

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

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



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

Master En Génie Civil

Option : Géotechnique

Présenté Par :

Mansouri Fatima Zohra
Fatimetu MohamedLamin

THEME

**Amélioration, Stabilisation et renforcement
d'argile d'Adrar**

Soutenu Le 20/06/2018 Devant un membre de jury composé de :

P_r Mekerta Belkacem	Univ. Adrar	Président
M_r Moulay Omar Hassan	Univ. Adrar	Examineur
M^{me} Belaidi Khedidja	Univ. Adrar	Encadreur

Année Universitaire 2017-2018

Remerciements

Dans le cadre de la réalisation de cette étude, remercions avant tous DIEU tous puissant, de nous avoir accordé la santé, guidé vers le bon chemin et de nous avoir permis d'accomplir la présente recherche.

Ce travail de recherche n'aurait pas été possible sans le soutien et la participation de plusieurs personnes auxquelles nous souhaite également exprimer toute notre gratitude .

Nos premiers remerciements vont à notre encadreur de cette mémoire, Madame Belaidi Khadidja d'avoir bien voulu prendre sur leur temps précieux la charge de diriger et de suivre cette étude.

Nous remercier aussi Professeur Mekerta Belkacem pour leur soutien et sa disponibilité ainsi que l'attention qu'il a porté à ce travail ont été un atout précieux dans l'avancement de cette étude. Pour nous avoir fait l'honneur d'être président du jury.

Nous exprimons nos sincères remerciements à M^r Moulay Omar .H qui a accepté de juger ce travail.

Nous exprimons aussi notre profonde gratitude à tous l'équipe de laboratoire en particulier ,M^r Houtia.A. pour leur soutien.

Nous tiens également à exprimer notre remerciement à M^r Bouafia B ,et M^r Abbou.M et M^r Akhdimi A.

Nous tenons à remercier tous les personnes qui nous ont aidés

A decorative border of pearls and roses surrounds the text. The border consists of a top row of large pearls, a middle row of smaller pearls, and a bottom row of large pearls. On the left side, there are several roses, including a large white one, a smaller white one, and a red one. On the right side, there is a large white rose with green leaves and water droplets.

Dédicace

*Je dédie ce modeste travail à
Mon cher père **Mohammed**, ma chère mère
Aïcha, mes parents qui ont toujours su
m'indiquer le sens du devoir et de travail,
pour votre soutien moral et matériel, ainsi
que à leurs encouragements.*

*Mes frères, Abd-Errahmane, Ramdane,
Moussa, Abd-Elmonime et ma petite sœur
Hibat-Errahmane*

*À tous mes amis chacun par son nom,
À toute ma famille qui porte le nom Mansouri
À mon binôme Fatimetu et sa famille
respectueuse.*

Atous les promos 2018

Fatima Zohra

إهداء

بدأنا بأكثر من يد وقاسينا أكثر من هم وعانينا الكثير من الصعوبات
وهانحن اليوم و الحمد لله نطوي سهر الليالي وتعب الأيام وخلاصة مشوارنا
بين اضافتنا هذا العمل المتواضع الي منارة العلم والمعرفة.
الي الينبوع الذي لا يمل العطاء الي من حاكت سعادتي بخيوط منسوجة
من قلبها التي لم تبخل بشي من اجل دفعي في طريق النجاح الي والدتي
العزيزة(دكوجة لمات)
الي من سعي وشقي لأنعم بالراحة والهناء الذي لم يبخل بشي من اجل
دفعي في طريق النجاح الذي علمني ان ارتقي سلم بحكمة وصبر والذي
العزيز(محمد لمين محمد الدات)
الي من حبهم يجري في عروقي ويلهج بذكراهم فؤادي الي أخواني أخواتي
اللواتي انرنا دربي (الزينة. مته . عزة. ساعيدة . امباركة. السالك . محمد
نافع).

الي من سرنا سويا ونحن نشق الطريق معا نحو النجاح والإبداع الي من
تكنا تفنا يدا بيد ونحن نقطف زهرة تعلمنا الي الأصدقاء و زملاء.
الي من علمونا حروفنا من ذهب وكلمات من درر و عبارات من اسمي
واجلي عبارات في العلم الي من صاغوا لنا علمهم حروفا ومن فكرهم منارة
تنير لنا سيرة العلم والنجاح الي اساتذتنا الكرام

فاطمتو



Sommaire

Introduction Générale	1
Chapitre I :	
I.1.Introduction	3
M'sila [Azzouz FZ 2015].	3
I.2.Définition des argiles	3
I.2.1. Minéraux argileux	4
I.2.1.1. Structure des argiles	4
I.2.1.2. Principaux groupes des minéraux argileux	4
I.3. Force entre les particules d'argile	7
I.3.1. Forces d'attractions	8
I.3.2. Forces de répulsion	8
I.4. Phénomènes de gonflement des argiles.....	8
I.4.1 Mécanisme de gonflement	8
I.4.2 Description du phénomène de gonflement.....	8
I.4.3 Facteurs affectant le gonflement	9
I.4.3.1 Facteurs intrinsèques	9
I.4.3.2 Facteurs externes	9
I.5. Stabilisation des sols gonflants	10
I.5.1 But de la stabilisation	10
I.5.2 Amélioration majeur et durable (stabilisation)[Note cour]	10
I.5.3 Différentes techniques de stabilisation.....	10
I.5.3.1. Stabilisation mécanique	11
a. Compactage	11
b. Drainage	11
c. Substitution	11
I.5.3.2. Traitement thermique	11
I.5.3.3. Stabilisation avec des additifs	11
a. Liants	11
a.1. Liants hydrauliques.....	11
a.2.Liants organiques.....	11
I.5.4. Stabilisation par l'ajout de la chaux.....	12
I.5.5. Stabilisation par l'ajout de sable.....	13
I.6.Conclusion.....	14
Chapitre II :	
II .1 Introduction.....	16

II.2 Les essais d'identification.....	16
II.2.1 Identification et classification d'argile	16
II.2.1.1 Le poids volumique des grains solides, Norme (NF P94-054).....	17
II.2.1.2 Limites d'Atterberg ou limites de consistance (NF P 94-051)	18
II.2.1.2.1 Limite de liquidité.....	19
II.2.1.2.2 La limite de plasticité W_P (NF P 94-051)	20
II.2.1.2.3 La limite de retrait W_R (NF P 94-051).....	22
II.2.1.3 Analyse granulométrique par tamisage.....	23
II.2.1.3.1 Analyse par tamisage Norme (NF P94-056) : (par voie humide).....	23
II.2.1.3.2 Analyse granulométrique par sédimentométrie (Norme NF P94-057).....	23
II.2.1.4 Essai au bleu de méthylène à la tache (NF P 94-068)	25
II.2.1.5 Analyse chimique	28
II.2.2 Identification et classification de Sable de dune.....	28
II.2.2.1 Analyse granulométrique par tamisage à sec (Norme NF P94-056)	29
II.2.2.2 Equivalent de sable (NF P 18-598).....	30
II.2.2.3 Essai au bleu de méthylène à la tache (NF P 94-068)	31
II.2.3 Identification de la Chaux.....	32
II.2.3.1 La Masse Volumique Apparente	32
II.2.3.2 La Masse Volumique Spécifique (absolue)	33
II.2.4 Analyse chimique de l'eau.....	34
II.2.5 Etude du phénomène de gonflement de notre argile.....	34
chapitre III	
II.3 Conclusion	37
III.1. Introduction	39
III.2. Définitions de la chaux.....	39
III.3. Différents types de chaux	39
III.4.1. Les Sables naturels	40
III.4.2. Les Sables artificiels.....	40
III.5 Caractérisation des mélanges (argile +chaux) et (argile +sable).....	40
III.5.1 Caractérisation de compactage sans et avec traitement, Norme (NF P 94-093)	41
III.5.2. Mode opératoire de l'essai.....	42
III.5.3. Techniques des mélanges :	44
III.6. Essai au bleu de méthylène à la tache (NF P 94-068) du mélange à la chaux	49
III.6.1 Calculs et résultats.....	49
III.7. Limites d'Atterberg du mélange à la chaux	51

Chapitre IV

IV .1 Introduction :	56
VI.2. Etude du phénomène de gonflement de l'argile :	56
IV 2.1. Définitions	56
IV2.2 Mesure du gonflement libre :	57
IV 2.2.1 Influence de la chaux sur le potentiel de gonflement :	57
IV 2.2.2 Influence du sable sur le potentiel de gonflement :	59
IV.2.6 Pression de gonflement : définie de plusieurs façons dont	61
IV.3.1 Essai de compressibilité oedométrique	62
IV.3.1.1. Le coefficient de gonflement C_g : (tableau IV.5) :	62
IV.3.1.2. L'indice de compressibilité C_c (tableau IV.5) :	62
IV .3.2 Coefficient de consolidation C_v :	64
IV. 3.3 Coefficient de perméabilité K :	65
IV.4. Conclusion	65

Chapitre V

V.1 Introduction	67
V.2 Etude de l'influence de la chaux sur les paramètres mécaniques de l'argile d'Adrar	67
V.2.1 L'indice de vides e_0	67
V.2.2 Module œdométriques (E')	68
V 2.3 L'indice de compression C_c	68
V 2.4 La compressibilité $C_c/(1 + e_0)$	69
V 2.5 Coefficient de gonflement C_g	70
V 2.6 Coefficient de consolidation C_v	70
V 2.7 Coefficient de perméabilité K	71
V.3 Conclusion	72
Conclusion générale	74
Bibliographie	76

Liste des figures

CHAPITRE I:

Figure I.1: Structure octaédrique et tétraédrique des couches d'argiles.....	4
Figure 1.2: Structure cristalline de la kaolinite	5
Figure 1.3: Structure cristalline de smectite	6
Figure 1.4: Les particules d'argile.....	6
Figure I.5 : Courbe du gonflement en fonction du temps (Chen, 1988)	9
Figure 1.6 : Classification des liants.....	12
Figure I.7 : Influence de la chaux sur les caractéristiques de compactage.....	12

CHAPITRE II:

Figure II.1: Localisation du site de gisement d'argile d'Adrar (Adrar nord).....	17
Figure II.2 : Courbe de la limite de liquidité WL d'argile Adrar	20
Figure II.3:Abaque de plasticité de Casagrande selon la classification L.C.P.C des sols fins..	22
Figure II.4 : Courbe granulométrique par sédimentométrie de l'argile.....	24
Figure II.5 : Schéma synoptique du processus opératoire de l'essai du bleu à la tâche.....	27
Figure II .6 : Le gisement du sable des dunes d'Adrar (Bouda).....	29
Figure II.7 : Courbe granulométrique de sable de dune de Bouda.....	30

CHAPITRE III

Figure III.1 : Organigramme de l'étude du traitement de l'argile d'Adrar avec la chaux et le sable	41
Figure III.2: Appareillage de l'essai proctor	42
Figure III.3: Courbe proctor modifié d'argile Adrar(sans traitement).....	44
Figure III.4 : Les courbes de proctor modifier pour tous les pourcentages (argile Adrar+ chaux)	45
Figure III.5: Les courbes de proctor modifier pour tous les pourcentages(argile Adrar+ sable)	46
Figure III.6: Les courbes de proctor modifier pour tous les pourcentages(argile Adrar+ la chaux)	47
Figure III.7: Les courbes de proctor modifier pour tous les pourcentages(argile Adrar+ sable)	47
Figure III.8:L'influence de % de chaux et % de sable sur la densité sèche	48
Figure III.9:L'influence de % de chaux et de % de sable sur la teneur en eau	49
Figure III.10:Influence de % de la chaux sur la limite de liquidité.....	52
Figure III.11 :Influence de % de chaux sur la limite de plasticité	52
Figure III.12 : Influencede % de chaux sur l'indice de plasticité.....	53

Figure III.13 : Abaque de plasticité de Casagrande selon la classification L.C.P.C des sols fins	53
--	----

CHAPITRE IV

Figure IV.1 : Evolution du potentiel de gonflement libre en fonction du temps pour les mélanges Argile Adrar+chaux.....	58
Figure IV.2: Evolution du potentiel de gonflement libre en fonction du temps pour les mélanges Argile Adrar+chaux.....	59
Figure IV.3: Evolution de gonflement libre en fonction des pourcentages de chaux	60
Figure IV.4 : Evolution du potentiel de gonflement libre en fonction du temps pour les mélanges de 4% chaux et de sable.....	60
Figure IV.5 : Evolution de la pression gonflement en fonction	61
Figure IV.6 : Courbe module œdométrique de notre argile	63
Figure IV.7: Courbe module œdométrique de notre argile	63
Figure IV.8: Courbes des tassements en fonction du temps.....	64

CHAPITRE V

Figure V.1 : Courbe de variation de l'indice des vides en fonction du pourcentage de chaux	67
Figure V.2 : La variation du module oedométrique en fonction du % de la chaux.....	68
Figure V.3 : La variation de l'indice des compression en fonction du % de la chaux	69
Figure V.4 : La variation de la compressibilité en fonction du % de la chaux	69
Figure V.5 : La variation de l'indice de gonflement en fonction du % de la chaux.....	70
Figure V.6 : La variation des coefficients de consolidation en fonction du % de la chaux des deux methods.....	71
Figure V.7 : La variation des coefficients de perméabilité en fonction du % de la chaux des deux méthodes	72

Liste des tableaux

CHAPITRE I

Tableau I.1: Caractéristiques des argiles	6
Tableau I.2 : La classification des principaux groupes de minéraux argileux	7
Tableau I.3: Avantages et Inconvénients des techniques de stabilisation couramment	13

Chapitre

Tableau II.1: Poids volumiques secs de quelques minéraux	18
Tableau II.2 :Résultats de la limite de liquidité WL	20
Tableau II.3 : Degré de plasticité des sols	21
Tableau II.4 : Paramètres physiques de argile	23
Tableau II.5: Activité des différents minéraux	25
Tableau II.6 : Résultats de l'essai de bleu de méthylène argile.....	27
Tableau II.7 : Classification des sols suivant la valeur au bleu de méthylène	28
Tableau II.8: Analyse chimique du la Argile Adrar	28
Tableau II.9:Analyse granulométrique du sable dunaire (bouda)	30
Tableau II.10: Equivalent de sable du sable dunaire (bouda)	31
Tableau II.11 : Résultats de l'essai de bleu de méthylène sable	31
Tableau II.12: Analyse chimique du la Sable de bouda	31
Tableau II.13: Les caractéristiques physiques de la chaux.....	33
Tableau II.14: les caractéristiques physiques de la chaux	34
Tableau II.15:Résultats de l'analyse chimique de l'eau	34
Tableau II.16 : Estimation du potentiel de gonflement	35
Tableau II.17 : Estimation du potentiel de gonflement	35
Tableau II.18: Estimation du potentiel de gonflement selon HOLTZ	35
Tableau II.19: Potentiel de gonflement d'après le BRE	36
Tableau II.20: Synthèse des paramètres de notre argile	36

CHAPITRE III:

Tableau III.1 : Les résultats de l'essai proctor modifié Adrar.....	43
Tableau.III.2.Les paramètres de l'optimum Proctor des mélanges (A + Ch) et (A + S).....	48
Tableau III.3:Tableau récapitulatif des résultats de l'essai de bleu de méthylène des. mélange à la chaux	50
Tableau III.4: Classificationdes résultats de l'essai de bleu de méthylène des. 63 mélanges à la chaux.....	51
Tableau III.5:Résultats de limite d'Atterberg d'argile Adrar+ la chaux	51

