mode opératoire de la limite de liquidité W_L

Le tableau II.2 et la figure II.2 montre un exemple de la variation de la teneur en eau en fonction du nombre de chocs de la coupelle pour notre sol. La limite de liquidité W_L est déterminée pour un nombre de chocs (coups) de 25.

Tableau II.2 : Résultats de l'essai de la limite de liquidité W_L

Teneur en eau W%	69.23	76	79.16
Nombre de coups N	33	27	23

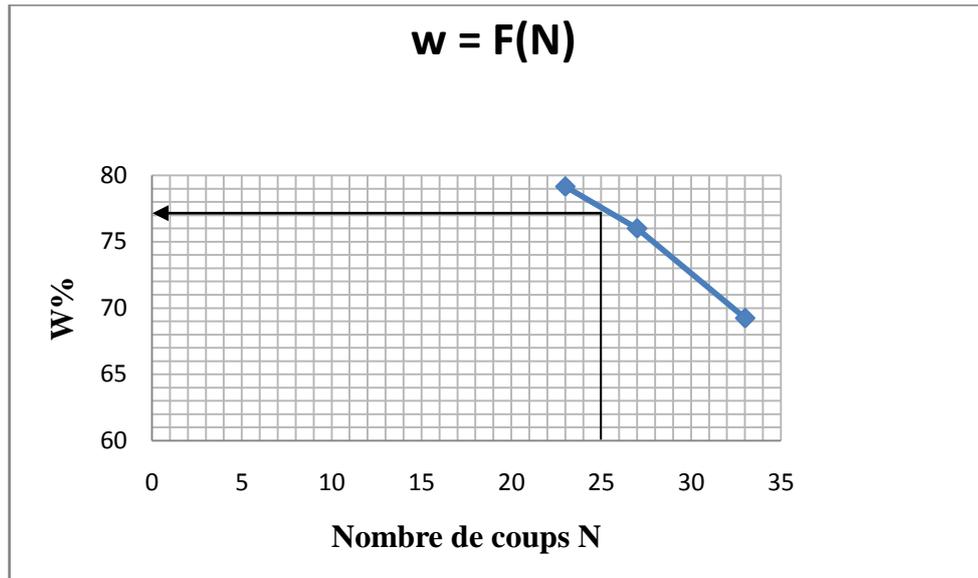


Figure II.3 : Courbe de la limite de liquidité W_L

D'après la courbe on a : $W_L = 77.8\%$.

Pour le même intervalle des valeurs de N, la formule empirique approchée ci-dessous permet de trouver la valeur de W_L en fonction de N.

$$W_L = W (N/25)^{0.121}$$

II.2.2.2 La limite de plasticité W_P (NF P 94-051) :

La limite de plasticité (W_P) mesurée à la méthode au rouleau représente la teneur en eau du passage de l'état plastique à l'état solide.

On mélange l'échantillon avec des quantités variables d'eau, on façonne avec la pâte un rouleau de 6 mm de diamètre pour une dizaine de mm de longueur. Puis on atteint 3mm de diamètre en le roulant (souvent avec les doigts), après 5 à 10 allers-retours maximum. La limite de plasticité est la teneur en eau en % du rouleau qui se fissure et se brise lorsqu'il atteint un diamètre de 3 mm, avec une hauteur de 30 mm environ. La photo II.3 présente le mode opératoire de la limite de plasticité.



PhotoII.3 : Mode opératoire de la limite de plasticité

A partir des essais on a $W_p = 36.44 \%$

On peut déterminer l'indice de plasticité $I_p = W_L - W_p = 77.8 - 36.44 = 41.36$ et

$I_c = (W_L - W) / I_p = (77.8 - 1.07) / 41.36 = 1.85$

Suivant la valeur l'indice de plasticité, les sols peuvent se classer comme suit :

voir tableau II.3 :

Tableau II.3 : Degré de plasticité des sols [5]

Indice de plasticité	Degré de plasticité
$0 < I_p < 5$	Non plastique (l'essai perd sa signification dans cette zone de valeurs)
$5 < I_p < 15$	Moyennement plastique
$15 < I_p < 40$	Plastique
$I_p > 40$	Très plastique

A partir des résultats obtenus, on a $I_p = 41.36 > 40$, donc on classe le sol suivant son degré de plasticité comme très plastique.

La consistance d'un sol fin varie suivant sa teneur en eau plus précisément, en opérant à une teneur en eau décroissante on rencontre les quatre états suivants (voir figure II.3) :

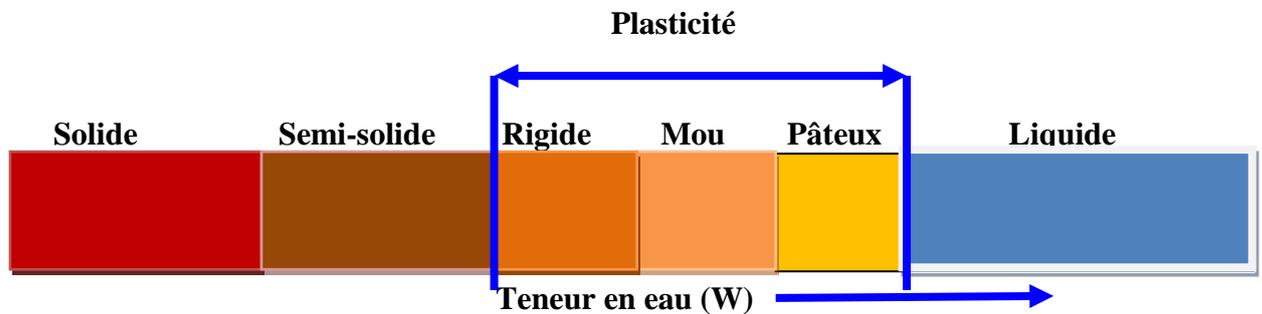


Figure II.4 : Différents états de consistance d'un sol fin en fonction de la teneur en eau.[3]

Le degré de plasticité peut être évalué aussi à l'aide du diagramme de Casagrande. Il y'a lieu de reporter les résultats des limites d'Atterberg obtenues pour notre échantillon et situer l'état de plasticité auquel il appartient (voir figure II.4). Notre sol est une argile très plastique (At).

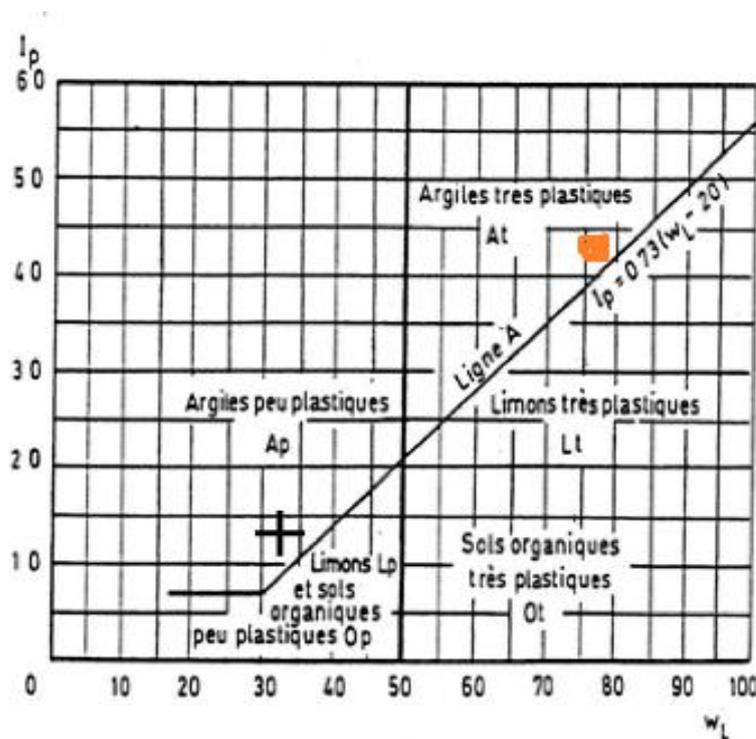


Figure II.5 : Abaque de plasticité de Casagrande selon la classification L.C.P.C des sols fins LCPC (Laboratoire des Centrales des Ponts et Chaussées).

II.2.2.3 La limite de retrait W_R (NF P 94-051) :

La limite de retrait représente la teneur en eau du passage de l'état solide avec retrait à l'état solide sans retrait.

La limite de retrait W_R , est une valeur obtenue à partir d'un échantillon dont la teneur en eau initiale est proche de celle de la limite de liquidité. La limite de retrait dépend de la teneur en eau initiale (voir photo II.4).



Photo II.4 : Vues de l'état semi-solide à solide

On définit I_R comme étant l'indice de retrait

$$\text{on a } I_R = W_L - W_R \quad \text{donc } I_R = 77.8 - 12.78 = 65.02$$

Le tableau II.4 regroupe les paramètres physiques de notre argile.

Tableau II.4 : Paramètres physiques de l'argile étudiée

Sol	W_L (%)	W_p (%)	W_R (%)	I_p (%)	I_R (%)	I_c (%)
Argile d'Adrar	77.8	36.44	12.78	41.36	65.02	1.85

II.2.3 Analyse granulométrique (Norme NF P94-056) :

Le but de l'essai est de déterminer en poids de la distribution dimensionnelle les éléments des sols. Elle s'obtient par deux opérations successives et complémentaires :

- le tamisage sous l'eau (par voie humide) selon la norme NF P94-056, pour les particules de dimensions $\geq 80\mu\text{m}$ (0.08mm) ;
- la sédimentométrie selon la norme NF P94-057, pour les particules de dimensions $< 80\mu\text{m}$ qui va compléter la première.

L'analyse granulométrique par sédimentation est un essai qui complète l'analyse granulométrique par tamisage d'un sol et qui peut être nécessaire à sa description et sa classification. La photo II.5 montre les accessoires du mode opératoire de l'essai de sédimentométrie.



Photo II.5 : Photos présentant le mode opératoire de l'essai de sédimentométrie

La figure II.5 montre les résultats de calcul qui sont représentés graphiquement sur une courbe appelée courbe granulométrique de l'argile.