CHAPITRE IV:

Tableau IV.1 : Résultats de l'essai œdométrique de gonflement de chaux.....	58
Tableau IV.2 : Résultats de l'essai œdométrique de gonflement de sable	59
Tableau IV.3 : Variation de la pression de gonflement en fonction de pourcentage de chaux	61
Tableau IV. 4: Classement des module oedometrique en fonction de nature des sols.	63
Tableau IV.5 : Les résultats de l'essai œdométrique de l'argile d'Adrar.....	63
Tableau IV.6 : Compressibilité des sols	64
Tableau IV.7: Classement des valeurs de Cv en fonction de la nature des sols.....	64
Tableau IV.8: Résultat des valeurs de Cv	65
Tableau IV.9:Résultats de valeur k	65

CHAPITRE V:

Tableau V.1 : Résultat de l'indice des vides pour différents % de la chaux	67
Tableau V .2 : Influence du pourcentage de la chaux sur le module oedométriques	68
Tableau V .3 : Résultat de l'indice de compression en fontion du % de la chaux	68
Tableau V .4 : Influence du pourcentage de la chaux sur la compressibilite	69
Tableau V.5 : Variation de l'indice de gonflement on fonction de % de la chaux	70
Tableau V.6:Résultats du cofficient de consolidation des deux méthodes Casagrande et Taylor en fonction du % de la chaux	70
Tableau V .7 : Résultat de coefficient de perméabilité des deux méthodes en fonction du % de la chaux.....	71

Liste des photos

CHAPITRE II

Photo II.1 : Le mode opératoire pour calculer le poids spécifique des grains solides	17
Photo II.2: Appareil de casagrande	19
Photo II.3: Images présentant le mode opératoire de la limite de liquidité WL.....	20
Photo II.4 :Mode opératoire de la limite de plasticité	21
Photo II .5: Vues de l'état semi-solide à solide	22
Photo II.6: Photos présentant le mode opératoire de l'essai de tamisage (par voie humide) ..	23
Photo II.7 : Photos présentant le mode opératoire de l'essai de sédimentométrie	24
PhotoII.8 : Photos présentant le mode opératoire de l'essai de bleu de méthylène.....	26
Photo II.9 : Photos présentant le mode opératoire de l'essai d'analyse granulométrique de sable bouda	29
Photo II.10 : Photos présentant le mode opératoire de l'essai d'Equivalent de sable	31
Photo II.11 : photo de chaux utilisé.....	32
PhotoII.12 : Photos présentant le mode opératoire de l'essai de la masse volumique apparente.....	33
PhotoII.13 : Photo présentant le mode opératoire de l'essai de la masse volumique absolue .	34

CHAPITRE III

Photo III.1: Photo présente la chaux utilisée	39
Photo III.2: Photo présentant le mode opératoire de l'essai proctor modifié	43
Photo III.3. Photos présentant les résultats de l'essai de bleu de méthylène pour	50

CHAPITRE IV

Photo IV.1 : Appareillage de l'essai œdométrique de gonflement.....	58
Photo IV.2 : Photo présentant le mode opératoire de l'essai de compressibilité oedométrique	62

Introduction générale

Introduction générale

Introduction Générale

Le phénomène du gonflement a causé beaucoup d'endommagements et désordres à travers le monde. Plusieurs solutions sont proposées comme remèdes, parmi elles : la stabilisation chimique, mécanique ou physique.

Afin de limiter les désordres dans les constructions, plusieurs études ont été faites sur ce phénomène, des solutions basées sur diverses techniques de stabilisations ont conduits à la réduction du potentiel de gonflement.

L'étude présentée, est une contribution à la technique d'amélioration, stabilisation renforcement par l'ajout de la chaux et l'ajout de sable, ces études montrent que ces stabilisants ont des rôles positifs sur la réduction des paramètres du gonflement. Notre étude s'inscrit dans le cadre de la stabilisation d'un sol gonflant.

Le but de cette présente étude est d'apprécier les effets de l'ajout de chaux et l'ajout de sable sur ce sol.

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.

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 deuxième 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.

Le quatrième chapitre traite l'étude du comportement mécanique de l'argile stabilisé.

Le cinquième chapitre tient compte de l'étude des l'influence de la chaux sur les paramètres mécaniques

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

Chapitre I
Synthèse bibliographique
sur les caractéristiques des argiles
et leurs stabilisations

I.1.Introduction

Les sols argileux présentent des variations de volume parfois importantes lorsque leur teneur en eau varie en réponse aux conditions climatiques et à l'action de la végétation. Ces variations de volume affectent le fonctionnement des fondations et des constructions en contact avec le sol et sont la cause de dommages particulièrement intenses dans les périodes de sécheresse.

En Algérie, plusieurs cas de désordres très préjudiciables, liés au gonflement, ont été signalés dans plusieurs régions tels que: la raffinerie de In Amenas, à l'hôpital de N'Gaous (Batna), sur la ligne de chemin de fer Ramdane Djamel (Jijel), l'hôpital de Sidi Chahmi et la briqueterie de Mers El Kébir (Oran). Abadla, Ouled Khodeir, polyclinique de Sidi- aissa à M'sila [Azzouz FZ 2015].

I.2.Définition des argiles

L'argile est une matière première utilisée depuis longtemps dans les différentes activités de la vie humaine. Le mot argile provient du mot grec «Agros » ou de latin « argilo » qui veut dire blanc.

Les argiles sont des roches constituées d'une variété de minéraux très fins, plus ou moins bien définis, et la forme généralement aplatie. Ils sont constitués par des minéraux spécifiques dits : argileux, mais on trouve aussi des espèces dont les plus fréquentes sont la silice, des silicates non phylliteux, des oxydes, des hydroxydes cristallisés ou amorphe et des carbonates [Sakran Salah 2014].

L'argile se rapporte à la terre grasse et molle contenant un ensemble de particules fines dont la taille supérieure est fixée à 2µm. Chargée négativement comme la smectite, l'illite et la kaolinite. La présence de tels minéraux rend l'argile fortement sensible aux molécules polaires d'eau. Cette sensibilité se traduit par le gonflement, le retrait et le changement des propriétés mécaniques. Les argiles sont très abondantes dans la nature et couvrent environ 42 % du volume de l'écorce terrestre [Jad Wakim2005].

Le terme « argile » peut être défini selon deux critères, granulométrique et minéralogique :

Au sens granulométrique, c'est le domaine comprenant des éléments inférieurs à deux micromètres selon la définition de l'Association Internationale de la Science du Sol. Leur faible taille leur confère une forte réactivité chimique et physique ainsi qu'une importante surface de contact, Les ingénieurs s'attachent plutôt aux propriétés de plasticité des matériaux argileux qu'à leur taille.

Au sens minéralogique, les argiles sont des minéraux alumino-silicatés appartenant à la famille des phyllosilicates dont l'unité de base est le feuille [Chahrazed Abdellaoui 2006].

I.2.1. Minéraux argileux

I.2.1.1. Structure des argiles

Les matériaux argileux sont constitués de petites particules dont la partie poreuse est partiellement ou en totalité occupée par une solution chimique. Ces particules sont formées par l'association des feuillets élémentaires et sont caractérisées par leur surface spécifique, leur capacité d'échange cationique et leur densité de charge surfacique. [Jad Wakim2005]

Deux éléments essentiels, le silicium et l'aluminium entourés d'oxygènes et d'hydroxyles, constituent le réseau cristallin fondamental (voir figure I.1).

Le silicium occupe le centre d'un tétraèdre et l'aluminium celui d'un octaèdre. L'accolement de plusieurs tétraèdres ou de plusieurs octaèdres constitue une couche correspondante [Tizzaoui 2013].

Structure cristallographique :

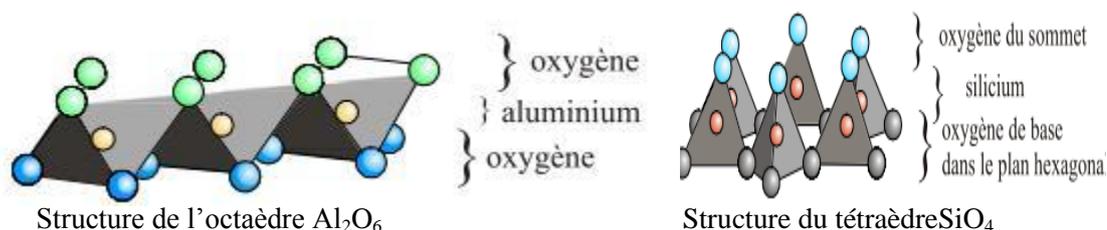


Figure I.1: Structure octaédrique et tétraédrique des couches d'argile [Bellabbaci 2015]

La superposition des couches tétraédriques et octaédriques forme un feuillet élémentaire séparé souvent par un espace inter foliaire. Cet espace inter foliaire peut être vide, comme il peut renfermer des cations alcalins ou alcalino-terreux et des molécules d'eau. Ces cations peuvent quitter facilement l'espace inter foliaire et être remplacés par d'autres cations [Tizzaoui 2013].

I.2.1.2. Principaux groupes des minéraux argileux

Les matériaux argileux sont constitués de petites particules dont la partie poreuse est partiellement ou en totalité occupée par une solution chimique. Ces particules sont formées par l'association des feuillets élémentaires et sont caractérisées par leur surface spécifique, leur capacité d'échange cationique et leur densité de charge surfacique [Jad Wakim 2005].

Selon la structure chimique des argiles, il est possible de les classer en trois groupes les plus rencontrés dans la nature : la famille de Kaolinite T-O, la famille d'Illite T-O-T et la famille de Smectite T-O-T.

La capacité de gonflement des argiles est influencée par les arrangements et la composition minéralogique de ces feuillets. De même, le gonflement est contrôlé par l'intensité des liaisons inter feuillets qui peuvent se casser lors de l'hydratation et modifier par la suite la micro texture de l'argile.

L'analyse du comportement gonflant des argiles consiste alors à préciser la nature de ces liaisons pour chacune des trois familles d'argiles considérées.

a. Les Kaolinites (Kaolinite, Bertierine): Sont des argiles dites peu gonflantes. Une particule d'argile est formée d'un empilement de plusieurs feuillets. Chaque feuillet a une épaisseur approximative de 7 \AA et est composée d'une couche de silice et d'une couche d'alumine (voir figure I.2 et I.4)

Le contact entre les feuillets se fait suivant un plan contenant des ions d'hydroxyles OH^- de l'octa-dre et des ions d'oxygène O^{2-} du tétraèdre.

Les liaisons interfoliaires, résultant de l'effet combiné de liaisons d'hydrogène et de la force de Van Der Waals, confèrent un lien assez fort. Les feuillets sont alors soudés les uns aux autres par des forces de liaisons très importantes rendant la kaolinite peu sensible au gonflement.

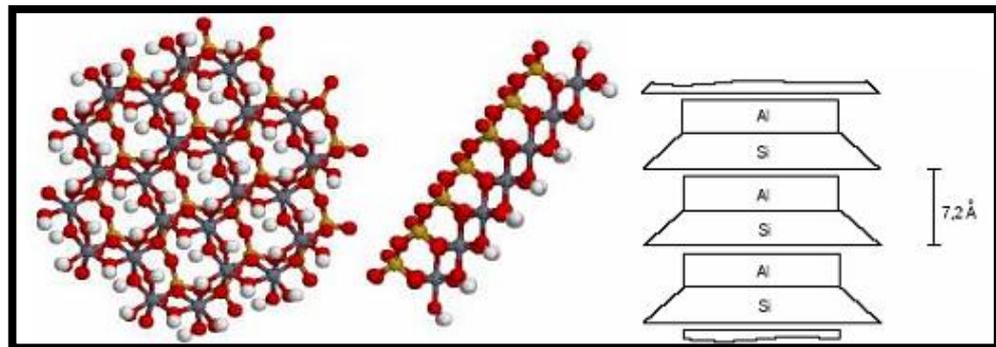


Figure 1.2: Structure cristalline de la kaolinite [Chahrazed Abdellaoui 2006]

b. Les Illites Sont des argiles dites potentiellement gonflantes. Les liaisons entre les feuillets sont moins fortes que celles des kaolinites.

Le feuillet élémentaire de l'illite est composé d'une couche d'alumine comprise entre deux couches de silice. L'épaisseur d'un feuillet est d'environ 10 \AA (voir figure I.4).

Des substitutions de Al^{3+} par Mg^{2+} et Fe^{2+} , ainsi que de Si^{4+} par Al^{3+} , sont possibles. Le déficit de charge qui en résulte est compensé par des cations de potassium K^+ . La présence de ces cations contribue à renforcer les liaisons interfeuillets. Le comportement des illites se rapproche alors de celui des kaolinites.

c. Les Smectites (Montmorillonites, Beidellite, Nontronite, Hectonite) :Sont des argiles dites potentiellement très gonflantes,Le feuillet élémentaire est composé, comme pour l'illite,

d'une couche d'alumine comprise entre deux couches de silice. L'épaisseur d'un feuillet est d'environ 10 Å.(voir figure I.3 et I.4).

Les liaisons entre les feuillets sont moins fortes que celles des kaolinites et des illites. La faiblesse de ces liaisons leur confère de grandes surfaces spécifiques et de forts potentiels de gonflement.

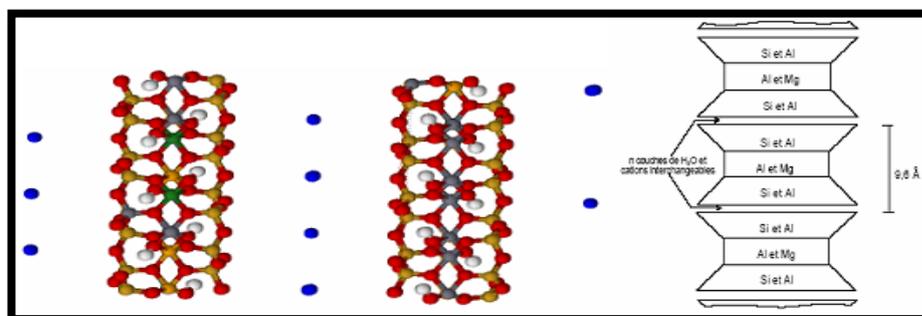


Figure 1.3: Structure cristalline de smectite [Chahrazed Abdellaoui 2006]

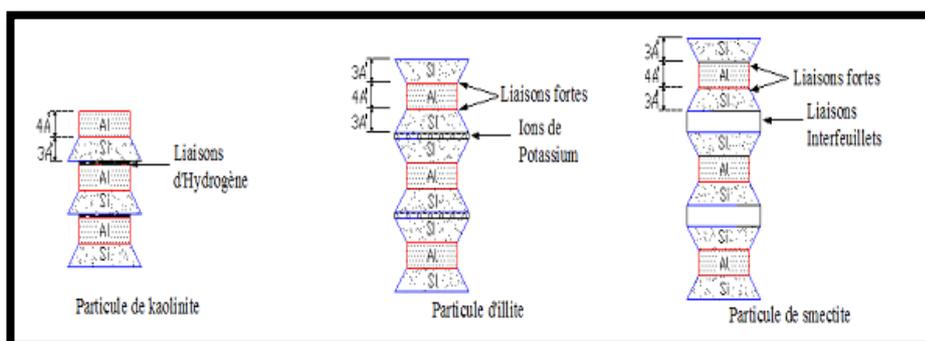


Figure 1.4: Les particules d'argile [Jad Wakim 2005]

Les principales caractéristiques des trois types d'argiles sont résumées dans les tableaux suivants:

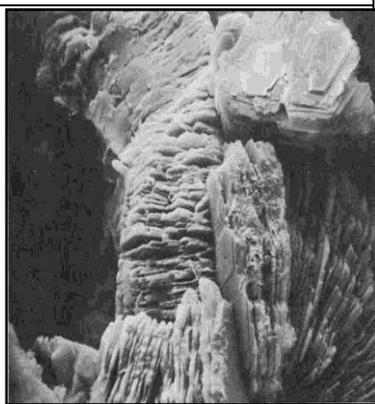
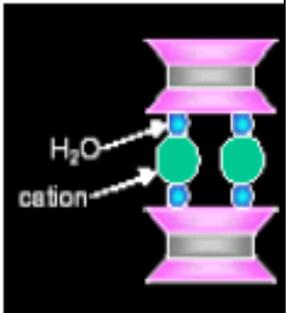
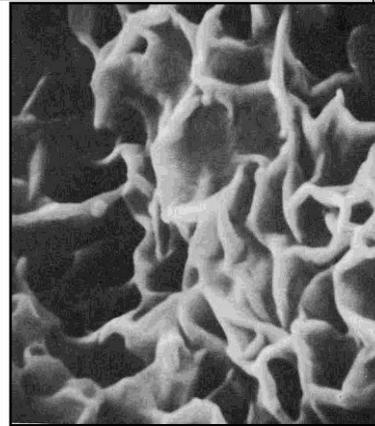
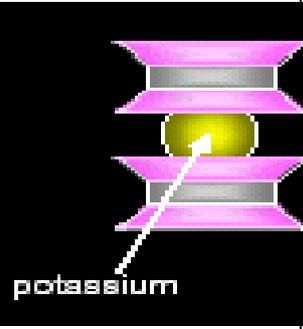
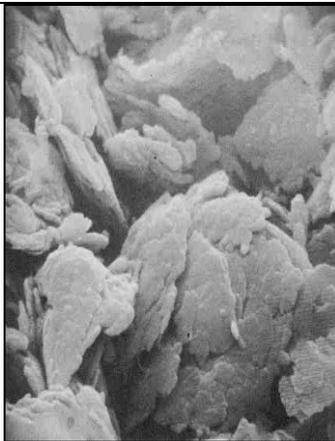
Le tableau I.1 synthétise et compare les caractéristiques de ces trois argiles

Tableau I.1: Caractéristiques des argiles [Jad Wakim 2005]

Nom	Type	Nombre de feuillets par particule	Diamètre d'une particule(µm)	Epaisseur d'une particule(µm)	Surface spécifique (m2/g)	Capacité d'échange cationique CEC(meq/100g)
Kaolinite	1:1	100-200	0,1-4	1-10	10-20	3-15
Illite	2:1	1-10	0,1-1	0,003-0,01	65-100	10-40
Smectite	2:1	1	0,1	0,001	700-840	80-150

Tableau I.2 : La classification des principaux groupes de minéraux argileux [Mellouki 2017]

Minéraux Argileux	Type de minéral	Structure du minéral	Taille de la	Photographie au microscope à balayage
-------------------	-----------------	----------------------	--------------	---------------------------------------

			particule	électronique [4]
Kaolinite	1 : 1	 <p>Grande ($> 1\mu\text{m}$)</p> <p>$\text{Si}_2 \text{Al}_2 \text{O}_5 (\text{OH})_4$</p>		
Montmorillonite	2 : 1	 <p>Petite ($< 1\mu\text{m}$)</p> <p>$(\text{Na}, \text{Ca})_{0.3} (\text{Al}, \text{Mg})_2 \text{Si}_4 \text{O}_{10} (\text{OH})_2$</p>		
Illite	2 : 1	 <p>Moyenne ($< 1\mu\text{m}$)</p> <p>$(\text{K}, \text{H}_3\text{O}) (\text{Al}, \text{Mg}, \text{Fe})_2 (\text{Si}, \text{Al})_4 \text{O}_{10} [(\text{OH})_2 \text{H}_2\text{O}]$</p>		

I.3. Force entre les particules d'argile

Les argiles sont principalement caractérisées par un déséquilibre électrique dû à une substitution isomorphe de cations dans la structure octaédrique des feuillets. Il en résulte alors la formation de la double couche diffusée due à la fixation des cations échangeables qui s'installent à la surface des feuillets du fait des forces électrostatiques qui sont les suivantes [Belabbaci 2015] :

I.3.1. Forces d'attractions

Généralement causées par les forces de **Van Der Waals** entre les feuillets voisins

I.3.2. Forces de répulsion

Ayant plusieurs composantes (interaction des doubles couches associées aux feuillets , énergie d'hydratation des cations compensateurs).

Ces deux forces décroissent rapidement avec la distance interparticulaire .Quant à la force de répulsion, elle diminue également avec l'augmentation de la Concentration en électrolytes

I.4. Phénomènes de gonflement des argiles

I.4.1 Mécanisme de gonflement

Certains 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.5), d'après Mouroux et al (1988) ; Popescu (1986) ; Holtz et Gibbs (1956) ; Chen (1988) in [Hafsi et Mekki 2015].

- 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.5 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.

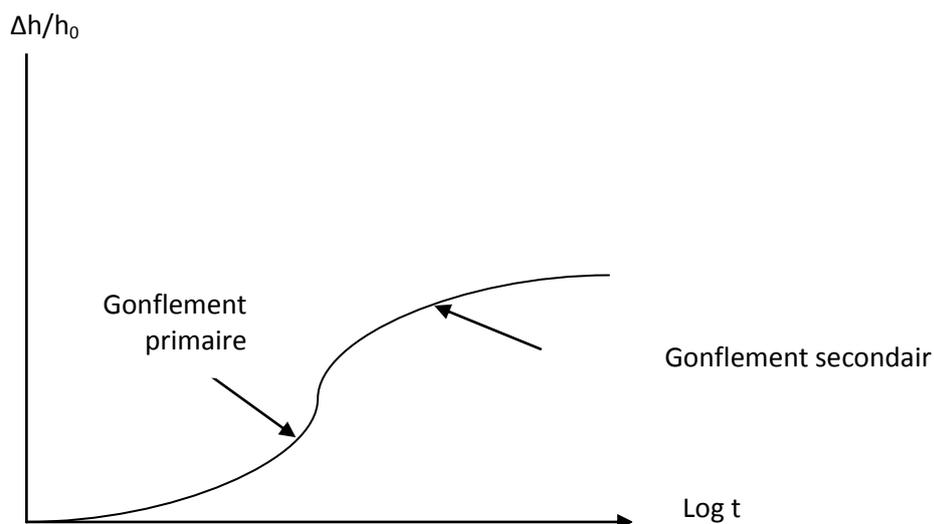


Figure I.5 : Courbe du gonflement en fonction du temps (Chen, 1988) in [Hafsi et Mekki 2015]

I.4.3 Facteurs affectant le gonflement

Les résultats de nombreuses études ont montré que l'amplitude du gonflement dépend de deux types de facteurs :

- ✓ Les facteurs intrinsèques
- ✓ Les facteurs externes.

I.4.3.1 Facteurs intrinsèques

- La composition minéralogique
- Le type de cations compensateur
- La Capacité d'échange en cations (CEC)
- La Surface spécifique
- La structure du sol
- La quantité de minéraux non argileux.

I.4.3.2 Facteurs externes

D'autres paramètres indépendants de la structure des argiles et de la composition chimique de la solution hydratante peuvent avoir une influence importante sur le gonflement, on cite en particulier :

- Les conditions de compactage (statique ou dynamique) ;
- L'énergie de compactage
- La teneur en eau initiale
- La densité sèche

- L'effet d'échelle
- Le régime de contraintes
- le frottement latéral
- Les cycles retrait-gonflement
- La durée des essais et la température

I.5. Stabilisation des sols gonflants

Nous utilisons le mot « gonflement » de manière indifférente pour définir une augmentation de volume du matériau, quelle que soit la cause. 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. [Houssin Nwamooz 2007]

Le traitement des sols est souvent utilisé pour augmenter leur résistance, pour réduire ou augmenter leur perméabilité ainsi que pour diminuer leur compressibilité. Il est, aussi utilisé pour minimiser la sensibilité du sol aux variations de la teneur en eau.[Azzouz FZ 2015]

I.5.1 But de la stabilisation

- Réduire le volume des vides entre les particules solides (augmenter la compacité);
- Colmater les vides que l'on peut supprimer ;
- améliorer la résistance mécanique, et de diminuer la sensibilité à l'eau.

I.5.2 Amélioration majeur et durable []

- Augmentation de la résistance mécanique;
- Diminution de la compressibilité;
- Diminution du retrait;
- Stabilisation du changement de volume.

I.5.3 Différentes techniques de stabilisation

Parmi les techniques de stabilisation les plus couramment utilisées, on distingue : [BABOURI ,2008 in Azzouz FZ 2015]

- ✓ la stabilisation mécanique ;
- ✓ la stabilisation thermique ;
- ✓ la stabilisation chimique, (par additifs).

Le choix de l'une de ces méthodes dépend de plusieurs paramètres tels que ; les considérations économiques, la nature du sol à traiter, la durée de l'opération, la disponibilité des matériaux à utiliser ainsi que les conditions d'environnement.

Notre travail concerne la technique de stabilisation mécanique (proctor modifié) appliquée à l'argile d'Adrar.

I.5.3.1. Stabilisation mécanique

a. 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 ou modifié.

b. Drainage

C'est la technique la plus classique qui est mise en œuvre. Plusieurs procédés sont utilisés ; comme les tranchées drainant, drains de carton, drains de sables verticaux.

c. Substitution

Evidente Si la couche a une grande épaisseur, la suppression totale ne peut être envisagée. Elle consiste à excaver jusqu'à une certaine profondeur puis remblayer avec des sable, ou autres matériaux graveleux. C'est une solution très coûteuse.

I.5.3.2. Traitement thermique

Une augmentation de la température peut améliorer la résistance d'une argile en réduisant la répulsion électrique entre les particules, sous l'effet de la chaleur on provoque un écoulement de l'eau interstitielle due au gradient thermique appliqué.

I.5.3.3. Stabilisation avec des additifs

Les propriétés d'un sol peuvent être modifiées par l'ajout de certains additifs.

a. Liants

Les liants se divisent en deux grandes familles qui sont les liants hydrauliques et les liants organiques.

a.1. Liants hydrauliques

Ce sont des produits d'origine minérale qui par réaction avec l'eau donnent des réseaux cristallins enchevêtrés ayant une bonne cohésion et pouvant aboutir à des jonctions avec le Squelette minéral.

a.2.Liants organiques

Ce sont des produits de type colle, c'est à dire des composés organiques susceptibles d'une bonne adhésion au squelette.

Le schéma suivant donne les principaux liants existants dans l'industrie

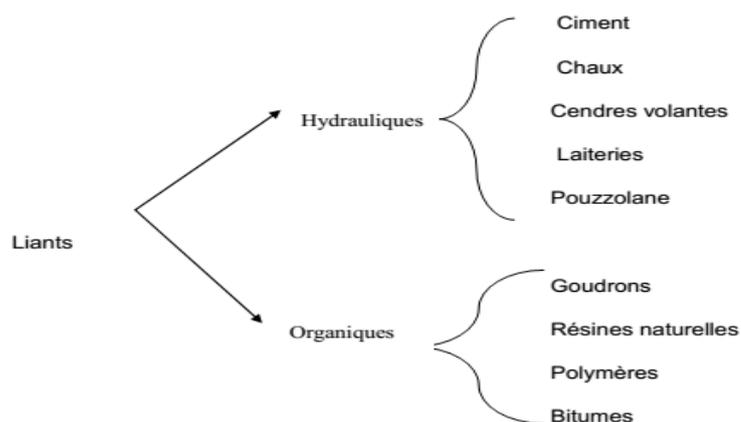


Figure I.6 : Classification des liants.[Belabbaci 2015]

I.5.4. Stabilisation par l'ajout de la chaux

La stabilisation par ajout de chaux est la technique de traitement des sols la plus répandue. L'utilisation de cette technique permet :

- D'éviter des volumes de terrassement importants dans le cas de substitution des sols médiocres.
- De donner aux sols argileux d'une manière assez rapide une bonne consistance pour des dosages compris entre 1% et 2%. Ceci montre aussi l'intérêt économique de ce procédé.
- De modifier les propriétés du sol.

Sachant qu'il y a deux types de chaux, vive et éteinte, le choix s'effectue en basant sur les essais de laboratoire, les essais de chantier et sur le prix de revient.

La figure I.7 montre que la courbe Proctor d'un sol traité est déplacée vers la droite et vers le bas par rapport à la courbe du sol naturel. Ce déplacement est d'autant plus marqué que le sol réagit bien avec la chaux.

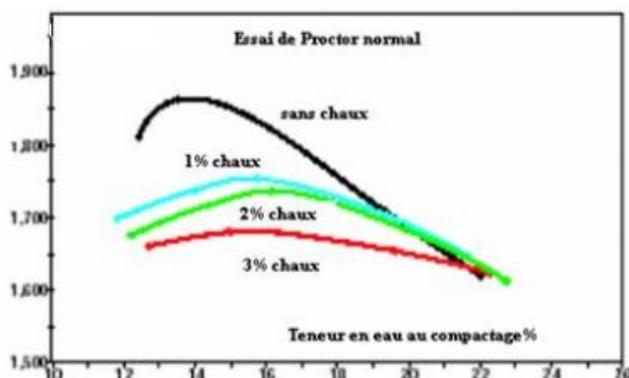


Figure I.7 : Influence de la chaux sur les caractéristiques de compactage.[Bulletin CRR, Cité par AZZOUZ, 2006].

Le traitement à la chaux réduit donc la valeur maximale de la masse volumique apparente sèche et augmente la valeur de la teneur en eau permettant de l'obtenir.

De nombreuses études ont montré que la stabilisation des sols argileux par la chaux transforme ces derniers en sols fermes et améliore leur résistance, leur perméabilité et stabilise leurs volume après gonflement et retrait.

I.5.5. Stabilisation par l'ajout de sable

Plusieurs auteurs ont étudié l'influence de l'ajout de sable sur le gonflement.

Nous citerons certaines d'entre elles :

SATYANARAYANA, 1969, cité par ALLAM ,2011 **in Belabbaci 2015**; 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 la réduction de la pression diminue (différence marquée à partir 50%de sable).

La Figure I.8 présentent des constructives simples permettent de limiter considérablement les désordres du phénomène gonflement –retrait.

Tableau I.3: Avantages et Inconvénients des techniques de stabilisation couramment utilisées, (BEKKOUCHE et al, 2001) in.[**Belabbaci 2015**]

Techniques	Procédés	Avantages	Inconvénients
Stabilisation mécanique	Compactage	-Le compactage est le plus économique. -Réduire le potentiel expansif.	-Il faut une grande quantité d'eau. (compacter au-dessus de l'optimum avec une wn élevée).
	Substitution		-L'épaisseur de la couche. -Disponibilité du matériau.
	Préhumidification		Le temps de l'opération. -La distribution uniforme de wn.
	Méthode de contrôle	Minimiser l'humidification ou dessèchement	-La sensibilité à la variation de la teneur en eau.
Stabilisation thermique		-Réduire la répulsion électrique entre les particules.	Très coûteuse
Stabilisation chimique (par l'ajout des matériaux)	Les sels	-Augmenter la concentration ionique de l'eau libre. -Réduire le phénomène d'échange.	Le choix du type, de dosage et de la méthode d'addition d'un produit. (Valence et rayon du cation).
	Ciment	Augmenter la résistance. -Diminuer la plasticité. -Réduire le potentiel de variation de volume. - Augmenter la limite de retrait.	Utilisation d'un dosage important.