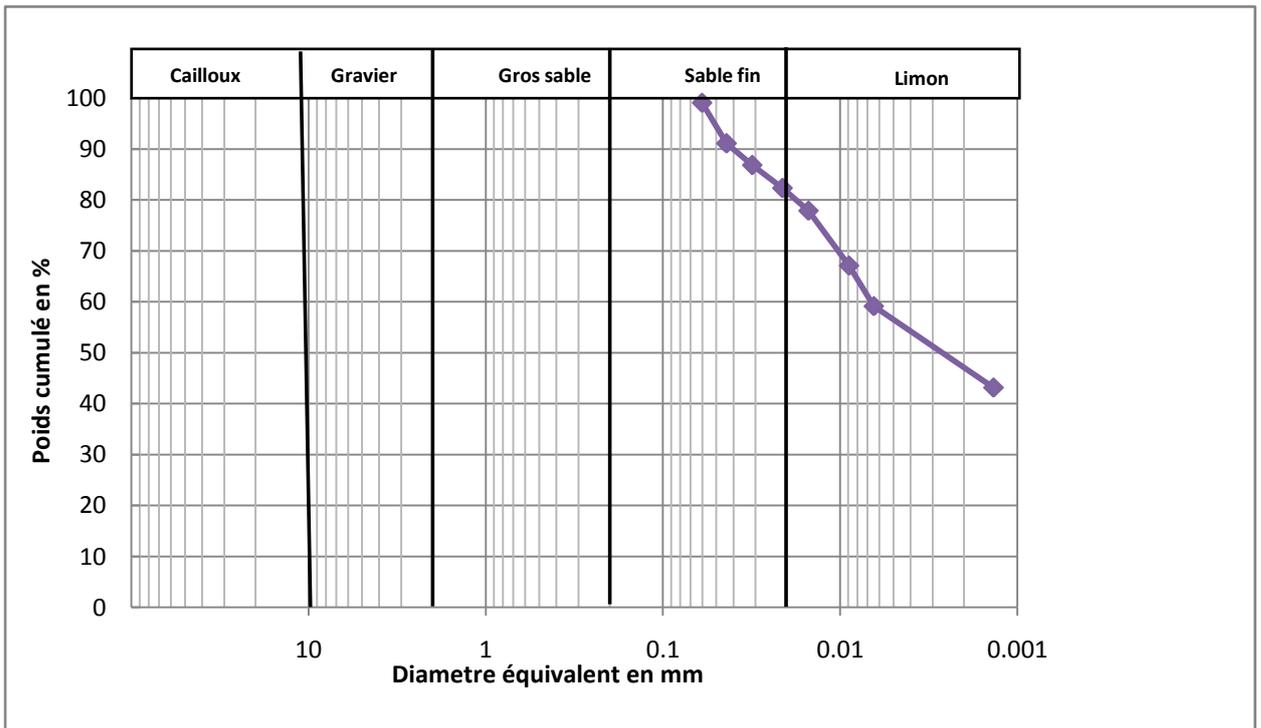


Figure II.6 : Courbe granulométrique de l'argile

A partir de la figure II.5, nous remarquons qu'on est en présence d'un sol fin puisque plus de 50% des éléments ont un diamètre inférieures à 80 μ , avec les éléments inférieurs à 2 μ ; 47%.

II.2.4 Essai au bleu de méthylène à la tache (NF P 94-068) : [10]

Le principe de l'essai consiste à maintenir en permanence sous agitation un mélange « échantillon + l'eau », puis à introduire des quantités croissantes de bleu de méthylène par doses successives jusqu'à ce que les particules argileuses soient saturées. Il apparait alors un excès qui marque la fin de l'essai et qui est détecté par le test de la tache .Ce dernier consiste à former avec une goutte de la suspension sur du papier filtre normalisé , une tache qui est un dépôt de sol coloré en bleu , entouré d'une zone humide incolore. L'excès de bleu se traduit par l'apparition dans cette zone d'une auréole d'un bleu clair, le teste est dit positif.

Si au bout de 5 minutes elle apparait cette auréole, la fin de l'essai est obtenue par la mesure du volume de bleu de méthylène.

L'essai au bleu permet une évaluation globale de la quantité et de l'activité de la fraction argileuse :

$$\text{La valeur de bleu est : } \quad \mathbf{VB} \quad \frac{\text{Volume en cm}^3 \text{ de solution}}{\text{Poids sec de la prise}}$$

- Trom Ngoc lan (1981) in[10] indique « qu'un sol absorbera d'autant plus de bleu de méthylène que :
 - la quantité d'argile qu'il contient est importante ;
 - cette argile est active , c'est -à-dire qu'elle développe une surface spécifique interne et externe élevée (Sst).
- Gaillabaud et cinot (1982) [10] a donné une relation entre la surface spécifique totale (Sst) et la valeur de bleu de la phase argileuse V_B (0/2 μ m).

$$Sst = 21 \cdot VB \text{ (0/2}\mu\text{m)} = 168 \text{ m}^2/\text{g}$$

La photo II.6 montre les différents accessoires du mode opératoire de l'essai au bleu de méthylène. Par contre, la figure II.11 montre le schéma synoptique Schéma du processus opératoire de l'essai au bleu.



Photo II.6 : Photos présentant le mode opératoire de l'essai de bleu de méthylène

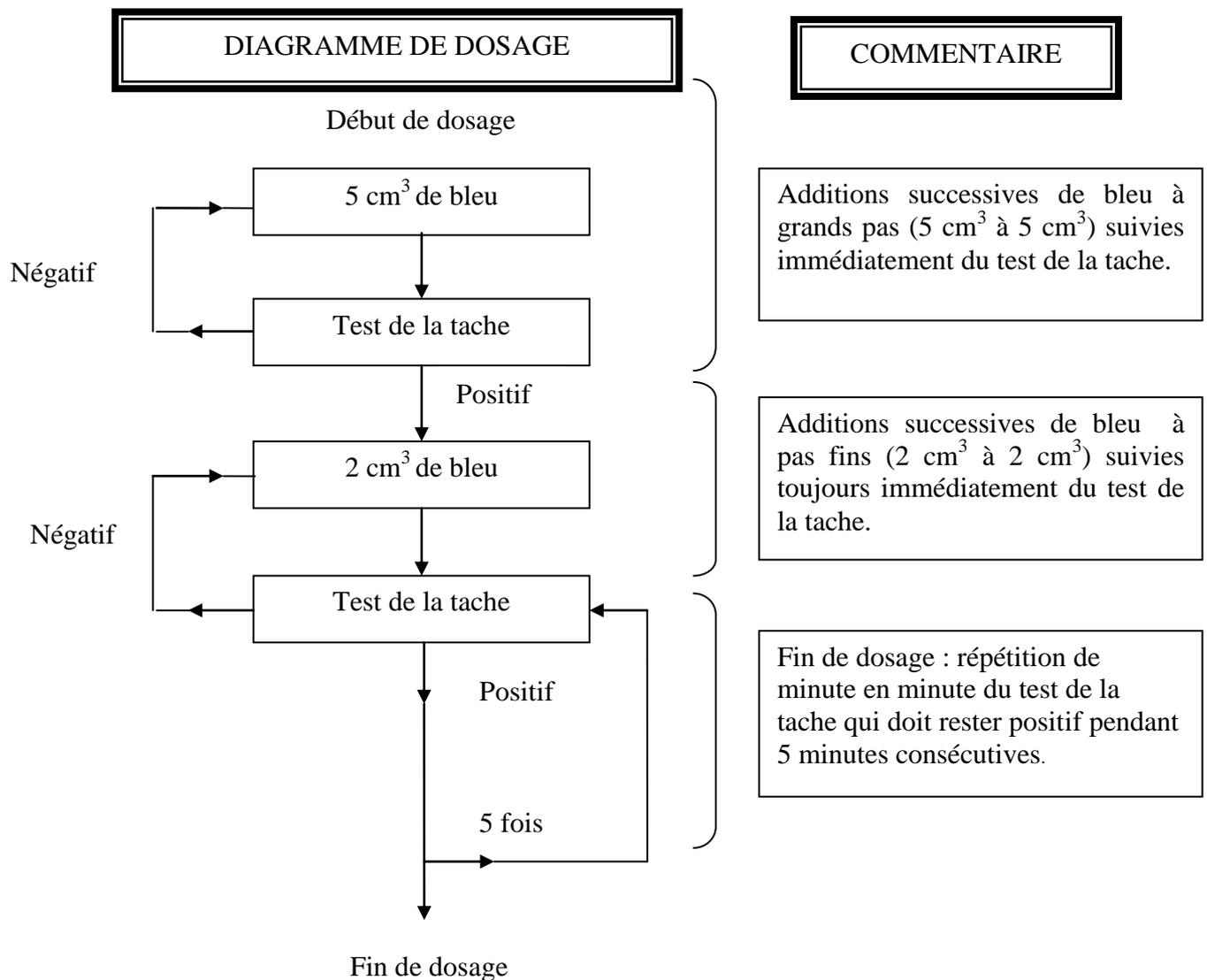


Figure II.7 : Schéma synoptique du processus opératoire de l'essai du bleu à la tache (Shaefiner,1989 ; in Gueddouda, 2005) in [10].

- La valeur de bleu de notre argile est : $VB = 8$.

Les catégories des sol selon la valeur de bleu de méthylène d'après le Guide de Terrassements Routiers (GTR, 1992), sont présentées dans le tableau II.5.

Tableau II.5 Les catégories des sol selon la valeur de bleu de méthylène d'après le Guide de Terrassements Routiers (GTR, 1992)

Tableau II.5 : Résultats de l'essai de bleu de méthylène [6]

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

D'après le tableau II.5, on confirme que notre sol est argileux à très argileux

Classification du sol :

Selon aussi le «Guide Technique pour la Réalisation des Remblais et des couches de forme », [GTR.2000], en fonction de la valeur de bleu de méthylène qui est égale à 8, le sol étudié est placé dans le groupe des **sol argileux à très argileux** (voir figure II. 7).

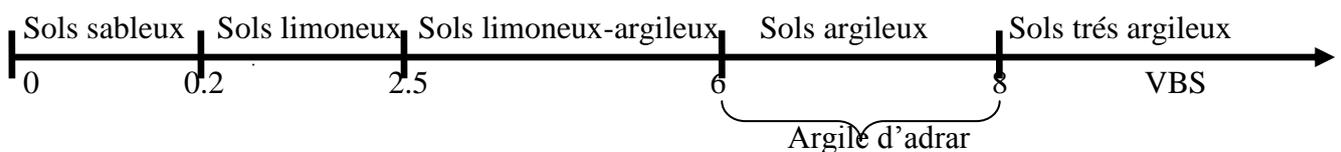


Figure II.8 : Classification de l'argile étudiée en fonction de la valeur au bleu de méthylène (VBS) selon [GTR.2000], [3]

- Classification du sol selon le LCPC :

On est en présence d'un sol fin car plus de 50% des éléments ont un diamètre $< 0,080$ mm. Selon le diagramme de plasticité de sols on a une Argile très plastique (At)

- Classification du sol selon le GTR (Guide des travaux Routiers) :

Le passant à $80\mu\text{m}$ se situe en 35 et 100%, la valeur au bleu est $VB = 8$. Selon le GTR notre sol se classe se classe en (A₃.ts), car $I_p = 41,36$ % et $I_c > 1,3$, De ce fait, notre sol est un matériau qui nécessite un traitement préalable afin de répondre aux exigences recensées en technique routière (Bourabah M.A, 2012) in[3].

II.2.5 La teneur en calcaire (% CaCO₃) :

La réalisation de l'essai au calcimètre sur notre argile à l'USTO, IGCMO – Oran (voir figure II.8), nous a conduit à une valeur du pourcentage de carbonate de calcium de 5.39 % indiquant qu'on est en présence d'un sol argileux.

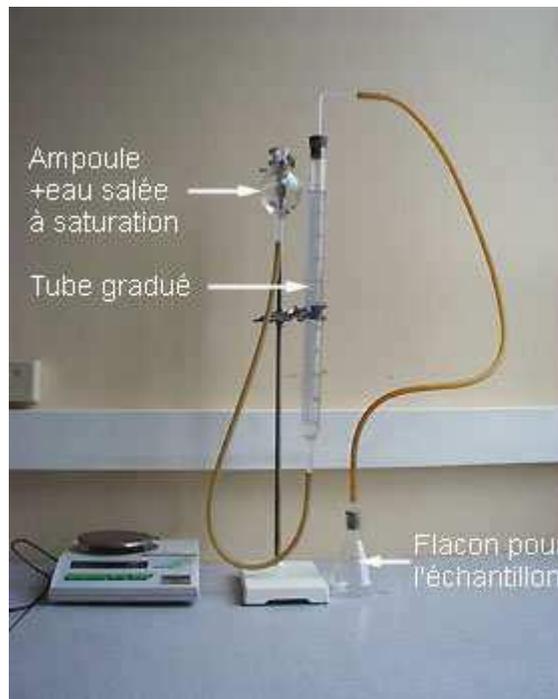


Figure II.9 : Détermination du pourcentage de Ca CO₃ (calcimètre)

II.2.6 Etude du phénomène de gonflement de notre argile :

On sait que les argiles ont un pouvoir de gonflement qui se répercute sur la stabilité des constructions.

Dans ce qui suit, et d'après plusieurs travaux antérieurs on peut estimer le potentiel de gonflement d'après les caractéristiques physiques trouvées.

Le potentiel de gonflement de notre sol peut être estimé par références aux tableaux des classifications suivantes selon les travaux antérieurs (Tableaux II.6, II.7, II.8 et II.9).

Tableau II.6 : Estimation du potentiel de gonflement, SNETHEN et al. 1977 in BENHAMOU, 2015 in [2].

W_L (%)	I_p (%)	Potentiel de gonflement	Classification
< 50	< 25	< 0.5	Faible
50-60	25-35	0.5-1.5	Moyen
> 60	> 35	> 1.5	Elevé

Tableau II.7 : Estimation du potentiel de gonflement, O'NEILL et POORMOAYED (1980) in BENHAMOU, 2015 in [2].

W_L (%)	I_p (%)	Classification
20-49	15-24	Faible à moyen
50-70	24-46	Elevé
> 70	> 46	Très élevé

Tableau II.8: Estimation du potentiel de gonflement selon HOLTZ et al. 1973 in BENHAMOU, 2015 in [2].

I_p (%)	W_R (%)	W_L (%)	Classification
< 18	< 15	20-35	Faible
15-28	10-15	35-50	Moyen
25-41	7-12	50-70	Elevé
> 45	> 11	> 70	Très élevé

Tableau II.9 : Potentiel de gonflement d'après le BRE (1980)
in (Bourabah M.A, 2012) [3].

I_R (%)	Potentiel de gonflement
0 à 20	Faible
20 à 30	Moyen
30 à 60	Fort
> 60	Très fort

On résume dans le tableau II.10, les valeurs trouvées des paramètres physiques afin d'estimer le caractère de gonflement de notre argile.

Tableau II.10: Synthèse des paramètres de notre argile

I_P (%)	W_R (%)	W_L (%)	I_R (%)	Classification du gonflement
41.36	12.87	77.8	65.02	Tableau II.6 : Elevé
				Tableau II.7 : Elevé à très élevé
				Tableau II.8 : Elevé à très élevé
				Tableau II.9 : Très fort

Nous pouvons dire d'après le tableau II.10, que notre argile a un pouvoir de gonflement important qu'il faut étudier.

En résumé, notre argile rouge a un potentiel de gonflement élevé à très fort. Il est nécessaire d'étudier les paramètres de gonflement de cette argile ; à savoir :

- le gonflement libre ;
- le potentiel de gonflement ;

Rechercher par la suite les méthodes de stabilisation et de renforcement de cette argile dans des applications en génie civil.

Ces axes de recherche seront étudiés au niveau de chapitre III.

II.3 Les essais mécaniques :

II.3.1 Caractérisation de compactage, Norme (NF P 94-093) : [10]

Le compactage des sols est une méthode de stabilisation mécanique des matériaux en place ou ramenés (remblai, route, etc...). Il a pour but de limiter les tassements, diminuer la perméabilité et d'améliorer les caractéristiques mécaniques du sol.

Les paramètres de compactage sont très utilisés pour identifier les matériaux et pour définir les spécifications de compactage. L'essai Proctor (γ_{dmax} , W_{opt}) permet de déterminer les caractéristiques de compactage d'un matériau et montre l'importance de la teneur en eau vis à vis du poids volumique sec obtenu pour une énergie de compactage donnée.

Le principe de ces essais consiste à humidifier un matériau à plusieurs teneurs en eau et à le compacter selon un procédé et une énergie conventionnelle. Pour chacune des valeurs de la teneur en eau considérée, on détermine le poids volumique sec du matériau. Par la suite, on trace la courbe des variations du poids volumique sec en fonction de la teneur en eau.

L'essai est effectué généralement selon deux modes de compactage d'intensités différentes :

- essai proctor modifié à énergie plus intense et l'essai proctor normal.

La figure II.9 montre l'appareillage de l'essai proctor normal et modifié.



Figure II.10 : appareillage de l'essai proctor normal et modifié

Dans notre étude on a réalisé l'essai proctor normal.

Mode opératoire de l'essai :

- Le choix du moule est défini par la taille des grains.
- Le choix de l'énergie de compactage est défini par l'utilisation envisagée du sol.
- On effectue l'essai Proctor suivant la norme (nombre de couches, nombre de coups de la dame par couche et la disposition de ces coups). On retire la hausse et on l'arase.
 - ✓ En premier on prend une quantité de sol de 15kg et on divise en 05 parties sensiblement égales.
 - ✓ On humidifie le sol à la teneur en eau connue (14,16,18,20... etc) et on homogénéise bien le sol.
 - ✓ On fait monter la base du moule sur son socle et on pèse l'ensemble, puis on monte la hausse sur le moule.
 - ✓ On prend 2Kg de l'argile et on divise en trois parties.
 - ✓ Chaque partie dans le moule est compactée à 25 coups (24 à l'extrémité et le 25^{ème} coup au milieu).
 - ✓ On pèse le moule, le socle et le contenu ; puis on déduit la masse du sol contenu dans le moule.
 - ✓ On démonte le socle et on prélève une petite quantité de sol supérieure à 150 g de part et d'autre du moule. Par la suite on effectue les mesures de la teneur en eau.
 - ✓ On représente graphiquement la variation de γ_d en fonction de la teneur en eau w . on obtient une courbe en cloche qui représente un point haut qu'on l'appelle « optimum proctor ».

La photo II.7 montre le mode opératoire de l'essai.



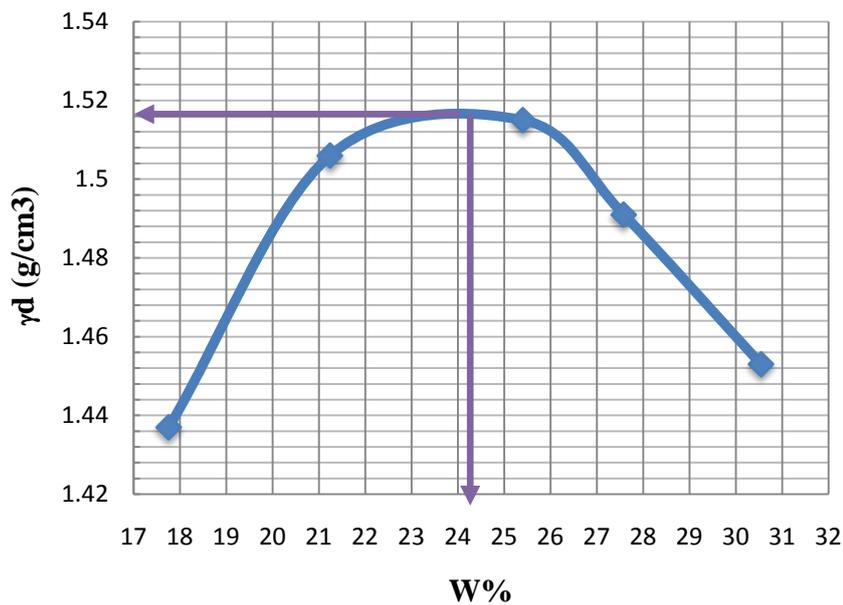
Photo II.7 : Photos présentant le mode opératoire de l'essai proctor

Les résultats de l'essai sont présentés dans le tableau suivant II.11 et la figure II.10.

Tableau II.11 : Les résultats de l'essai proctor normal

Pourcentage d'eau (%)	W (%)	γ_d (KN/m ³)
18	17,75	14,37
20	21,24	15,06
22	25,40	15,15
26	27,57	14,91
28	30,55	14,53

$$\gamma_d = f(w)$$

Figure II.11 : Essai de densification (compactage : W_{opt} , γ_{dopt}) de l'argile

Les paramètres de l'essai proctor :

A partir de la courbe on peut avoir les paramètres fondamentaux de cette essai (paramètres de proctor), qui sont la teneur en eau optimale et le poids volumique sec maximum. Les résultats sont regroupés dans le tableau II .12.