I.6.Conclusion

Le gonflement des sols argileux est un phénomène très complexe qui fait intervenir un grand nombre de paramètres intrinsèques et environnants. Il est principalement dû à la structure minéralogique des argiles.

La stabilisation des sols argileux a été étudiée par un grand nombre de chercheurs. Beaucoup de méthodes et d'appareillages ont été mis au point pour connaître l'influence de l'efficacité d'une solution ou d'un produit sur la stabilisation d'un sol argileux.

Le choix des techniques de stabilisation les plus utilisées dépend de plusieurs paramètres tels que; les considérations économiques, la nature du sol à traiter, la durée de l'opération, la disponibilité des matériaux à utiliser ainsi que les conditions d'environnement.

Chapitre II

Les caractéristiques de l'argile étudiée

II.1 Introduction

Ce chapitre présente les caractéristiques physico-chimiques de l'argile, du sable et d'un liant hydraulique (chaux) utilisé. L'objectif de cette caractérisation est la classification géotechnique de cet argile et l'identification des minéraux susceptibles de provoquer des variations volumiques importantes.

II.2 Les essais d'identification

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. Les essais menés sur l'argile ont pour but de déterminer quelques paramètres essentielles et indices permettant l'identification et la prédiction du comportement du gonflement, et d'autres essais menés sur la chaux, le sable et l'eau utilisés dans notre étude.

Les essais effectués sur nos échantillons sont les suivants :

- Les essais d'identification de l'argile étudiée :
 - ✓ Poids volumique des grains solides ;
 - ✓ Analyse granulométrique par sédimentométrie ;
 - ✓ Analyse granulométrique par tamisage (par voie humide) ;
 - ✓ Limites d'Atterberg ;
 - ✓ Essai au bleu de méthylène ;
 - ✓ Analyse chimique ;
- Les essais menés sur le sable :
 - ✓ Analyse granulométrique par tamisages sec ;
 - ✓ Équivalent de sable ;
 - ✓ Essai au bleu de méthylène ;
 - ✓ Analyse chimique ;
- Les essais menés sur la chaux :
 - ✓ masse volumique apparente et spécifique ;
 - ✓ analyse chimique ;
- Une analyse chimique de l'eau utilisée a été donnée par le laboratoire

des analyses des eaux potable l'unité de fabrication des Adrar

II.2.1 Identification et classification d'argile

Le gisement d'argile d'Adrar 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 (Figure II.1)



Figure II.1: Localisation du site de gisement d'argile d'Adrar (Adrar nord)

II.2.1.1 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 .

$$\text{Avec : } \gamma_s = \frac{W_s}{V_s} \quad \text{: II.1}$$

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.



Photos II.1:Présent l'essai de poids spécifique des grains solides.

D'après les résultats obtenus de l'essai, la valeur du poids spécifique des grains solides (γ_s) est donnée par la formule II.2 :

$$\gamma_s = \frac{(W_3 - W_1) \cdot \sigma_w(20^\circ)}{W_2 - W_1 - W_4 + W_3} \quad \text{II.2}$$

Avec : W_1 (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 les résultats suivants : $\gamma_s = 26,5 \text{ KN/m}^3$

Le tableau II.1 montre les valeurs des poids volumiques sec de quelques minéraux caractéristiques d'après Withman et Lambein, in Costet et Sanglérat, 1983 in [Hafsi et Mekki 2015].

Tableau II.1: Poids volumiques secs de quelques minéraux. [Hafsi et Mekki 2015]

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

D'après ce tableau et suivant la valeur du poids volumique sec, notre argile est proche du Na-Ca-Feldspath, chlorite et la kaolinite.

II 2.1.2 Limites d'Atterberg ou limites de consistance (NF P 94-051)

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.

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.

$$I_p = W_L - W_P \quad \text{II.3}$$

II.2.1.2.1 Limite de liquidité

La limite de liquidité est mesurée à la coupelle de casagrande.



Photo II.2: Appareil de casagrande

Par définition, la limite de liquidité W_L est la teneur en eau (exprimée en %) d'un sol remanié caractérisant la transition entre un état liquide (le sol est humide et déformable) et un état plastique qui correspond à une fermeture de 1cm pour un nombre de chocs N égale à 25.

Si l'on étudie expérimentalement la relation qui lie le nombre de chocs N à la teneur en eau W , on constate que la courbe représentative de cette relation est une droite qui relie au moins 2 points; lorsque le nombre de chocs est compris entre 15 et 35 on prendra les valeurs de ces points on trace la droite. Pour ce même intervalle des valeurs de N , la formule approchée.

$$\text{Avec : } W_L = w (N/25)^{0,121} \quad \text{II.4}$$

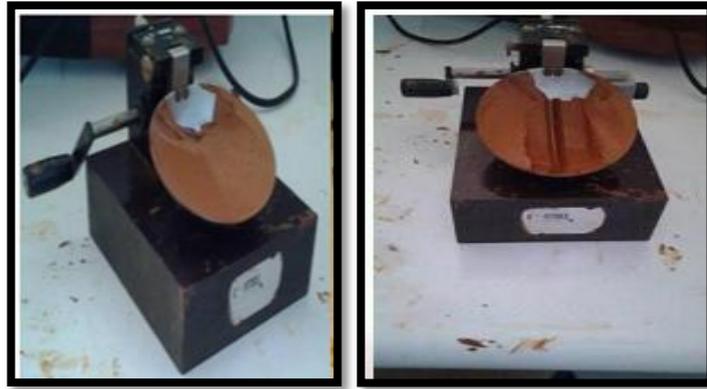


Photo II.3: Images présentant le mode opératoire de la limite de liquidité W_L

Le tableau II.2. et les photos (II.2, II.3) 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%	60	78	88
Nombre de coups N	29	22	19

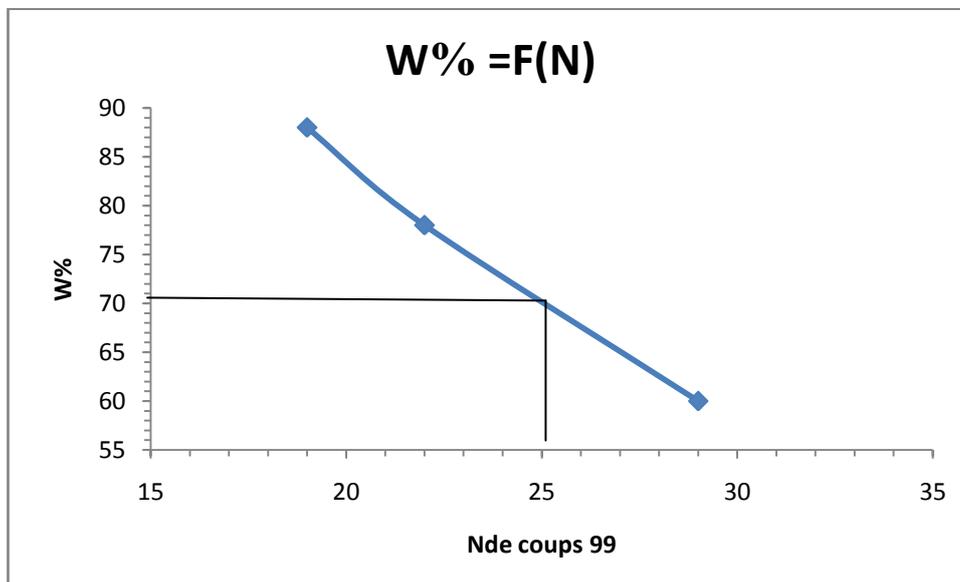


Figure II.2 : Courbe de la limite de liquidité W_L d'argile Adrar

D'après la courbe on a : $W_L = 70\%$.

II.2.1.2.2 La limite de plasticité W_P (NF P 94-051)

La limite de plasticité (W_P) est mesurée par 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.4 présente le mode opératoire de la limite de plasticité.



Photo II.4 : Mode opératoire de la limite de plasticité

A partir des essais on a $W_p = 25.49 \%$

On peut déterminer l'**indice de plasticité** comme suit :

Argile A drar : $I_p = W_L - W_p = 70 - 25.49 = 44.51$

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. [Hafsi et Mekki 2015]

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 $I_p = 44.51 > 40$, donc on classe le sol suivant son degré de plasticité comme argile très plastique.

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.2). Notre sol est une argile très plastique (At).

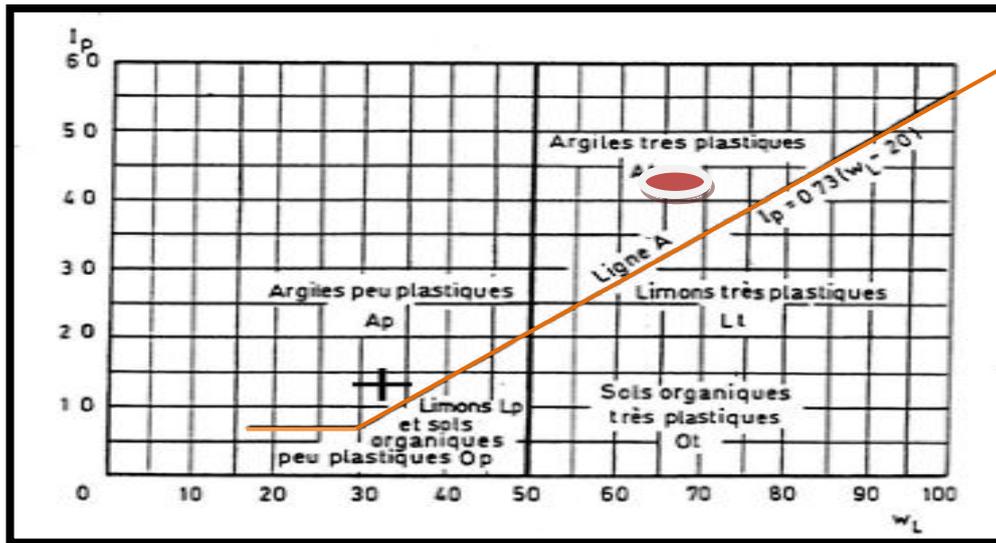


Figure II.3: Abaque de plasticité de Casagrande selon la classification L.C.P.C des sol
fin

L.C.P.C (Laboratoire Centrale des Ponts et Chaussées).

II.2.1.2.3 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.5).



Photo II .5: Vues de l'état semi-solide à solide

On définit I_R comme étant l'indice de retrait, on a :

$$I_R = W_L - W_R \quad \text{II.4} \quad \text{donc} \quad : I_R = 70 - 10.09 = 59.91$$

Le tableau suivant (II.4) regroupe les paramètres physiques de nos argiles.

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

Sol	W _L (%)	W _p (%)	W _R (%)	I _p (%)	I _R (%)
Argile d'Adrar	70	25.49	10.09	44.51	59.91

II .2.1.3 Analyse granulométrique par tamisage

II .2 .1.3.1 Analyse par tamisage Norme (NF P94-056) : (par voie humide)

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.

Principe de l'essai :

Selon la norme : NF P94-056, l'essai s'effectue sur une masse supérieure à 500 g ; dans notre cas ou le tamisage sec fait par la voie humide a fin de séparer les particules grossières des particules fines, et ça a l'aide d'une série de tamis de contrôle dont les dimensions des mailles vont en décroissant du tamis supérieur au tamis inférieur après avoir pesé chacun d'eux vides, on fait passer notre échantillon humide à travers la colonne et on pèse chaque tamis après l'avoir séché pendant 24 heures à l'air libre (voir photo II.6)



Photo II.6: Photos présentant le mode opératoire de l'essai de tamisage (par voie humide)

II.2.1.3.2 Analyse granulométrique par sédimentométrie (Norme NF P94-057)

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.7 montre les accessoires du mode opératoire de l'essai de sédimentométrie pour le argile.

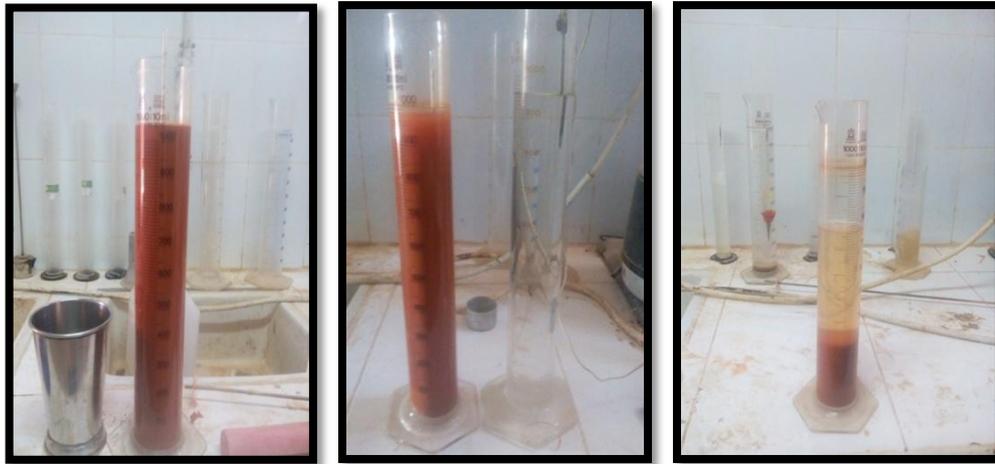


Photo II.7 : Photos présentant le mode opératoire de l'essai de sédimentométrie

La figure II.4 montre les résultats de calcul qui sont représentés graphiquement sur une courbe appelée courbe granulométrique de l'argile

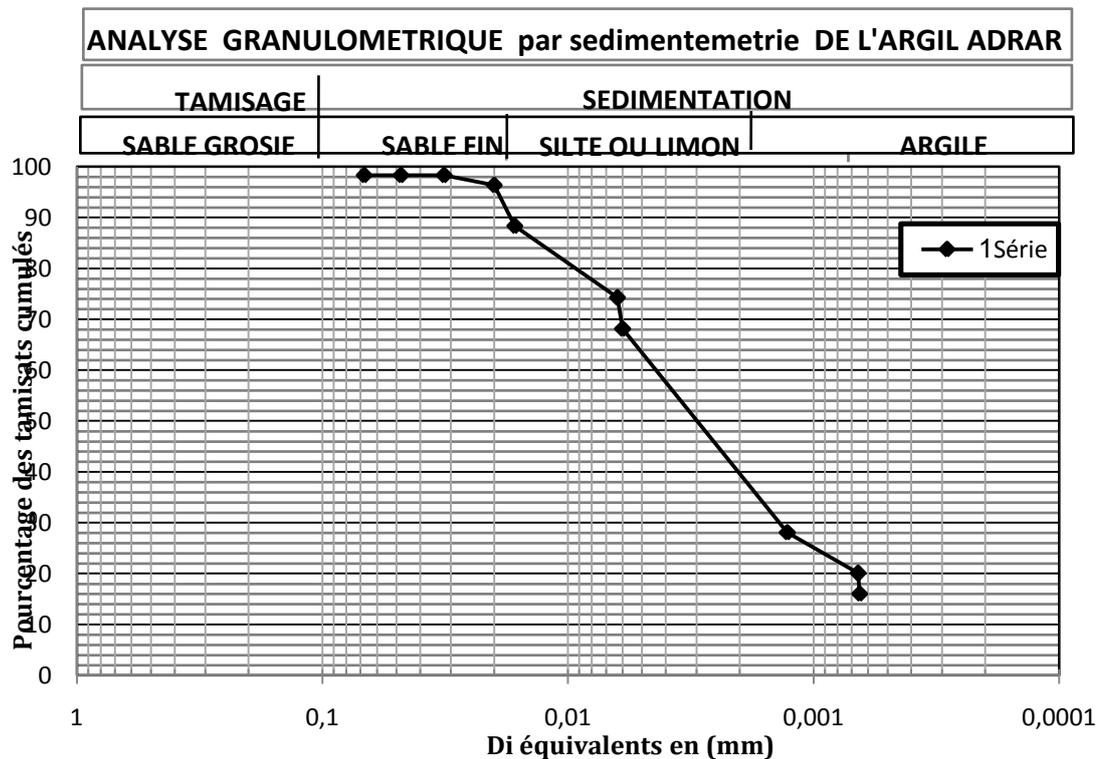


Figure II.4 : Courbe granulométrique par sédimentométrie de l'argile

A partir de la figure II.4, nous remarquons qu'on est en présence d'un sol fin puisque plus de 50% des éléments ont un diamètre inférieures à 80μ , avec les éléments inférieurs à 2μ ; 40%.