Tableau II.12 : Les paramètres de l'optimum Proctor

Argile	$\gamma_{\text{dopt}} \text{ (g / cm }^3 \text{)}$	$\gamma_{\text{dopt}} \text{ (KN/m }^3 \text{)}$	Wopt (%)
Argile d'Adrar	1,52	15,2	24

II.3.2 Amélioration, stabilisation et renforcement des sols :

Les sols fins (sol argileux) ce sont des sols qu'il absorber l'eau et variée sont volume, l'absorption de l'eau qu'il influence sur les structures et les caractéristiques des argiles elle résulte de phénomène de gonflement, de retrait ...etc. pour cela on fait améliorée, stabilisée et renforcée ces sols.

II.4 Conclusion :

Ce chapitre est une initiation d'une recherche menée sur la caractérisation des gisements de la région d'Adrar en vue de leurs utilisations en génie civil. Les propriétés physiques du gisement d'argile montrent qu'on est en présence d'un matériau très plastique et très gonflant. La valorisation de ces matériaux locaux est devenue une nécessité au point de vue économique avec une rentabilité intéressante. De ce fait, un travail expérimental doit être mené dans le but d'améliorer les caractéristiques physiques et mécaniques de ces matériaux. Le chapitre suivant va permettre de mener une réflexion sur la valorisation de ce gisement par ajout d'un nouveau matériau qui se trouve lui aussi en abondance.

Chapitre III
Amélioration et stabilisation
des paramètres physiques et
mécaniques de l'argile rouge
d'Adrar

III.1. Introduction :

Dans le but d'une utilisation de l'argile rouge d'Adrar dans des projets de construction, il y'a lieu d'étudier la variation des paramètres physiques et mécaniques de l'argile en fonction d'un ajout à différents pourcentages. Plusieurs travaux ont été effectués sur l'utilisation du sable comme stabilisant. Ces travaux de recherche montrent que le sable a un rôle positif sur la réduction des paramètres du gonflement.

Dans ce chapitre, on adopte une formulation d'un mélange entre l'argile et le sable pour améliorer les caractéristiques physiques, mécaniques et stabiliser surtout le gonflement de l'argile.

III.2. La stabilisation des sols gonflants :

La stabilisation d'un sol gonflant a pour but de maîtriser et réduire le taux gonflement du matériau et le rendre le moins sensible à l'absorption de l'eau.

La stabilisation du sol a pour but de :

- réduire le volume des vides entre les particules solides et augmenter la compacité ;
- améliorer la résistance mécanique et diminuer la sensibilité à l'eau.

III.3. Les techniques de stabilisation :

III.3.1. La stabilisation mécanique :

Compactage :

Le compactage du sol est une étape très importante de la stabilisation pour réduire la porosité du sol à partir des caractéristiques optimales (γ_{dopm} et W_{opt}) de compactage, qui sont déterminées par l'essai Proctor normal.

Stabilisation par ajout des liants :

BENGERAA, 2004 in [1] a constaté que le sable de carrière est un bon réducteur des limites de consistance et par conséquent du potentiel de gonflement. Plus le sable ajouté est grossier, plus la réduction du gonflement est importante.

SATYANARAYANA, 1969 in ALLAM, 2011 in [1] ; a constaté que la pression du gonflement est réduite par le simple ajout de faibles pourcentages de sable. Plus le pourcentage de sable augmente, plus les paramètres de gonflement sont réduits.

III.4. Etude expérimentale de la stabilisation de l'argile rouge :

On a utilisé le sable des dunes de Bouda qui a une couleur jaune et qui se trouve en abondance, comme ajout stabilisant à différents pourcentages. Le gisement du sable se trouve à 20 Km à l'Ouest de la ville d'Adrar (Route Nationale 6), voir figure III.1.



Figure III.1 : Le gisement du sable des dunes d'Adrar (Bouda)

[Date des images satellite : 15/10/2013]

L'analyse granulométrique du sable utilisé est représentée dans le tableau III.1.

Tableau III.1 : Analyse granulométrique du sable des dunes.

Sable 0/3		Poids de l'échantillon : 1000 g	
Ouvertures du tamis (mm)	Refus cumulés (g)	Refus cumulés(%)	Tamisât (%)
2	0	0	100
1.6	0	0	100
1.25	3.5	0.07	99.65
0.500	699.2	2.03	30.08
0.315	877	5.38	12.3
0.200	918.8	20.01	8.12
0.160	937.6	49.39	6.24
0.080	994.9	97.8	0.51
0.063	997	98.87	0.3
Fond	997.8	99.71	0.22

Les résultats de l'analyse granulométrique du sable des dunes sont présentés sur la figure III.2 ci-dessous.

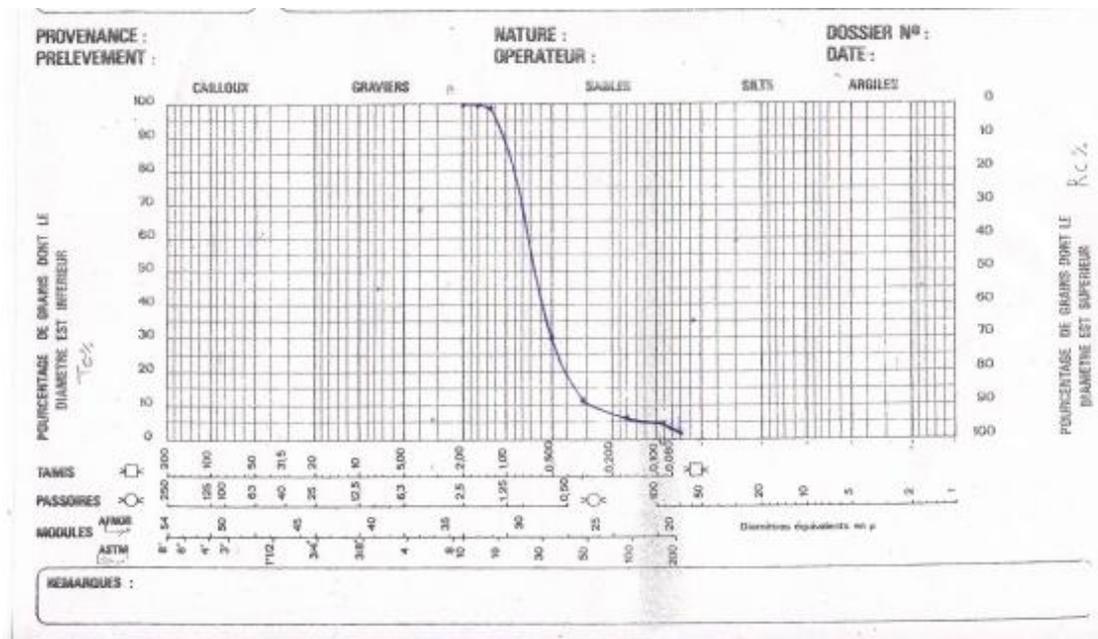


Figure III.2 : Courbe granulométrique du sable des dunes

III.5. Etude de formulation des mélanges du matériau argileux avec le sable :

Les pourcentages de sable utilisés sont respectivement : [3 ; 6 et 9%].

Les mélanges argile + sable ont été soumis au programme des essais suivants :

III.5.1. Les limites d'Atterberg :

Les mesures des limites d'Atterberg de la limite de liquidité, la limite de plasticité et l'indice de plasticité ont donné les résultats suivants (voir tableaux III.2, III.3 et III.4).

Tableau III .2 : Les résultats de la limite de liquidité des différents mélanges

3% S + 97 % A		6% S + 94 % A		9% S + 91 % A	
N de coups	W%	N de coups	W%	N de coups	W%
26	73.78	34	63.45	35	58.65
20	75.75	20	66.02	26	59.25
11	79.24	16	70.24	19	67.59

S : Sable et A : Argile

Tableau III.3 : Les résultats de l'essai de la limite de plasticité des différents mélanges

Mélange	Limite de plasticité%
3% S + 97% A	41.26
6% S + 94% A	52.41
9% sable + 91% A	48.85

Tableau III .4 : Résultats des limites d'Atterberg de l'argile
et des différents mélanges

	A	A + 3% S	A + 6% S	A + 9% S
W_L %	77.8	76.25	66.57	61.83
WP %	36.44	41.26	52.41	48.85
I_p %	41.36	34.99	14.16	12.98

Remarque : On peut conclure que le mélange (A + 3% S) est plastique est les mélanges (A + 6% S, A + 9% S) sont moyennement plastique.
Les résultats des tableaux des limites d'Atterberg précédents sont traduits respectivement par les courbes des figures III.3, III.4 et III.5.

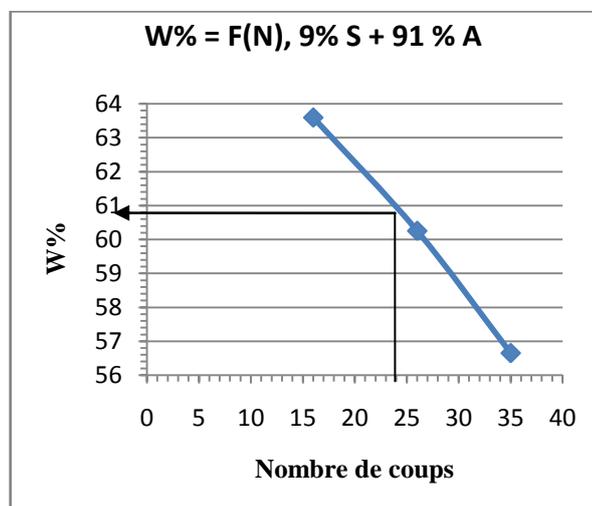
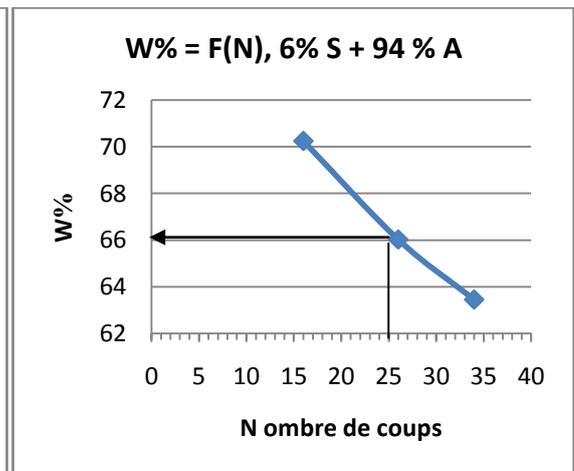
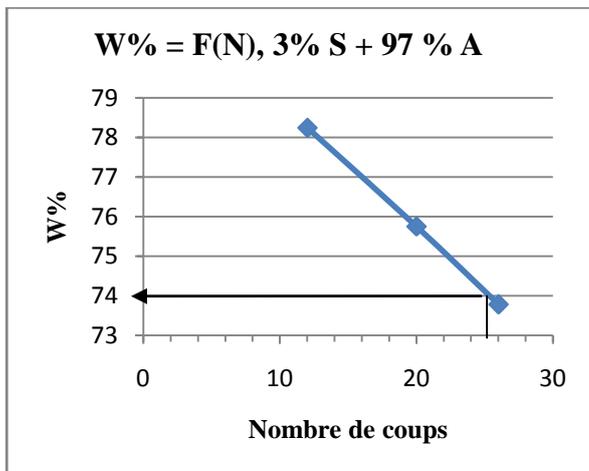
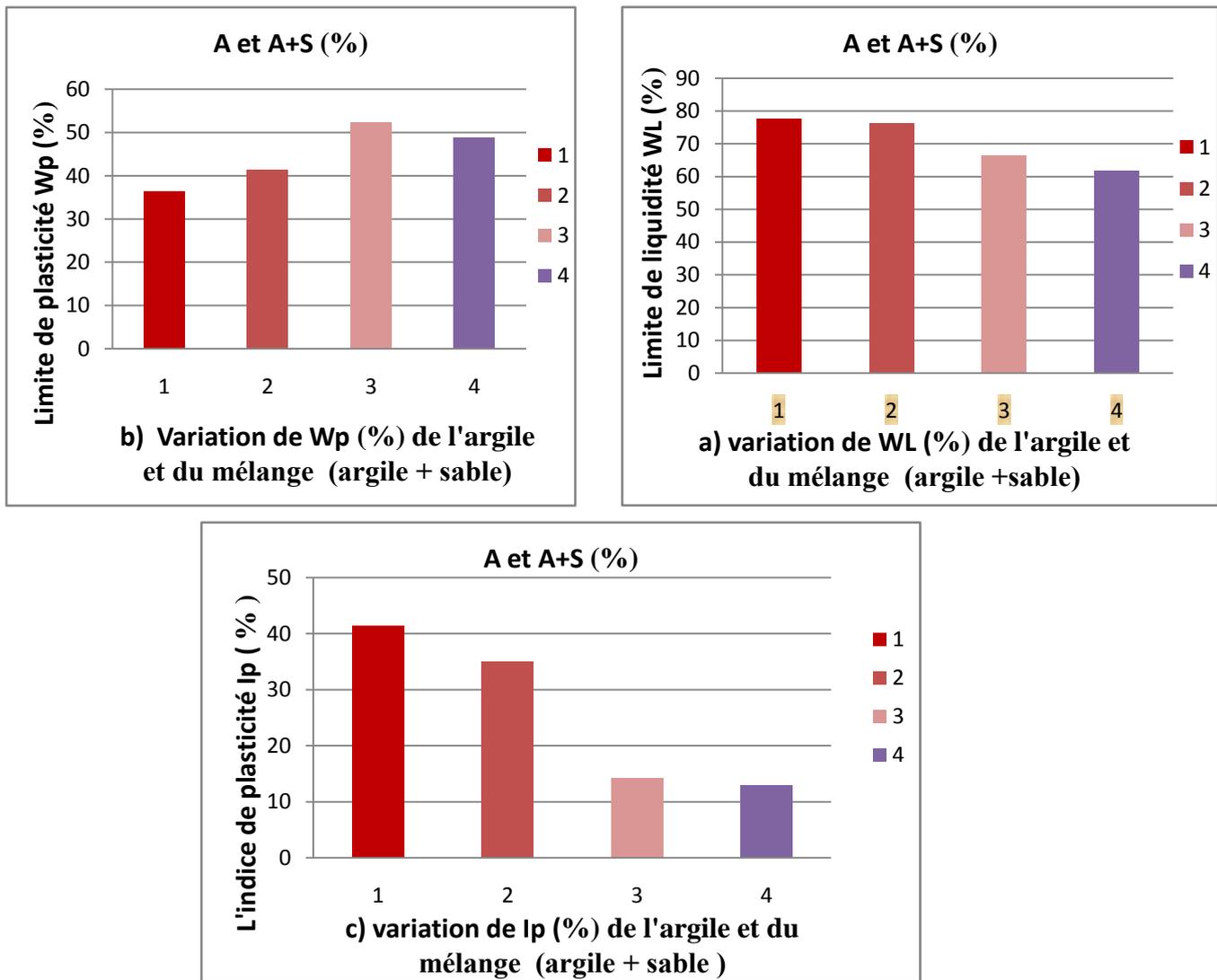


Figure III.3 : L'effet du sable sur la limite de liquidité

On montre sur les figures III.4 et III.5, l'effet du sable sur les limites d'Attreberg.



(1) A

(3) 94% A + 6% S

(2) 97% A + 3 % S

(4) 91% A + 9% S

Figure III. 4: Effet du sable sur les limites d'Atterberg de l'argile d'Adrar

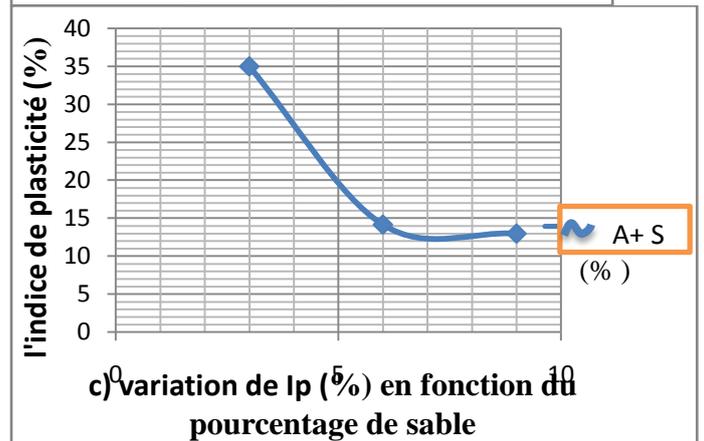
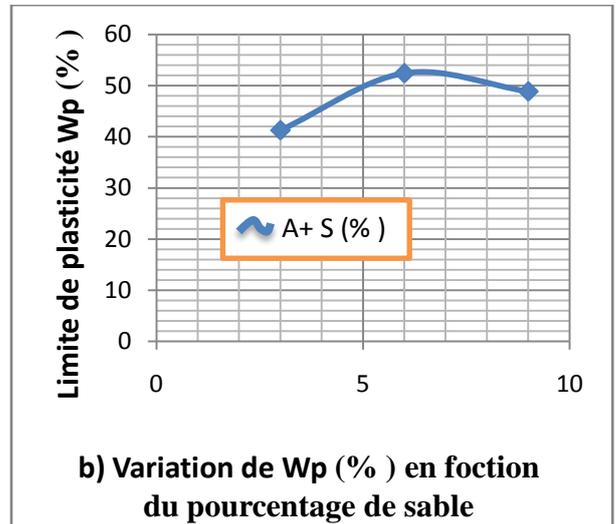
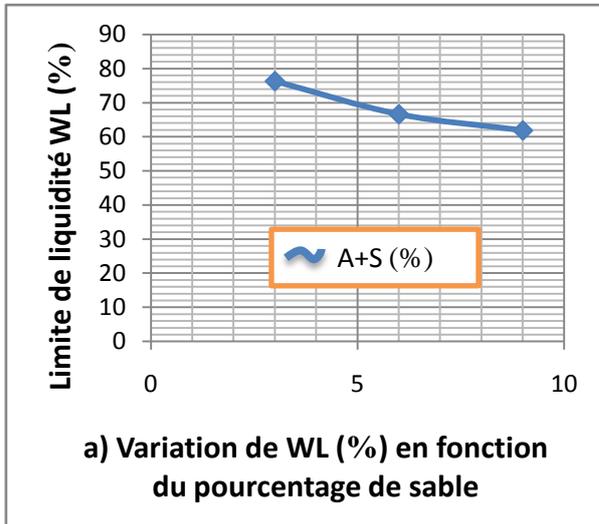


Figure III.5 : Effet du sable sur les limites d'Atterberg de l'argile d'Adrar

Commentaire :

Les courbes en histogramme de la figure III.3, montrent clairement que la limite de liquidité a tendance à diminuer avec l'augmentation du pourcentage de sable, par contre la limite de plasticité à tendance à augmenter ; mais l'indice de plasticité diminue. On remarque que les limites d'Atterberg sont presque les mêmes entre 6 et 9 % de sable.

III.5.2. Essai d'identification de compactage :

Les résultats obtenus pour l'essai de compactage Proctor sont reportés dans le tableau III.5 où on a conservé les mêmes ménages d'argile et de sable.

Tableau III .5 : Résultats des paramètres de l'essai Proctor Normal
 γ_d et W% des différents mélanges

Pourcentage de sable %	Pourcentage d'eau %	Teneur en eau W %	γ_d (g/cm ³)
3%	20%	23,625	1,499
	22%	25,218	1,539
	26%	27,613	1,561
	28%	28,756	1,506

Pourcentage de sable %	Pourcentage d'eau %	Teneur en eau W %	γ_d (g/cm ³)
6 %	18%	18,938	1,448
	20%	20,532	1,535
	22%	23,227	1,552
	26%	25,031	1,538
	28%	27,425	1,519

Pourcentage de sable %	Pourcentage d'eau %	Teneur en eau W %	γ_d (g/cm ³)
9%	18%	19,005	1,548
	20%	21,389	1,571
	22%	22,993	1,555
	26%	25,023	1,538

Les figures III.6 présentent les variations de γ_d en fonction de W des différents mélanges.