D'après la photo II.7, on peut remarquer que l'argile d'Adrar a une vitesse de décantation très lente, le temps pour décanter atteint presque 16 jours, donc on peut conclure que l'argile d'Adrar appartient à une quantité intéressante de particules fines.

L'Activité des argiles

Les limites d'Atterberg sont fonctions des dimensions des grains et de la composition minéralogique du sol. Pour une argile contenant des particules solides assez grosses, Skempton (1957) a montré que l'indice de plasticité dépend de la quantité de grains solides de dimensions inférieures ou égales à $2 \mu\text{m}$.

$$Ac = Ip (\%) / \text{pourcentage des éléments} < 2 \mu\text{m} \quad \text{II.5}$$

$$\text{Argile Adrar : } Ac = 44.51/40 = 1,113$$

D'après ces valeurs on peut conclure que l'argile d'Adrar a une activité plus supérieure alors ce qui implique que cette argile est normalement active.

Le tableau (II.5) donne la classification des minéraux suivant l'activité, D'après ce tableau on peut classer notre argile dans la classe de l'illite.

Tableau II.5: Activité des différents minéraux [Mellouki et Souidi 2017].

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

II.2.1.4 Essai au bleu de méthylène à la tache (NF P 94-068)

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 apparaît 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 test est dit positif.

Si au bout de 5 minutes elle apparaît 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 :

La valeur de bleu est :
$$V_B = \frac{\text{Volume en cm}^3 \text{ de solution}}{\text{Poids sec de la prise}} \quad \text{II.6}$$

➤ Trom Ngoc lan (1981) in Hafsi 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) in Hafsi a donné une relation entre la surface spécifique totale (Sst) et la valeur de bleu de la phase argileuse $V_B(0/2\mu\text{m})$.

Avec : $S_{st} = 21 \cdot V_B(0/2\mu\text{m}) \quad \text{II.7}$

Les photo (II.8) montre les différents accessoires du mode opératoire de l'essai au bleu de méthylène. Par contre, la figure (II.4) montre le schéma synoptique Schéma du processus opératoire de l'essai au bleu.

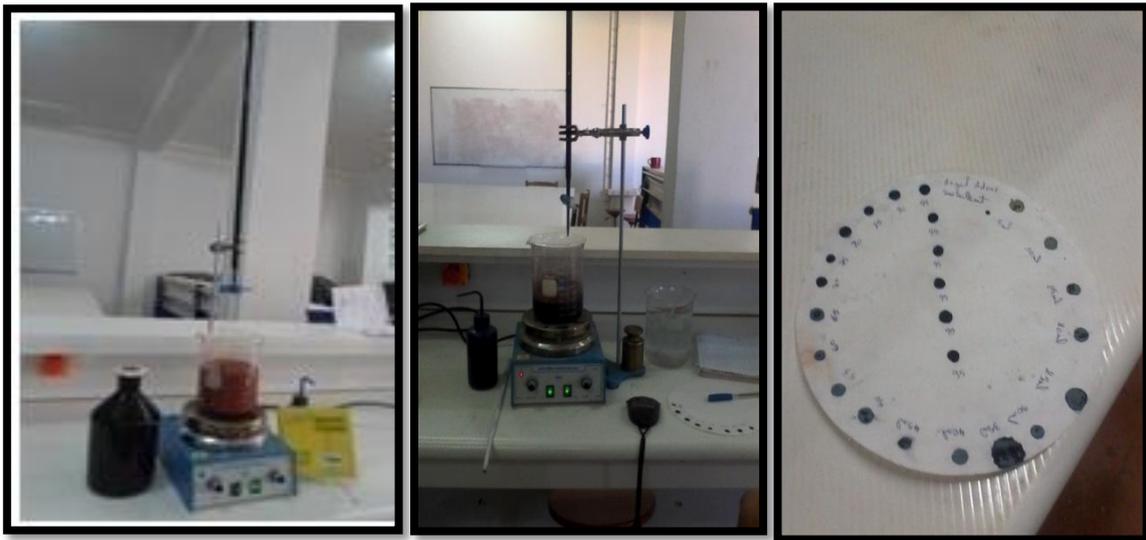


Photo II.8 : Photos présentant le mode opératoire de l'essai de bleu de méthylène

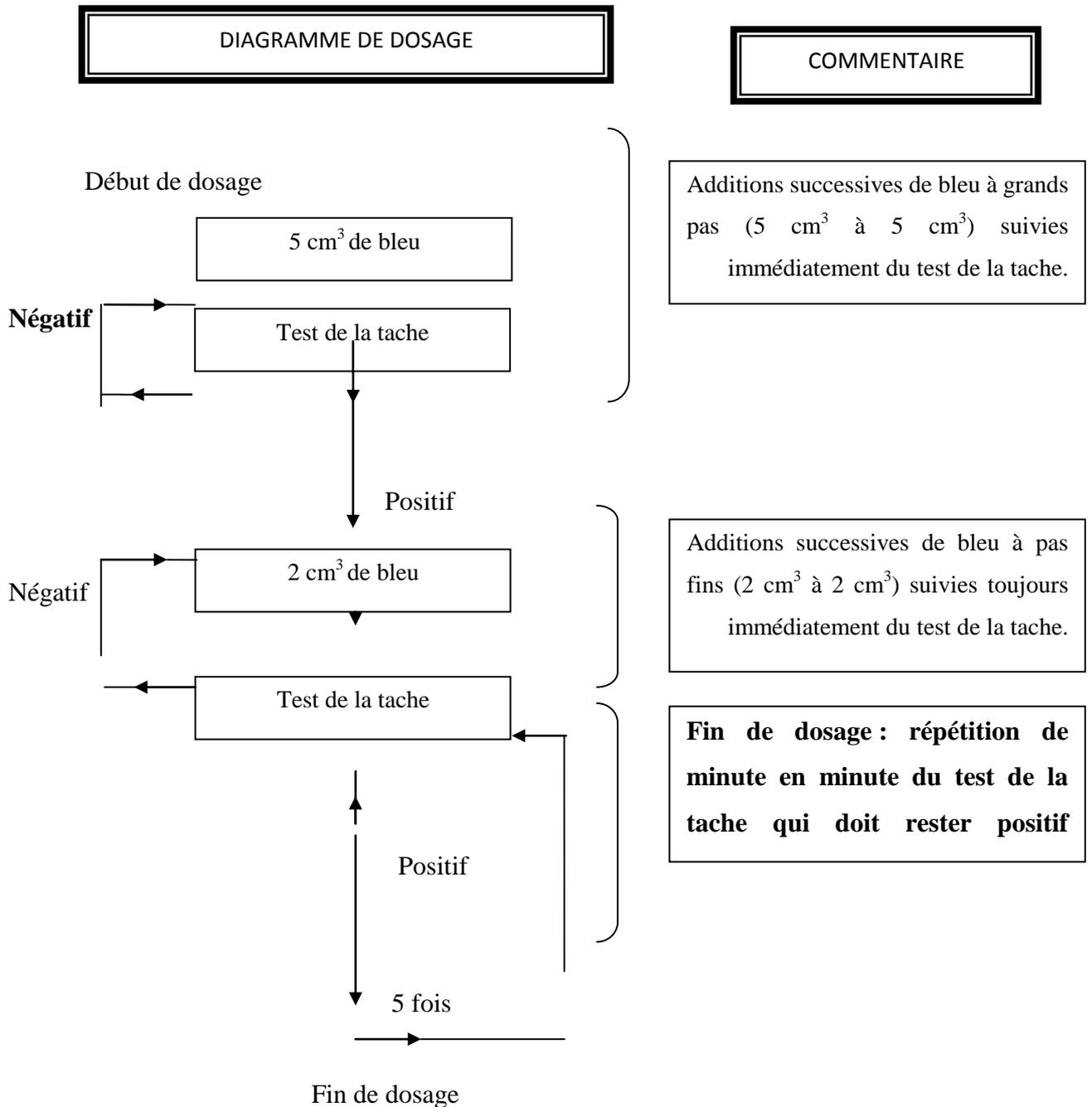


Figure II.5 : Schéma synoptique du processus opératoire de l'essai du bleu à la tâche

[Fatima Zohra Azzoz 2015]

La valeur de bleu de notre argile est : VB = 9,5

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

Sol	Sst	VB
Adrar	199.5	9.5

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.7

Tableau II.7 : Classification des sols suivant la valeur au bleu de méthylène [In Hafsi et Mekki 2015]

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.7, on confirme que notre argile est un sol très argileux :

$$VBS=9.5 > 8$$

II.2.1.5 Analyse chimique

Les analyses chimiques de notre argile ont été réalisées par le laboratoire d'analyses Sol et Eau Région Sud Ouest Adrar (SERSOA). Les résultats sont présentés dans le tableau II.8.

Tableau II.8: Composition chimique de l'Argile Adrar

	Symboles	Unité	Argile Adrar
Sulfates	SO ₃	%	0.97
Chlorures	Cl	%	0.05
Carbonate de Calcium	CaCO ₃	%	-
Matières organiques	MO	%	0.086
Conductivité électrique	Con	ms/cm	1.3
pH eau 1/2.		pH	7.95

II.2.2 Identification et classification de Sable de dune

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 II.6.



Figure II .6 : Le gisement du sable des dunes d'Adrar (Bouda)

II.2.2.1 Analyse granulométrique par tamisage à sec (Norme NF P94-056)

Les analyses granulométriques du sable de dune sont réalisées selon l'essai normalisé cité ci-dessus, par voie sèche (photo II.9), elles nous permettent de déterminer la répartition des grains de sable suivant leurs grosseurs. Cette répartition est traduite par une courbe granulométrique présentée dans la figure II.7.



Photo II.9 : Photos présentant le mode opératoire de l'essai d'analyse granulométrique de sable bouda

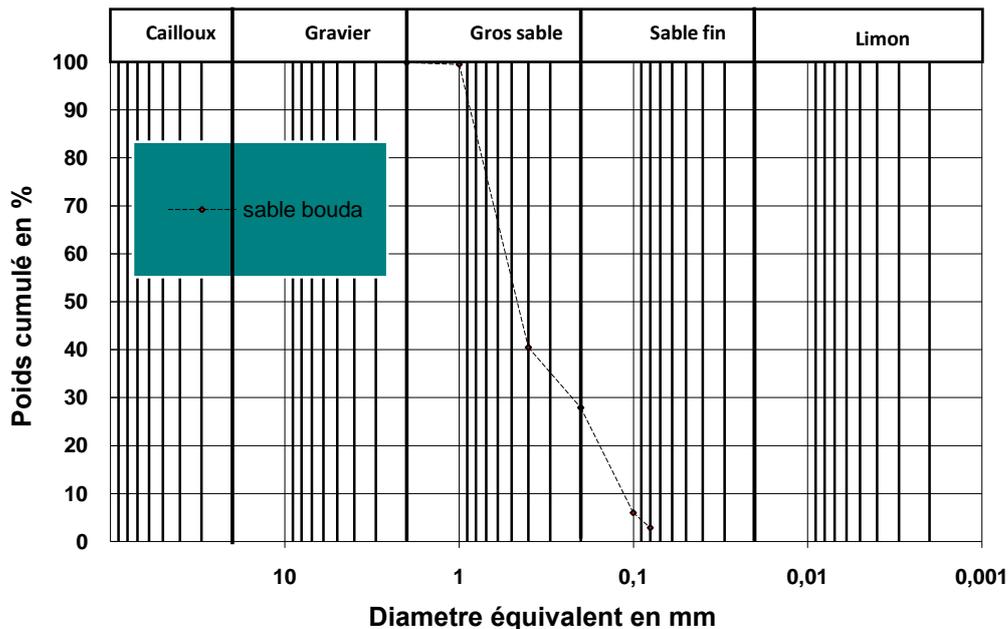


Figure II.7 : Courbe granulométrique de sable de dune de Bouda

Les résultats des analyses granulométriques sont illustrés dans le tableau II.9.

Tableau II.9: Analyse granulométrique du sable dunn (bouda)

Paramètres ϕ	$<80\mu\text{m}$	$\phi < 2\text{mm}$	C_u	C_c
Sable bouda	2%	0%	4	0,56

Coefficient d'uniformité de Hazen: $C_u = D_{60}/D_{10}$

II.8

Coefficient de courbure: $C_c = (D_{30})^2 / D_{10}D_{60}$

II.9

A partir de ces résultats, et d'après la classification des sols LCPC (*laboratoire central des ponts et chaussées*) basée sur les coefficients d'uniformité et de courbure, le sable de dune se classe parmi les sable sables propre bien gradué symbolisés par les lettres *Sb*, sa courbe est uniforme et étalée.

II. 2.2.2 Equivalent de sable (NF P 18-598)

Cet essai effectué selon la norme (NF P 18-598), il est utilisé pour évaluer la propreté des sables, il est effectué sur la fraction 0/5 mm du matériau à étudier. L'essai consiste à séparer les particules fines contenues dans le sol des éléments sableux plus grossiers. Une procédure normalisée permet de définir un coefficient d'équivalent de sable que quantifie la propreté du sable (photo II.10). Les résultats de cet essai sont résumés dans le tableau II.10

ESv : (équivalent de sable visuel).

Esp : (équivalent de sable au piston)

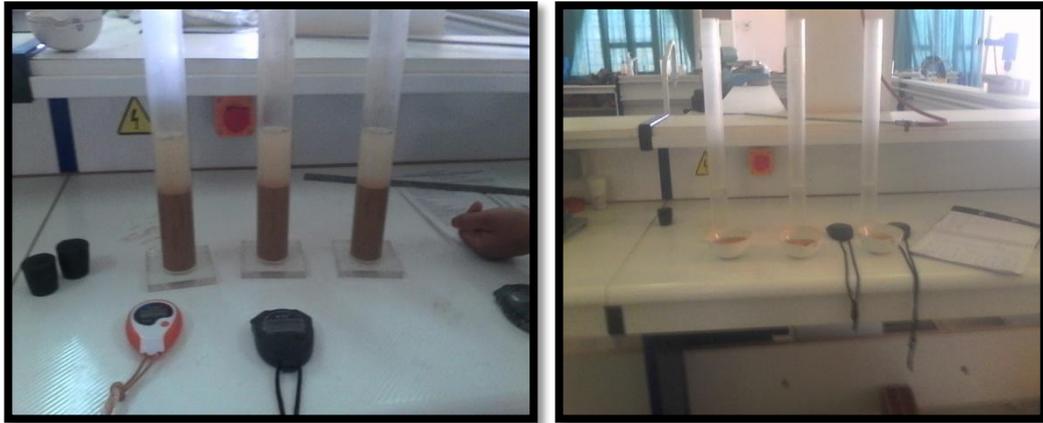


Photo II.10 : Photos présentant le mode opératoire de l'essai d'Equivalent de sable

Tableau II.10: Equivalent de sable de dune (bouda)

Paramètres	Equivalent de sable	
	ES _v	ES _p
Sable de dune	39.99	35.22

D'après la classification LCPC, le sable de dune d'Adrar (bouda) est un sable propre.