3% de sable + 97 % d'argile

6% de sable + 94 % d'argile

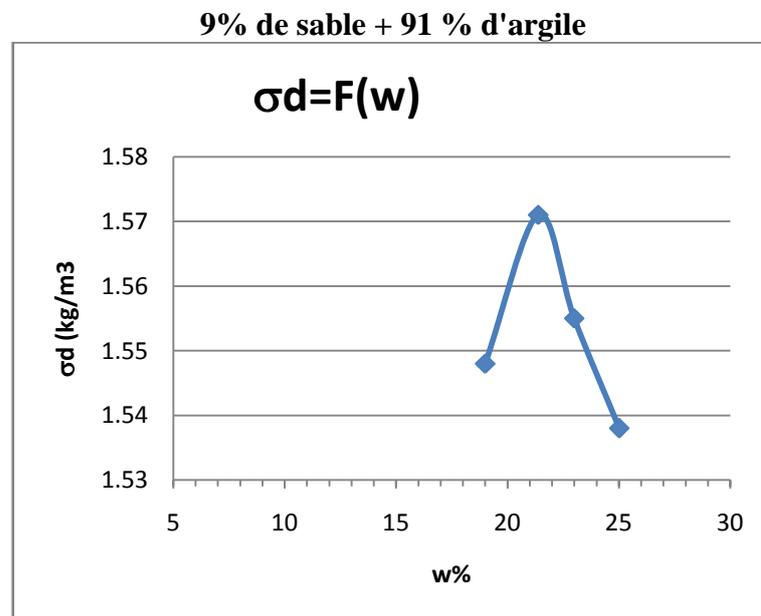
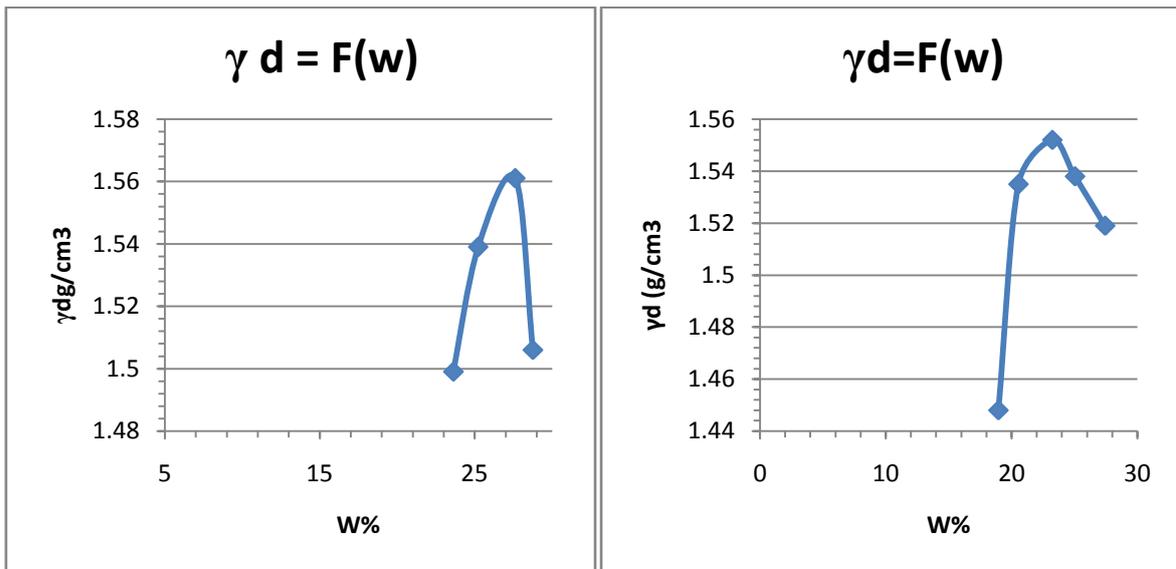


Figure III .6 : Les courbes de compactage Proctor normal des différents mélanges

Nous montrons sur la figure III.7 les histogrammes des valeurs de l'optimum Proctor à savoir, γ_{dopt} et W_{opt} . Nous remarquons que le mélange argile + 3 % de sable est remarquable, car on obtient la valeur maximale de $\gamma_{dopt} = 1,564 \text{ g/cm}^3$ et $W_{opt} = 27 \%$.

Par contre le mélange argile + 9 % de sable est aussi remarquable avec des valeurs de $\gamma_{dopt} = 1,556 \text{ g/cm}^3$ et $W_{opt} = 26 \%$.

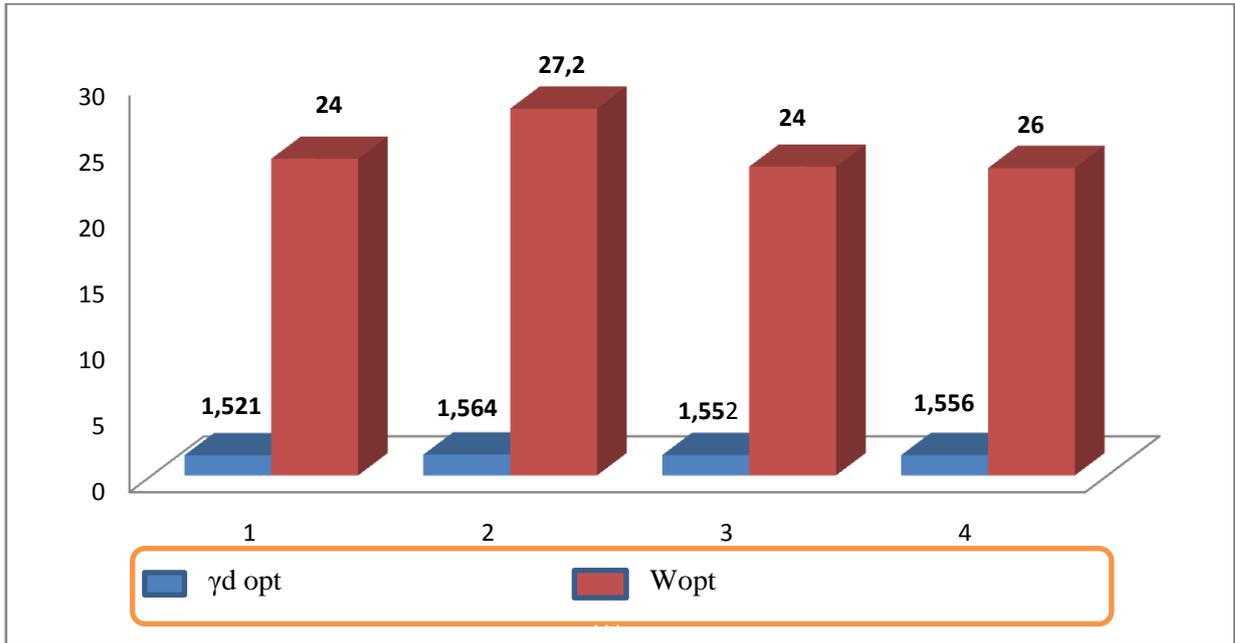


Figure III.7 : Résultats de l'optimum Proctor

III.5.3. Stabilisation du gonflement de l'argile :

On a réalisé des essais oedométriques de gonflement libre avec l'argile seule et l'argile avec les mêmes pourcentages de sable.

III.5.3.1. Mesure du gonflement libre :

Durant l'essai de gonflement libre, l'échantillon est soumis à une faible pression correspondant au poids du piston et de la pierre poreuse et il est laissé en contact avec de l'eau à pression atmosphérique. Le potentiel ou (taux) de gonflement correspond à la variation relative du volume ou la variation de la hauteur (H_f/H_0 en%).

➤ Mode opératoire de l'essai :

On a pris les échantillons de l'essai de compactage dans de leurs optimum (γ_{dopt} et W_{opt}) de l'argile et des autres mélanges.

On a placé une quantité de cet échantillon dans la cellule œnométrique drainée des deux extrémités par des disques revêtus de papier-filtre et des pierres poreuses après on a placé l'éprouvette dans l'appareil œnométrique.

Le dispositif de répartition d'effort est mis en contact avec la cellule, en immersion et le système mesurage de la variation de hauteur (comparateur) est mis en place.

Une fois la stabilisation de la hauteur atteinte, on lit la valeur de stabilisation dans le comparateur et on calcule le gonflement.

Le gonflement libre G est défini d'après la formule suivante :

$$G\% = (H_f / H_0) * 100$$

avec : H_f : hauteur de l'échantillon après stabilisation du gonflement (la hauteur finale est mesurée au comparateur).

H_0 : hauteur initiale de l'échantillon ($H_0 = 20$ mm).

III.5.3.2. Influence du sable sur le potentiel de gonflement :

Les résultats des potentiels de gonflement de l'argile stabilisée par le sable sont présentés sur la figure III.8. Cette figure présente les différents pourcentages de réduction du potentiel de gonflement en fonction des pourcentages de sable. Cette réduction du potentiel de gonflement est donnée par la relation suivante [9]:

$$\frac{\Delta G}{G} = \frac{G_0\% - G_p\%}{G_0\%}$$

Avec : G_0 gonflement de l'argile sans ajout.

G_p gonflement de l'argile + ajout à un pourcentage

La photo III.1 montre l'appareillage des essais œdométriques de gonflement.



Photo III.1 : Appareillage de l'essai œdométrique de gonflement.

Tableau III.6 : Résultats de l'essai œdométrique de gonflement

Argile d'Adrar		
A + % S	G% (A + % S)	($\Delta G/G$) %
A	7.75	/
A + 3% S	7.15	7.74
A + 6% S	7.65	1.3
A + 9% S	6.75	12.9

Les résultats obtenus de l'essai sont présentés sur la courbe de la figure III.8.

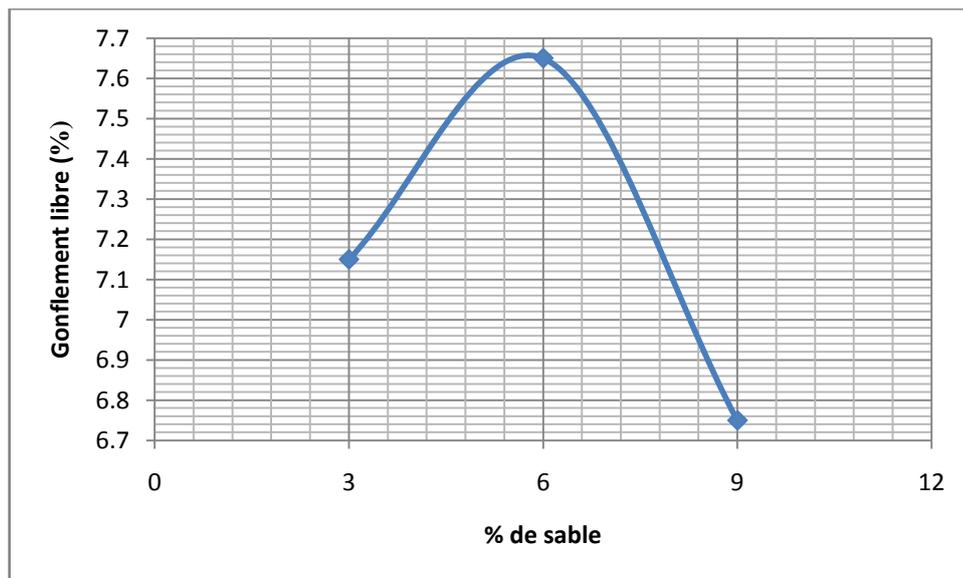


Figure III.8 : Courbe de l'essai œdométrique de gonflement

III.6. Conclusion :

Les méthodes de stabilisation et de renforcement de l'argile avec des pourcentages de sable des dunes de 3, 6 et 9 % ont donné de très bons résultats sur la plasticité et le poids volumique sec optimal.