II.2.2.3 Essai au bleu de méthylène à la tache (NF P 94-068)

L'essai est réalisé selon la norme (NF P 94-068). La valeur de la surface spécifique totale du sable de dune étant très faible, elle est de l'ordre de 1,4 m²/g, ce qui est en accord avec la définition même de la surface spécifique.

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

Tableau II.11: Résultats de l'essai de bleu de méthylène des sable

Sol	Sst	VB
Sable bouda	4.2	0.2

D'après le tableau II.11, on confirme que notre sable est un sol sable limoneux, sensible à l'eau

Tableau II.12: Analyse chimique du la Sable de bouda Laboratoire d'analyses Sol et Eau Région Sud Ouest Adrar

	Symboles	Unité	Sable de dune
Sulfates	SO ₃	%	0.66
Chlorures	Cl ⁻	%	0.03
Carbonate de Calcium	CaCO ₃	%	6.44
Matières organiques	MO	%	0.043
Conductivité électrique	Con	%	2.81
pH eau 1/2.5	pH	%	8.67

II.2.3 Identification de la Chaux

Le terme « chaux » désigne les produits dérivés du calcaire, notamment la chaux vive et la chaux éteinte. Le calcaire est une pierre d'origine naturelle comportant des niveaux élevés de carbonates de calcium et/ou de magnésium. On extrait le calcaire dans des carrières et des mines à travers le monde

Dans notre cas on a utilisé une chaux extrait de la wilaya de Gardaia (photos II.11)



Photos II.11 : photo de chaux utilisé

II.2.3.1 La Masse Volumique Apparente

Cet essai pour but de déterminer les masses volumiques apparente du matériau de construction, c'est -à-dire sa densité à l'état naturel (en présence des pores).

Matérielle utilisé :

- Balance technique avec de précision 1g.
- Un pot plastique de 1L
- Un entonnoir
- Un petite règle plat en métallique
- Tamis de 0,08mm pour la chaux

Mode opératoire :

- Tamiser la chaux dans le tamis de 0,08mm
- On mesurant le pot vide soit m_1
- On remplit le pot par l'entonnoir avec une distance de chute égale ou moins 5 cm
- On arase le matériaux de la couche supérieur du pot
- On pèse le pot rempli soit m_2



Photo II.12 : Photos présentant le mode opératoire de l'essai de la masse volumique apparente

Tableau II.13: Les caractéristiques physiques de la chaux

Matériaux	Masse volumique apparente
Paramètres	γ app (g/cm)
Chaux	1,7

II.2.3.2 La Masse Volumique Spécifique (absolue)

Principe :

Il consiste à déterminer la masse spécifique (la densité) du la chaux sur la base de laquelle et de la masse volumique on peut calculer la porosité et la compacité de ces matériaux .

Mode opératoire :

- Tamiser la chaux dans le tamis de 0,08mm
- verser de mazot dans le pycnomètre jusqu' au trait repère et déterminer M1 .
- vider une partie du pycnomètre et déterminer m2
- préparer un échantillon des la chaux sec (12g)
- compléter le niveau d' mazot et la chaux dans le pycnomètre
- vider les volumes (chaux et mazot)

La masse spécifique= ρ_s ou lamasse volumique absolue

$$\rho_s = M1 / (V2 - V1) \quad \text{II.10}$$



Photo II.13 : Photo présentant le mode opératoire de l'essai de la masse volumique absolue

Tableau II.14: Les caractéristiques physiques de la chaux

Matériaux	Masse volumique absolu
Paramètres	γ abs (g/cm)
Chaux	2,34

II.2.4 Analyse chimique de l'eau

Une analyse chimique de l'eau utilisée a été donnée par le laboratoire des analyses des eaux potable l'unité de fabrication d'Adrar. Les résultats sont regroupés dans le tableau II.17 :

Tableau II.15: Résultats de l'analyse chimique de l'eau

Composition Chimique	Pourcentage
Resistance	720
pH	7,72
Conductivité électrique	1,15
MO	0,7
Mg ²⁺	40
Ca ²⁺	56
Na ⁺	120
SO ₄ ²⁻	255
HCO ³⁻	122
NO ₃ ⁻	28,41

II.2.5 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.18, II.19, II.20 et II.21).

Tableau II.16 : Estimation du potentiel de gonflement, SNETHEN et al. 1977 in [Hafsi et Mekki 2015]

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.17 : Estimation du potentiel de gonflement, O'NEILL et POORMOAYED (1980) in [Hafsi et Mekki 2015]

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

Tableau II.18: Estimation du potentiel de gonflement selon HOLTZ et al. 1973 in [Hafsi et Mekki 2015].

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.19 : Potentiel de gonflement d'après le BRE (1980) in [Hafsi et Mekki 2015]

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.20, les valeurs trouvées des paramètres physiques afin d'estimer le caractère de gonflement de notre argile.

Tableau II.20: Synthèse des paramètres de notre argile

I_P (%)	W_R (%)	W_L (%)	I_R(%)	Classification du gonflement
44.61	10.09	70	59.91	Tableau II.18 : Elevé
				Tableau II.19 : Elevé à très élevé
				Tableau II.20 : Elevé à très élevé
				Tableau II.21 : Fort

Nous pouvons dire d'après le tableau II.20, que notre argile a un pouvoir de gonflement important qu'il faut étudier.

II .3 Conclusion

Ce chapitre est une recherche dans les particularités différentes sur les caractéristiques physico-chimiques ; les paramètres identifiés par Argile (Adrar Nord), le sable et la chaux .

Les essais d'identification de l'argile (l'indice de plasticité , le pourcentage des particules argileuses, limite de liquidité et la limite de retrait), apparaissent comme étant les plus déterminants du comportement du gonflement des argiles et qui ont montré le caractère gonflant du sol étudié,

Les caractéristiques physico-chimiques d'où les paramètres identifiés du sable de bouda sont (Coefficient d'uniformité et Coefficient d'courbure, ESv ,ESp , l'essai au bleu de méthylène et analyse chimiques) notre sable est un sol sable propre limoneux, sensible à l'eau

D'après la caractérisation physique et chimique, notre argile est un argile très argileux, très plastique avec une activité normale proche du minéral Illite .Pour d'éventuelles suites à ce travail, il serait intéressant de connaître l'amélioration de cette argile par l'ajout de chaux pourcentage (2,4 ,6,8,10et,12)%.

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

- Le gonflement libre ;
- Le potentiel de gonflement ;
- La pression de gonflement

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

Et cela nous conduit à améliorer cette argile par traitement des mélanges à la chaux et au sable ; Rechercher par la suite les méthodes de stabilisation et de renforcement de cette argile dans des applications en génie civil ; cela est le travail du chapitre suivant.

Chapitre III

Traitement des mélanges

III.1. Introduction

Plusieurs travaux ont été effectués sur l'utilisation de la chaux ; et du sable ; comme des stabilisants (chapitre I). Toutes ces études montrent que ces stabilisants ont des rôles positifs sur la réduction des paramètres de l'argile. Des stabilisations physico-chimiques et mécaniques sont employées d'où le but de cette présente étude est d'apprécier les effets de l'ajout de chaux, et de sable.

III.2. Définitions de la chaux

Le terme « chaux » désigne les produits dérivés du calcaire, notamment la chaux vive et la chaux éteinte. Le calcaire est une pierre d'origine naturelle comportant des niveaux élevés de carbonates de calcium et/ou de magnésium. On extrait le calcaire dans des carrières et des mines à travers le monde

III.3. Différents types de chaux

La chaux est obtenue par calcination d'un calcaire (celui-ci représente 20% de la couche terrestre), selon la nature du calcaire utilisé, la cuisson permet la fabrication de plusieurs types de chaux :

- ❖ chaux aérienne provenant d'un calcaire pur.
- ❖ chaux magnésienne provenant d'un mélange de calcaire et de carbonate de magnésium.
- ❖ chaux hydraulique provenant d'un calcaire argileux.



Photo III.1: Photo présente la chaux utilisée

III.4. Définition des sables

Le sable est le nom général de la plus petite fraction libérée lors du concassage et du criblage des granulats.

C'est une matière minérale siliceuse ou calcaire qui se présente dans le sol sous la forme des grains ou de poudre, suivant qu'il s'agit de sable grossier ou de sable fin. Les sables proviennent de la désagrégation des roches qui constituent l'écorce terrestre ; suivant leurs

compositions, ils sont blancs, jaunes, gris ou rougeâtres. Notre sable étudié est le sable de la région de Bouda qui se trouve à quelques kilomètres à l'ouest de la ville d'Adrar.

On peut encore classer les sables d'après leur origine et distinguer les sables naturels et les sables artificiels .

III.4.1. Les Sables naturels

Les sables naturels peuvent être issus des rivières. Egalement appelé « sable des rivières » ou « sable alluvionnaire », il se caractérise par sa forme arrondie et sa dureté, et il provient de l'action de l'eau sur les rochers.

Un autre type de sable naturel est le sable de carrière, extrait des sablonnières et qui ont la forme angulaire. Le sable de carrière est soit retiré du sol en masse, soit fabriqué à partir de roches extraites en carrière.

Quant au sable de mer, qui provient de roches sous-marines, il est particulièrement chargé en sel. L'utilisation de ce type de sable nécessite un rinçage minutieux et peut être à l'origine d'éventuelles efflorescences.

III.4.2. Les Sables artificiels

Les sables artificiels comprennent les sables résultant du concassage de blocs de laitier des hauts-fourneaux, le sable concassé obtenu de façon identique mais sans filler, le laitier granule ayant subi un refroidissement rapide, et le laitier broyé obtenu à partir du concassage du laitier granulé. [Mamouni 2017].

III .5 Caractérisation des mélanges (argile +chaux) et (argile +sable)

➤ La figure (III.1) définit l'organigramme représentant le travail de ce chapitre, il traite le mélange à la chaux (2%,4%,6%,8%,10%,12%) et au sable (2%,4%,6%,8%,10%,12%)

Avec notre argile d'Adrar, en donnant les caractéristiques physico-chimiques et mécaniques de ces mélanges.

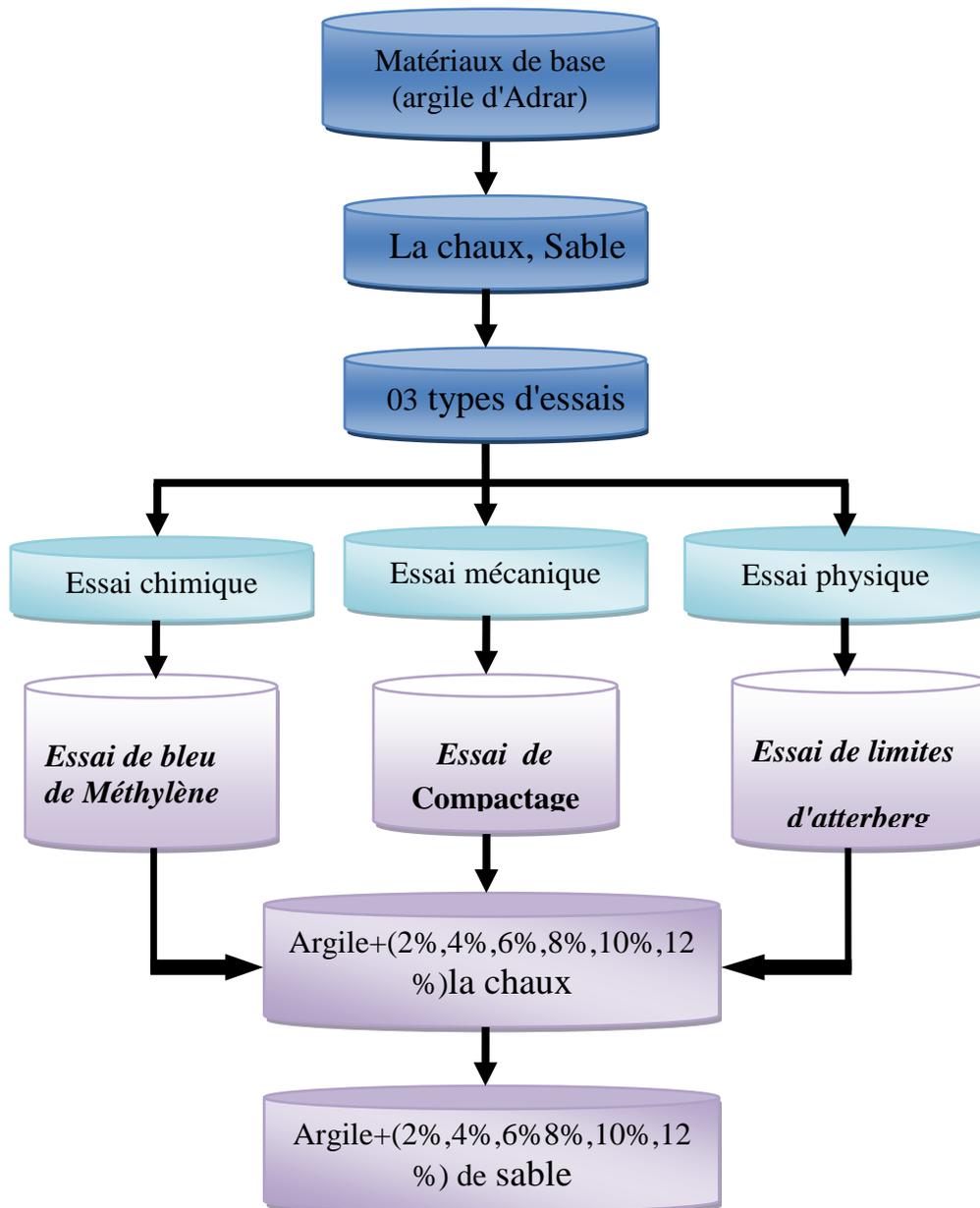


Figure III.1 : Organigramme de l'étude du traitement de l'argile d'Adrar avec la chaux et le sable

III.5.1 Caractérisation de compactage sans et avec traitement, Norme (NF P 94-093)

Le compactage des sols est une méthode de stabilisation mécanique des matériaux en place ou ramenés (remblai, route, CSD 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 :

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

La figure III .2 montre l'appareillage de l'essai proctor normal et modifié.



Figure III.2: Appareillage de l'essai proctor

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

III.5.2. 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 10kg 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 l'échantillon de l'argile et on divise en cinq parties.

- ✓ Chaque partie dans le moule est compactée à 25 coups (24 à l'extrémité et le 25^{ème} coup au milieu) en cinq couches.
- ✓ 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 (haut) de part et du bas 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 appelle « optimum proctor ».