Les résultats obtenus montrent qu'il y a une diminution de la plasticité et une augmentation remarquable poids volumique sec optimal. en fonction du pourcentage de sable à ajouter.

Les paramètres de gonflement libre ont aussi tendance à diminuer avec l'augmentation du pourcentage de sable mais il reste toujours à vérifier le gonflement libre et le potentiel de gonflement pour les ajouts de sable à 3 et 6 %. Les valeurs du gonflement libre et le potentiel de gonflement sont nettement influencés par un ajout de 9 % de sable.



Conclusion générale:

Nous avons pris connaissance que les sols argileux sont à craindre, puisque de par leur structure minéralogique, ils sont évolutifs et sont souvent à l'origine d'importants dégâts aux bâtis, notamment au cours des périodes de sècheresse prolongée. La maîtrise du phénomène de gonflement et la connaissance parfaite des éléments qui le font occasionner s'avère plus nécessaire afin de pouvoir minimiser les dégâts occasionnés par ce phénomène sur les différents ouvrages construits dans des formations argileuses.

Les propriétés physiques du gisement d'argile rouge étudié montrent qu'on est en présence d'un matériau très plastique et très gonflant. La valorisation de ces matériaux locaux est devenue une nécessité au point de vue économique avec une rentabilité intéressante.

Les résultats obtenus sur les sols prélevés ont permis de constater que la stabilisation par l'ajout de sable modifie considérablement les caractéristiques physiques, chimiques et mécaniques.

Les méthodes de stabilisation du gonflement par ajout de sable à des pourcentages de 3, 6 et 9%, ont montré qu'il y a une diminution de la plasticité, du gonflement et une augmentation remarquable du poids volumique sec optimum en fonction du pourcentage de sable à ajouter.

Comme perspectives des travaux de recherche, il serait intéressant d'étudier les méthodes de stabilisation du gonflement par ajout d'autres liants économiques à différents pourcentages.

Il reste maintenant à confirmer l'augmentation de la portance de l'argile traité et le poids volumique sec optimum du mélange argile-sable par d'autres essais, notamment l'essai de compression simple et de cisaillement. Ces derniers feront l'objet des travaux futurs.

CONDITIONS D'UTILISATION DES MATERIAUX EN COUCHE DE FORME

A₁, A₂

Classe de sol	Observations générales	Situation météorologique	Conditions d'utilisation en couche de forme	Code GWTS	Epaisseur préconisée de la couche de forme e (en m.) et classe PF de la plate-forme support de chaussée					
					PST n° 1	PST n° 2	PST n° 3		PST n° 4	
					AR 1	AR 1	AR 1	AR 2	AR 2	
A _{1h}	La grande sensibilité à l'eau des sols de cette classe implique de les traiter avec des liants hydrauliques associés éventuellement à de la chaux La maîtrise de l'état hydrique de ces sols traités est souvent délicate en raison de la variation brutale de leur comportement (portance) pour de faibles écarts de teneur en eau Ces sols se traitent généralement en place	+	pluie faible	Situation météorologique ne garantissant pas une maîtrise suffisante de l'état hydrique du mélange sol + liant(s)	NON	(1)				
		=	pas de pluie	T : Traitement avec un liant hydraulique éventuellement associé à la chaux	0 0 2 2					
-		S : Application d'un enduit de cure gravillonné éventuellement clouté								
A _{1m}		+	pluie faible	Situation météorologique ne garantissant pas une maîtrise suffisante de l'état hydrique du mélange sol + liant(s)	NON					
		=	pas de pluie	W : Arrosage pour maintien de l'état hydrique	0 1 2 2					
-		T : Traitement avec un liant hydraulique éventuellement associé à la chaux								
A _{1s}	+	pluie faible	Situation météorologique ne garantissant pas une maîtrise suffisante de l'état hydrique du mélange sol + liant(s)	NON	e=0,35	e=0,35	e=0,35	e=0,35		
	=	pas de pluie	W : Humidification pour changer l'état hydrique	0 2 1 2						
-	T : Traitement avec un liant hydraulique									
A _{2h}	+	pluie faible	Situation météorologique ne garantissant pas une maîtrise suffisante de l'état hydrique du mélange sol + liant(s)	NON	(1)					
	=	ni pluie ni évaporation	T : Traitement mixte : chaux + liant hydraulique	0 0 3 2						
	-	évaporation importante	S : Application d'un enduit de cure gravillonné éventuellement clouté	0 0 2 2						
A _{2m}	+	pluie faible	Situation météorologique ne garantissant pas une maîtrise suffisante de l'état hydrique du mélange sol + liant(s)	NON	(1)					
	=	pas de pluie	W : Arrosage pour maintien de l'état hydrique	0 1 2 2						
-	T : Traitement avec un liant hydraulique éventuellement associé à la chaux									
A _{2s}	+	pluie faible	Situation météorologique ne garantissant pas une maîtrise suffisante de l'état hydrique du mélange sol + liant(s)	NON	(1)					
	=	pas de pluie	W : Humidification pour changer l'état hydrique	0 2 2 2						
-	T : Traitement avec un liant hydraulique éventuellement associé à la chaux									
-	S : Application d'un enduit de cure gravillonné éventuellement clouté									

(1) Sur cette PST, la mise en oeuvre d'un matériau traité répondant à une qualité "couche de forme" n'est pas réalisable. Procéder d'abord à un traitement selon une technique "remblai" et se rapporter alors au cas de PST n°4 si l'effet de traitement est durable et aux cas PST n°2 ou 3 s'il ne l'est pas.

CONDITIONS D'UTILISATION DES MATERIAUX EN REMBLAI

A₃, A₄

Sol	Observations générales	Situation météorologique	Conditions d'utilisation en remblai	Code								
				E	G	W	T	R	C	H		
A₃h	Soils normalement inutilisables en l'état			NON								
A₃h	<p>Sols difficiles à mettre en œuvre en raison :</p> <ul style="list-style-type: none"> - de leur caractère collant ou glissant dû à leur grande plasticité et à leur faible perméabilité - de leur portance faible <p>La mise en dépôt provisoire n'est pas une solution dans le climat français moyen</p> <p>Le drainage préalable ne permet pas de réduire utilement la teneur en eau W</p>	++	pluie forte	Situation ne permettant pas la mise en remblai avec des garanties de qualité suffisantes	NON							
		+	pluie faible	C : compactage faible H : remblai de hauteur faible (≤ 5 m)	0	0	0	0	0	3	1	
		=	ni pluie, ni évaporation importante	Solution 1 : traitement T : traitement à la chaux C : compactage moyen	0	0	0	2	0	2	0	
				Solution 2 : utilisation en l'état C : compactage faible H : remblai de hauteur faible (≤ 5 m)	0	0	0	0	0	3	1	
		-	évaporation importante	Solution 1 : traitement T : traitement à la chaux C : compactage moyen	0	0	0	2	0	2	0	
		Solution 2 : aération E : extraction en couches W : réduction de la teneur en eau par aération R : couches minces C : compactage moyen H : remblai de hauteur moyenne (≤ 10 m)	1	0	1	0	1	2	2			
A₃m	<p>La plasticité de ces sols entraîne pour les remblais des risques de glissement d'autant plus grands que les remblais sont élevés, même dans les meilleures conditions (w, météo) de mise en œuvre</p>	++	pluie forte	Situation ne permettant pas la mise en remblai avec des garanties de qualité suffisantes	NON							
		+	pluie faible	C : compactage moyen H : remblai de hauteur moyenne (≤ 10 m)	0	0	0	0	0	2	2	
		=	ni pluie, ni évaporation importante	C : compactage moyen H : remblai de hauteur moyenne (≤ 10 m)	0	0	0	0	0	2	2	
		-	évaporation importante	Solution 1 : arrosage superficiel W : arrosage superficiel pour maintien de l'état R : couches minces C : compactage moyen H : remblai de hauteur moyenne (≤ 10 m)	0	0	3	0	1	2	2	
				Solution 2 : utilisation en l'état C : compactage intense H : remblai de hauteur faible (≤ 5 m)	0	0	0	0	0	1	1	
A₃s	<p>Comme ci-dessus la plasticité de ces sols, entraîne pour les remblais des risques de glissement d'autant plus grands que les remblais sont élevés. La forte cohésion de ces sols exige un fractionnement et un compactage énergétique en couches minces. La portance élevée ne doit pas faire illusion vis-à-vis des tassements ultérieurs possibles. Le changement d'état pour humidification dans la masse ne constitue pas une modalité réaliste</p>	++	pluie forte	Situation ne permettant pas la mise en remblai avec des garanties de qualité suffisantes	NON							
		+	pluie faible	E : extraction en couches R : couches minces C : compactage intense H : remblai de hauteur faible (≤ 5 m)	1	0	0	0	1	1	1	
		=	ni pluie, ni évaporation importante	W : arrosage superficiel pour maintien de l'état R : couches minces C : compactage intense H : remblai de hauteur faible (≤ 5 m)	0	0	3	0	1	1	1	
		-	évaporation importante	E : extraction frontale W : arrosage superficiel pour maintien de l'état R : couches minces C : compactage intense H : remblai de hauteur faible (≤ 5 m)	2	0	3	0	1	1	1	
A₃ts	Soils normalement inutilisables en l'état			NON								
A₄	Sols à la fois très difficiles à travailler et dont l'utilisation comporterait de grands risques de retrait gonflement et de stabilité	L'emploi de ces sols en remblai ne peut être envisagé qu'à l'appui d'une étude spécifique ayant défini les conditions d'état et de compactage à leur appliquer		NON								