Photos III.2: Photo présentant le mode opératoire de l'essai proctor modifié

Les résultats de l'essai sans traitement sont présentés dans le tableau suivant III.1 et la figure III.3.

Tableau III.1 : Les résultats de l'essai proctor modifié Adrar (sans traitement)

Pourcentage d'eau (%)	W (%)	γ_d (KN/m ³)
14	12,83	16,93
16	14,33	17,40
18	14,70	17,38
20	17,22	16,97

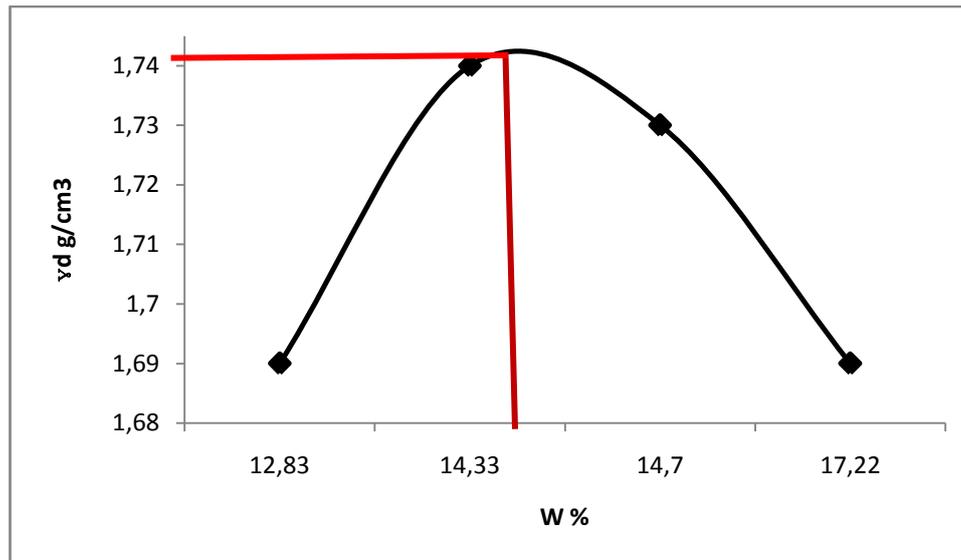


Figure III.3: Courbe proctor modifiée d'argile Adrar (sans traitement)

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 respectivement (14,33-17,40).

III.5.3. Techniques des mélanges :

Le choix des techniques de stabilisations les plus utilisées dépend de plusieurs paramètres tels que ; les considérations économiques, la nature du sol à traiter, durée de l'opération, la disponibilité des matériaux à utiliser ainsi que les conditions de l'environnement.

✓ Pour le mélange à la chaux et au sable, même mode opératoire et même principe de l'essai déjà cité ci-dessus, sauf on a traité les mélanges comme le montre le photo III.3, on mélange l'argile à la chaux ou au sable à sec après on humidifie le sol à la teneur en eau connu et on homogénéise bien le sol. Cet essai est réalisé sur les différents mélanges argile +chaux et argile +sable. Les résultats sont présentés dans les figures III.4 et III.5.

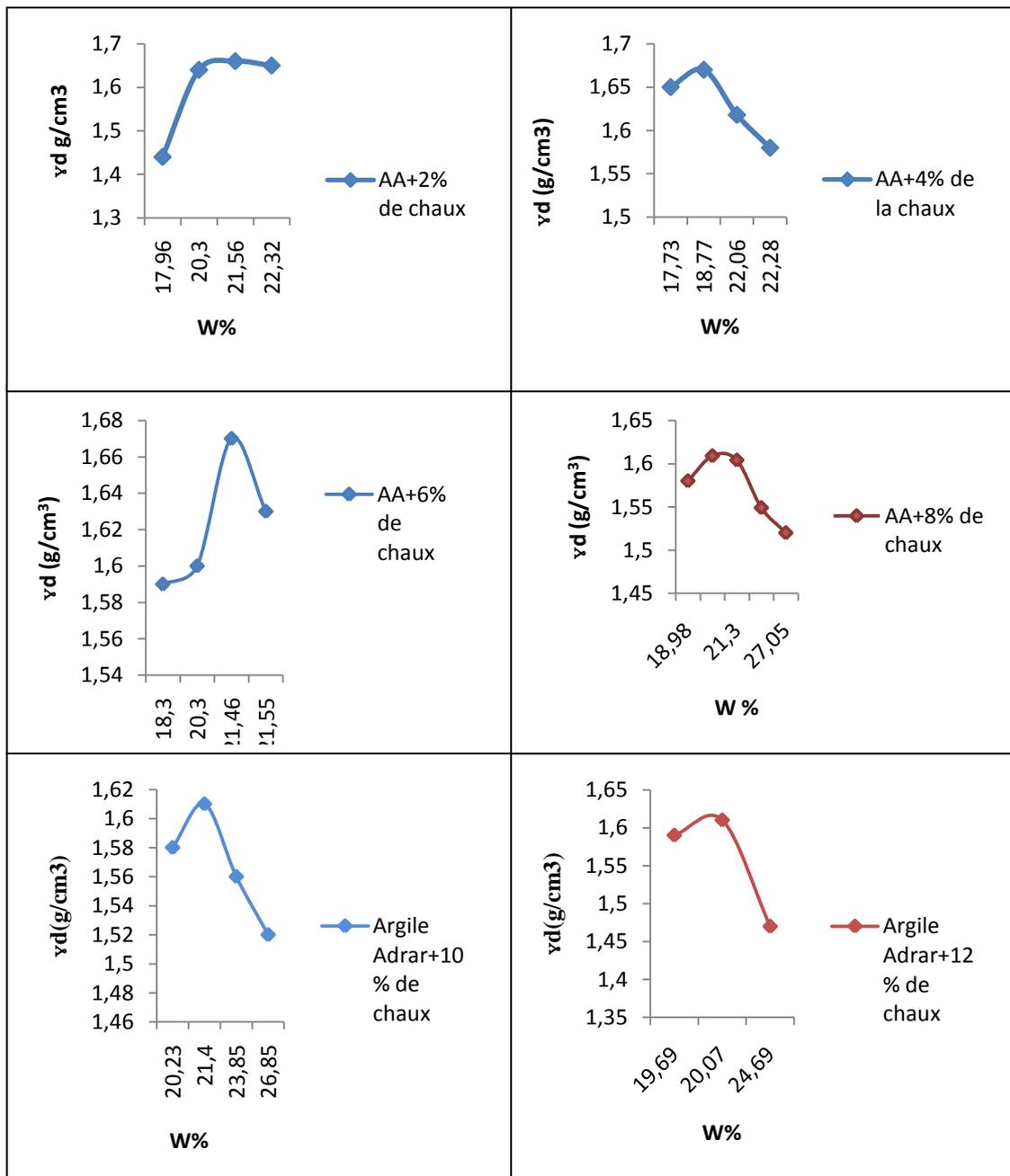


Figure III.4 : Les courbes de proctor modifier pour tous les pourcentages (argile Adrar+ chaux)

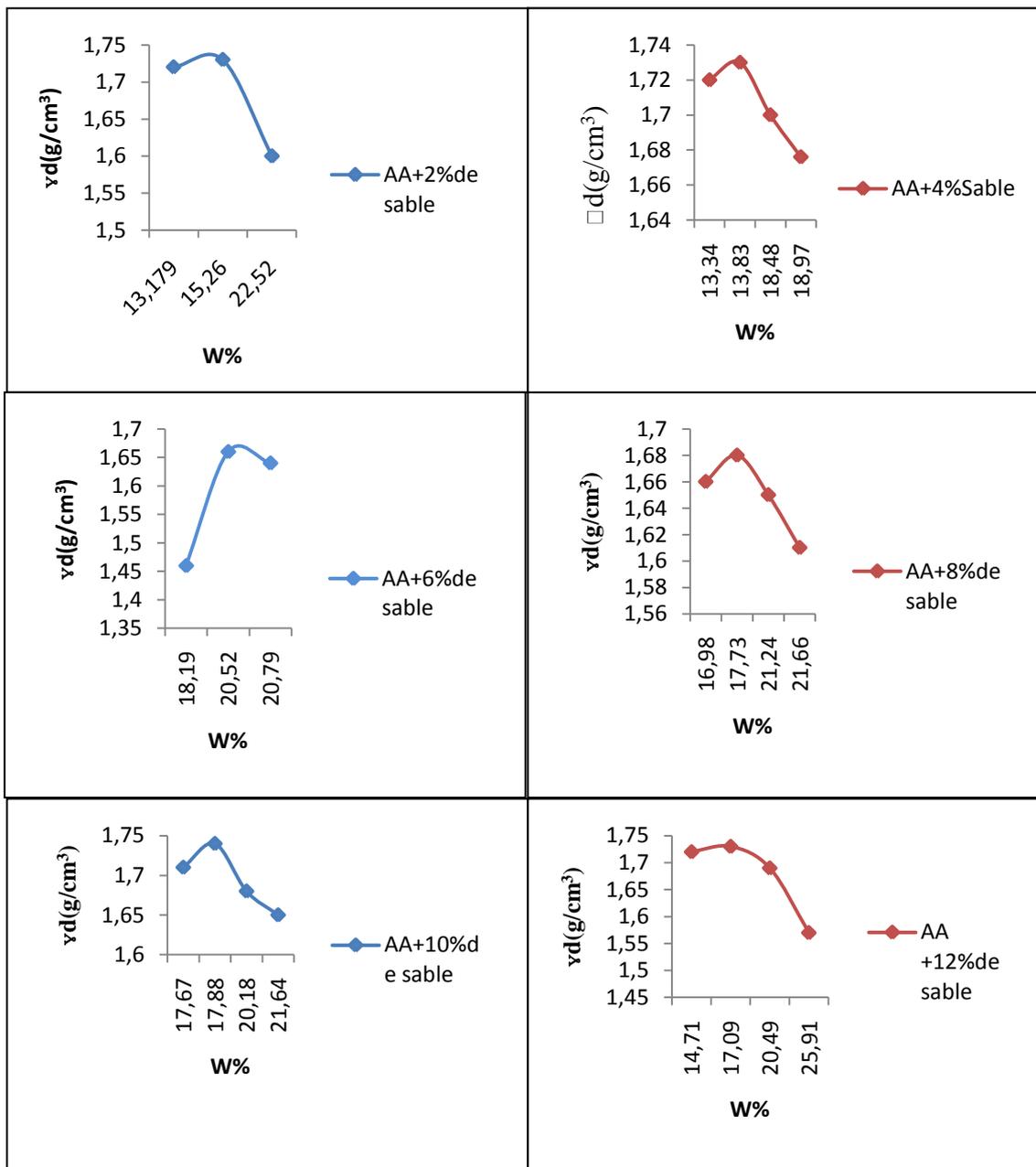


Figure III.5: Les courbes de proctor modifier pour tous les pourcentages(argile Adrar+ sable)

Pour chaque courbe de compactage, le poids volumique sec du mélange augmente avec la quantité d'eau jusqu'à un optimum sauf le (12% de chaux) pour le mélange à la chaux, contrairement au mélange au sable, on remarque que la quantité d'eau est variable et presque identique, on peut conclure que le pourcentage de sable ajouté est faible pour avoir des résultats remarquables.

Le poids volumique sec maximum et la teneur en eau optimale correspondent au sommet des courbes du compactage.

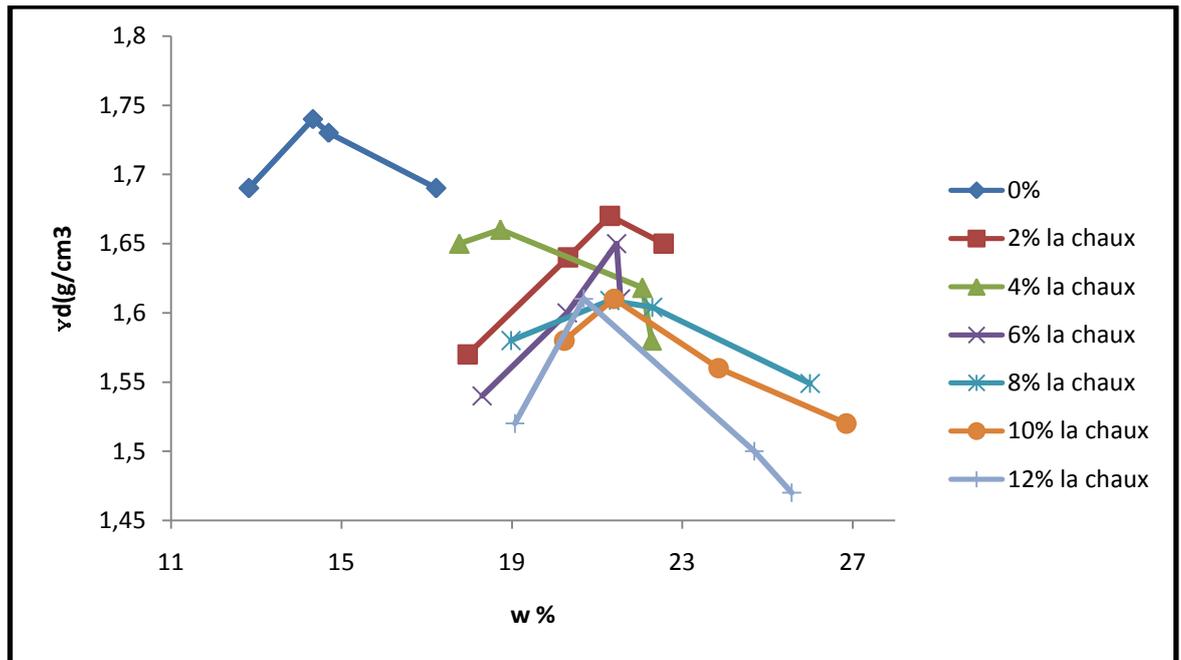


Figure III.6: Les courbes de proctor modifier pour tous les pourcentages(argile Adrar+ la chaux)

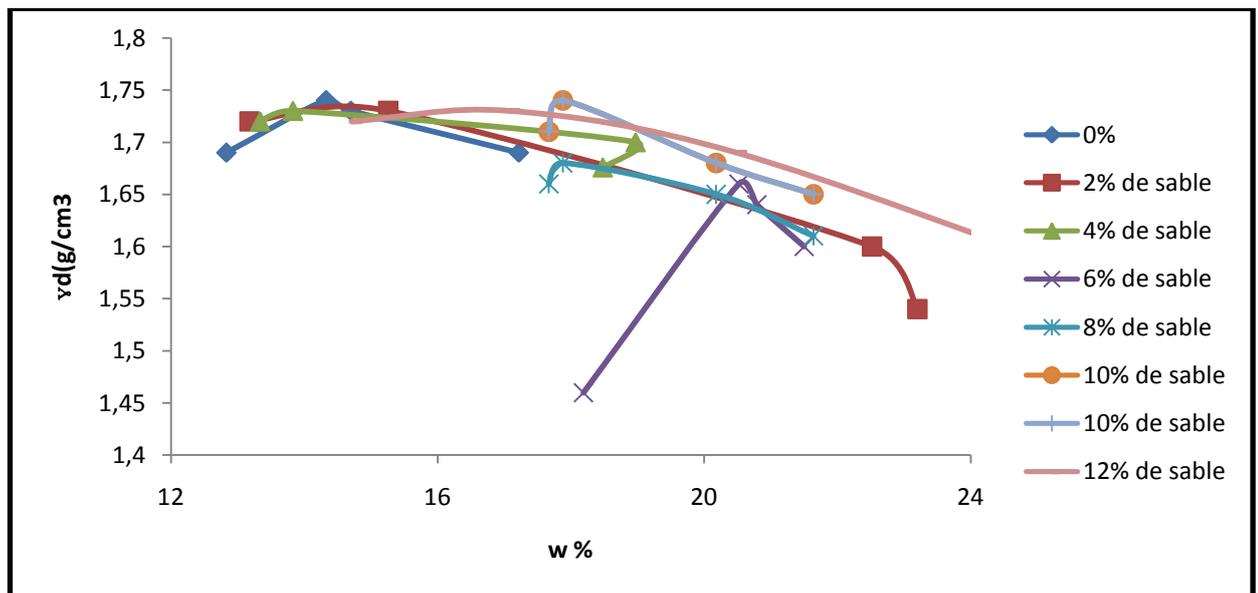


Figure III.7: Les courbes de proctor modifier pour tous les pourcentages(argile Adrar+ sable)

A partir des courbes Proctor modifié, on détermine les deux paramètres importants qui sont : le poids volumique sec maximal (γ_{dmax}) et la teneur en eau optimale (w_{opt}).