CONDITIONS D'UTILISATION DES MATERIAUX EN COUCHE DE FORME

3, A₄

Sse le ol	Observations générales	Situation météo- rologique	Conditions d'utilisation en couche de forme	Code GWTS	Epaisseur préconisée de la couche de forme e (en m.) et classe PF de la plate- forme support de chaussée					
					PST n° 1	PST n° 2	PST n° 3		PST n° 4	
					AR 1	AR 1	AR 1	AR 2	AR 2	
h	La sensibilité à l'eau et la plasticité élevée des sols de cette classe implique un traitement associant chaux et liant hydraulique pour pouvoir les utiliser en couche de forme. Pour les plus plastiques d'entre eux un traitement à la chaux seule peut être envisagé notamment s'il n'y a pas de risques d'apparition de gel peu après la réalisation. Ces sols se traitent exclusivement en place. Lorsqu'ils sont dans un état humide, la chaux est très efficace pour faciliter leur malaxage et ajuster leur état hydrique. Lorsqu'ils sont dans un état sec leur emploi en couche de forme est à déconseiller en raison de la difficulté qu'il y a à les humidifier de manière homogène.	+	pluie faible	Situation météorologique ne garantissant pas une maîtrise suffisante de l'état hydrique du mélange sol + liant(s) Solution 1 : T : Traitement mixte : chaux + liant hydraulique S : Application d'un enduit de cure gravillonné éventuellement clouté	NON	(1)				
		= OU -	pas de pluie	Solution 2 : T : Traitement à la chaux seule S : Application d'un enduit de cure gravillonné éventuellement clouté	0 0 3 2 0 0 4 2		e = 0,35 PF2	e = 0,35 PF2	e = 0,35 PF3	e = 0,35 PF3
m	Lorsqu'ils sont dans un état humide, la chaux est très efficace pour faciliter leur malaxage et ajuster leur état hydrique. Lorsqu'ils sont dans un état sec leur emploi en couche de forme est à déconseiller en raison de la difficulté qu'il y a à les humidifier de manière homogène.	++	pluie forte	Situation météorologique ne garantissant pas une maîtrise suffisante de l'état hydrique du mélange sol + liant(s) Solution 1 : W : Arrosage pour maintien de l'état hydrique T : Traitement mixte : chaux + liant hydraulique	NON	(1)				
		+	faible pluie ou faible évapo- ration	S : Application d'un enduit de cure gravillonné éventuellement clouté Solution 2 : W : Arrosage pour maintien de l'état hydrique T : Traitement à la chaux seule S : Application d'un enduit de cure gravillonné éventuellement clouté	0 1 3 2 0 1 4 2		e = 0,35 PF2	e = 0,35 PF2	e = 0,35 PF3	e = 0,35 PF3
		=					(2) e = 0,5 PF2	(2) e = 0,5 PF2	(3)	(3)
s		-	évapo- ration importante	Situation météorologique ne garantissant pas une maîtrise suffisante de l'état hydrique du mélange sol + liant(s)	NON					
Sols normalement inutilisables en couche de forme										
Sols normalement inutilisables en couche de forme										

Sur cette PST, la mise en œuvre d'un matériau traité répondant à une qualité "couche de forme" n'est pas réalisable. Procéder d'abord à un traitement en une technique "remblai" et se reporter alors au cas de PST n°4 si l'effet du traitement est durable et aux cas de PST n°2 ou 3 s'il ne l'est pas. Mise en œuvre en 2 couches. Solution de couche de forme peu appropriée sauf à vouloir rechercher un surclassement en PF3 ou PF4, auquel cas on appliquera les règles de classement définies au § 3.4.2 du fascicule 1 "Principes généraux".

SOLS FINS

Classe A

Classement selon la nature					Classement selon l'état hydrique			
Paramètres de nature Premier niveau de classification	Classe	Paramètres de nature Deuxième niveau de classification	Sous classe fonction de la nature	Caractères principaux	Paramètres et valeurs de seuils retenus	Sous-classe		
D _{max} ≤ 50mm et tamisat à 80µm > 35 %	A sols fins	VBS ≤ 2,5 ou I _p ≤ 12	A ₁	Ces sols changent brutalement de consistance pour de faibles variations de teneur en eau, en particulier lorsque leur w _n est proche de w _{OPH} . Le temps de réaction aux variations de l'environnement hydrique et climatique est relativement court, mais la perméabilité pouvant varier dans de larges limites selon la granulométrie, la plasticité et la compacité, le temps de réaction peut tout de même varier assez largement. Dans le cas de ces sols fins peu plastiques, il est souvent préférable de les identifier par la valeur de bleu de méthylène VBS, compte tenu de l'imprécision attachée à la mesure de l'Ip.	$IPI \leq 3$ ou $w_n \geq 1,25 w_{OPH}$ $3 < IPI \leq 8$ ou $1,10 w_{OPH} \leq w_n < 1,25 w_{OPH}$ $8 < IPI \leq 25$ ou $0,9 w_{OPH} \leq w_n < 1,10 w_{OPH}$ $0,7 w_{OPH} \leq w_n < 0,9 w_{OPH}$ $w_n < 0,7 w_{OPH}$	A ₁ h A ₁ h A ₁ m A ₁ s A ₁ ts		
			12 < I _p ≤ 25 ou 2,5 < VBS ≤ 6	A ₂	Le caractère moyen des sols de cette sous-classe fait qu'ils se prêtent à l'emploi de la plus large gamme d'outils de terrassement (s'il la teneur en eau n'est pas trop élevée). Dès que l'Ip atteint des valeurs ≥ 12, il constitue le critère d'identification le mieux adapté.	$IPI \leq 2$ ou $lc \leq 0,9$ ou $w_n \geq 1,3 w_{OPH}$ $2 < IPI \leq 5$ ou $0,9 < lc \leq 1,05$ ou $1,1 w_{OPH} \leq w_n < 1,3 w_{OPH}$ $5 < IPI \leq 15$ ou $1,05 < lc \leq 1,2$ ou $0,9 w_{OPH} \leq w_n < 1,1 w_{OPH}$ $1,2 < lc \leq 1,4$ ou $0,7 w_{OPH} \leq w_n < 0,9 w_{OPH}$ $lc > 1,4$ ou $w_n < 0,7 w_{OPH}$	A ₂ h A ₂ h A ₂ m A ₂ s A ₂ ts	
				25 < I _p ≤ 40 ou 6 < VBS ≤ 8	A ₃	Ces sols sont très cohérents à teneur en eau moyenne et faible, et collants ou glissants à l'état humide, d'où difficulté de mise en œuvre sur chantier (et de manipulation en laboratoire). Leur perméabilité très réduite rend leurs variations de teneur en eau très lentes, en place. Une augmentation de teneur en eau assez importante est nécessaire pour changer notablement leur consistance.	$IPI \leq 10$ ou $lc \leq 0,8$ ou $w_n \geq 1,4 w_{OPH}$ $1 < IPI \leq 3$ ou $0,8 < lc \leq 1$ ou $1,2 w_{OPH} \leq w_n < 1,4 w_{OPH}$ $3 < IPI \leq 10$ ou $1 < lc \leq 1,15$ ou $0,9 w_{OPH} \leq w_n < 1,2 w_{OPH}$ $1,15 < lc \leq 1,3$ ou $0,7 w_{OPH} \leq w_n < 0,9 w_{OPH}$ $lc > 1,3$ ou $w_n < 0,7 w_{OPH}$	A ₃ h A ₃ h A ₃ m A ₃ s A ₃ ts
					A ₄	Ces sols sont très cohérents et presque imperméables : s'ils changent de teneur en eau, c'est extrêmement lentement et avec d'importants retraits ou gonflements. Leur emploi en remblai ou en couche de forme n'est normalement pas envisagé mais il peut éventuellement être décidé à l'appui d'une étude spécifique s'appuyant notamment sur des essais en vraie grandeur.	Valeurs seuils des paramètres d'état, à définir à l'appui d'une étude spécifique.	A ₄ h A ₄ h A ₄ m

Les paramètres inscrits en caractères gras sont ceux dont le choix est à privilégier.

Références Bibliographiques

- [1] Belabbaci Z, 2014.STABILISATION DES SOLS GONFLANTS, THESE DE DOCTORAT LMD Université Abou Bekr Belkaid – Tlemcen.
- [2] Benhamou Y 2015. REHABILITATION DES OUVRAGES DE FONDATION VIS-A-VIS DES ARGILES GONFLANTES DE SAIDA, ETUDE D'UN CAS REEL. MAGISTER EN GENIE CIVIL, ENPD'ORAN, 96 pages.
- [3] Bourabah M.A, 2012. Comportement mécanique des sols, application à la valorisation des sédiments de barrages en technique routière. Thèse de Doctorat Es Sciences, Université Abou-BekrBelkaïd, 301 pages.
- [4] - Costet J et Sanglérat et Sanglerat G (1983). Cours pratique de mécanique des sols, Tome 1, Edition Dunod.
- [5] Cour de géotechnique (Mr Mekerta)
- [6] HarratM, 2007.Contribution à l'amélioration du procédé defabrication de la céramiqueEtude sur site : unité Maghreb céramique deTouggourt. Mémoire de Magister, Université KasdiMerbahOuargla.
- [7] Ihadjadene V, 2012.L'argile a l'hôpital : Utilisation de l'argile dans un service de soinsHospitalier.Formation HippocratusPhyto-aromathérapie.
- [8] Mouaziz S, 2012.Préparation et Caractérisation des bentonitesmodifiées par des sels de Bis-imidazolium –Application à l'adsorption du bleu Telon.Abou BekrBelkaid-Tlemcen, 11 page.
- [9] Moulay Omar H , 2008.Etude de la stabilisation des sols gonflants par liants hydraulique, Application aux sol de la région d'Oran.
- [10] Smaida A,2007.Stabilisation des argile gonflantes, Effet de l'association chaux+ciment sur es propriété physico-mécaniques.Mémoire de magister.Ecole Normale Supérieur de l'Enseignement Technique d'Oran.

Références Bibliographiques

[11] TizaouiKh, 2013.Elimination des métaux lourds en solution aqueuse par des argiles algériennes.Mémoire de Magister, Université AbouBekrBelkaid – Tlemcen.

[12] <http://pubs.usgs.gov/of/2001>.