Les résultats de ces essais sont indiqués dans le tableau III.2.

Tableau.III.2. Les paramètres de l'optimum Proctor des mélanges (Argile + la chaux) et (Argile + sable)

%	Argile Adrar + La chaux		Argile Adrar+ sable	
	$\gamma_{dmax}(g/cm^3)$	$W_{opt}(\%)$	$\gamma_{dmax}(g/cm^3)$	$W_{opt}(\%)$
0%	1,74	14,33	1,74	14,33
2%	1,66	20,3	1,73	15,26
4%	1,67	18,77	1,73	13,83
6%	1,67	17,96	1,66	20,52
8%	1,60	22,3	1,68	17,73
10%	1,61	21,4	1,74	17,67
12%	1,61	19,69	1,73	14,71

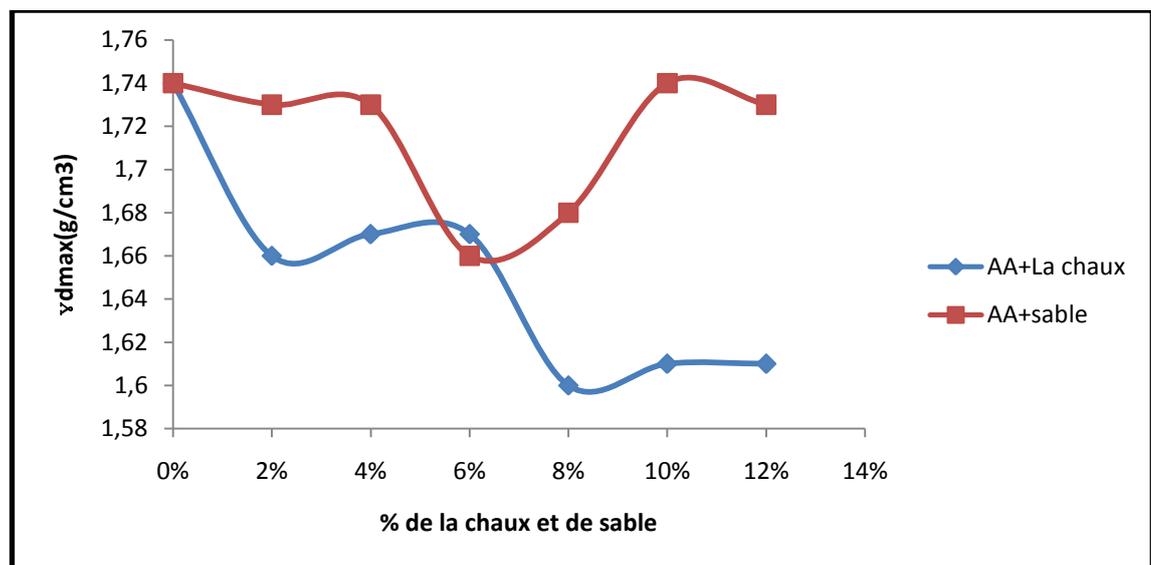


Figure III.8: L'influence de % de chaux et % de sable sur la densité sèche γ_{dmax}

D'après la figure III.8. On remarque une diminution faible de la densité sèche en fonction de % de sable (sauf 6%), par contre pour la chaux, on constate qu'on a une diminution importante de mêmes pourcentages.

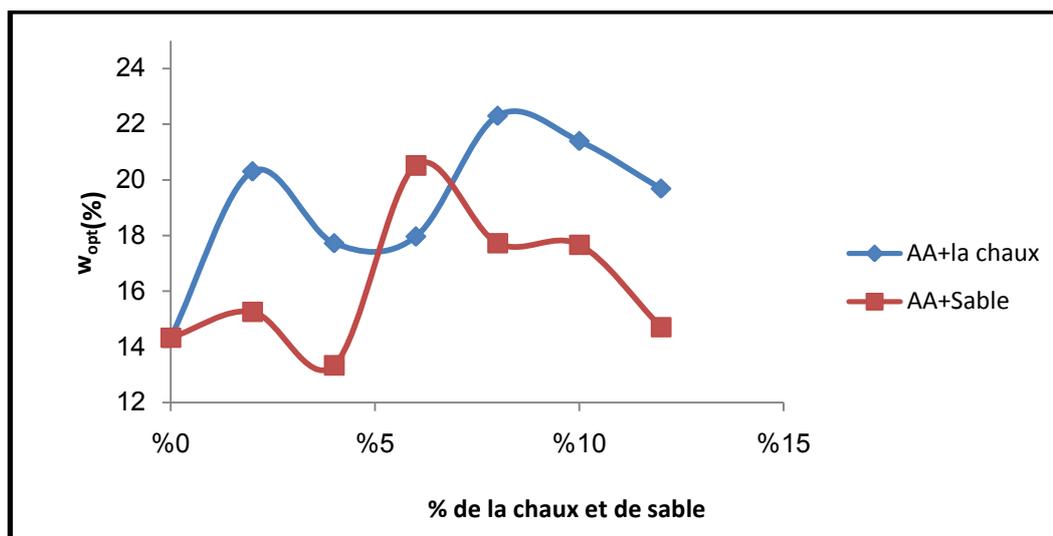


Figure III.9: L'influence de % de chaux et de % de sable sur la teneur en eau

D'après la figure III.9. On remarque qu'on a une même allure (courbe) pour la chaux et le sable, d'où les valeurs de W_{opt} de chaux sont supérieures à celle de sable, donc on peut conclure que l'ajout de la chaux a demandé une quantité d'eau supérieure à l'ajout de sable.

III.6. Essai au bleu de méthylène à la tache (NF P 94-068) du mélange à la chaux

Le même principe que l'essai déjà cité dans le chapitre II

III.6.1 Calculs et résultats

L'essai est réalisé selon la norme (NF P 94-068) et consiste à déterminer la quantité de bleu de méthylène nécessaire pour recouvrir d'une couche monomoléculaire la surface des particules d'un matériau en suspension dans l'eau.

La capacité d'adsorption du matériau est déterminée à l'aide du test de la tache. Ce dernier consiste à former avec une goutte de la suspension sur du papier filtre normalisé, une tache qui est le dépôt de sol coloré en bleu, entouré d'une zone humide en général incolore.

L'excès de bleu se traduit par l'apparition dans cette zone d'une auréole d'un bleu clair. Le test est alors positif. [Gueddouda 2011]

Dans cet essai on a calculé la valeur de bleu de l'argile d'Adrar avec les différents pourcentages de la chaux (8%, 10%, 12%) ; les résultats de VB de l'argile Adrar avec les pourcentages de chaux (2%, 4%, 6%) on les prend de mémoire Mellouki et Souidi.

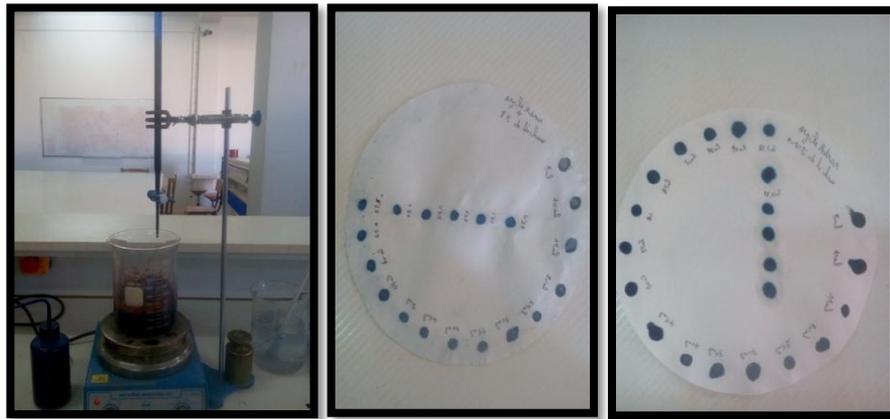


Photo III.3. Photos présentant les résultats de l'essai de bleu de méthylène pour dosage 2,4,6,8%,10% et12% de chaux de l'argile d'Adrar.

La surface spécifique des sols fins est un paramètre fondamental pour l'identification indirecte des minéraux existants. Dans la synthèse bibliographique, et d'après plusieurs auteurs, plus le sol est fin, plus sa surface spécifique est importante. Les résultats sont traduits dans le tableau III.3, et la classification est représentée dans le tableau III.4

Tableau III.3:Tableau récapitulatif des résultats de l'essai de bleu de méthylène des mélange à la chaux

Pourcentage de Chaux	Argile Adrar	
	SST	VB
0%	199,5	9,5
2%	157,5	7,5
4%	157,5	7,5
6%	147	7
8%	147	7
10%	141,75	6,75
12%	141,75	6,75

Tableau III.4: Classification des résultats de l'essai de bleu de méthylène des mélanges à la chaux

Type d'argile Adrar		
Argile Sans Traitement	Valeur de VB	9,5
	Classification	Sol très argileux
Argile + (2%,4%) de la chaux	Valeur de VB	7,5
	Classification	Sol argileux
Argile + (6%,8%) de la chaux	Valeur de VB	7
	Classification	Sol argileux
Argile + (10%,12%)	Valeur de Blue VB	6,75
	Classification	Sol argileux

D'après les résultats de tableau on peut dire que :

Les valeurs de bleu pour les pourcentages de la chaux (2%,4%) sont données les mêmes résultats $VB=7,5$

$6 \leq VB = 7,5 < 8$ donc est un sol argileux.

Les valeurs de bleu pour les pourcentages de chaux (6%,8%) sont aussi égales $VB=7$

$6 \leq V_B=7 < 8$ donc est un sol argileux.

Les valeurs de bleu pour les pourcentages de chaux (10%,12%) sont aussi égales $VB=6,75$
 $6,756 \leq V_B=6,75 < 8$ donc est un sol argileux.

III.7. Limites d'Atterberg du mélange à la chaux

Le même principe que l'essai déjà cité dans le chapitre II

Tableau III.5: Résultats de limite d'Atterberg d'argile Adrar+ la chaux

% de la chaux	W_L	W_P	I_P
0%	70	25,49	44,51
2%	88	50	38
4%	54	39,26	14,74
6%	90	72	18
8%	74	67,5	6,5
10%	62	52,77	9,23
12%	54,7	50	4,7

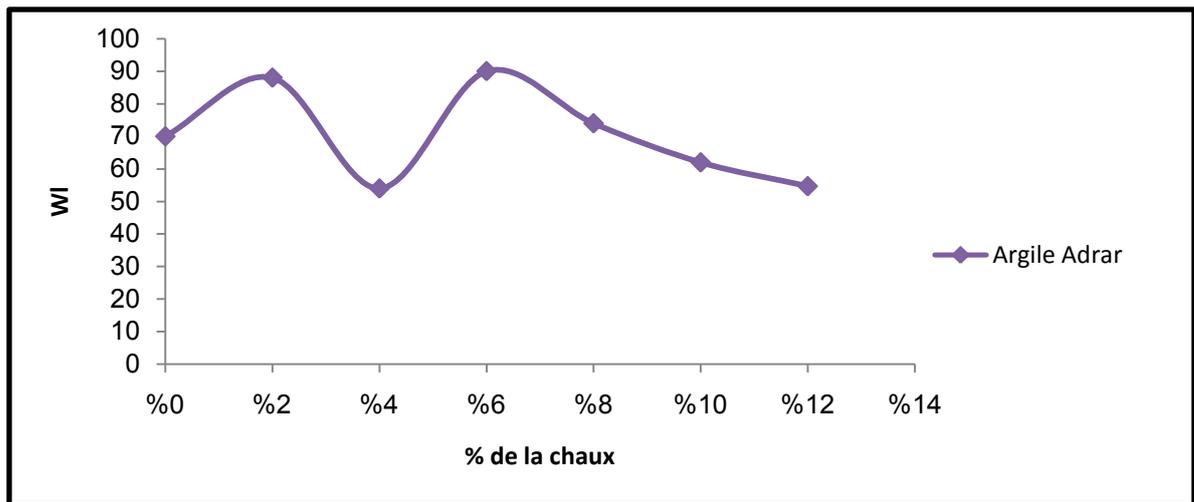


Figure III.10:Influence de % de la chaux sur la limite de liquidité .

D'après la figure III.10. On remarque une augmentation de limite de liquidité en fonction de l'ajout de chaux de 0% à 2%, puis une diminution à 4%, après elle augmente pour 6%, puis elle diminue faiblement pour les pourcentages 8%, 10% et 12%.

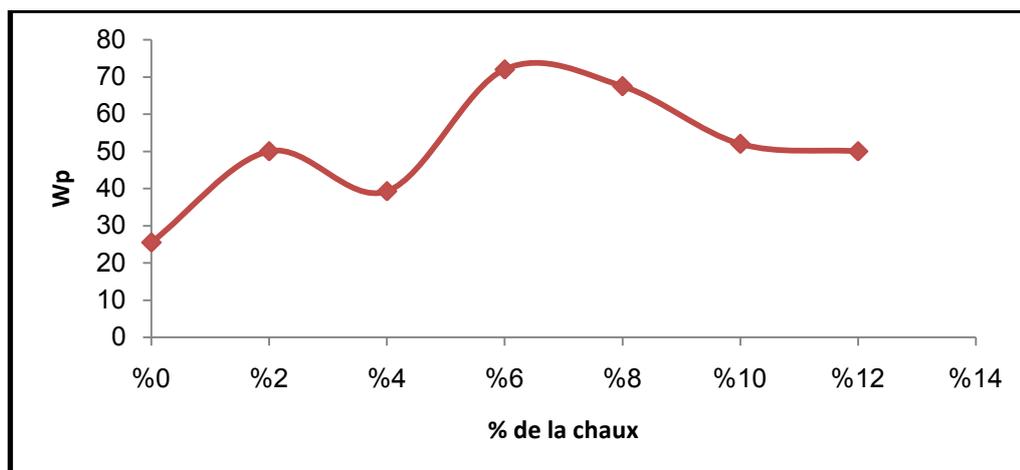


Figure III.11 :Influence de % de chaux sur la limite de plasticité .

D'après la figure III.11. On remarque une augmentation de limite de plasticité en fonction de pourcentage de chaux de 0% à 2%, puis une diminution pour 4%, après elle augmente fortement pour 6%, puis il y a une diminution pour les pourcentages élevés 8%, 10% et 12%.

Pour l'indice de plasticité, et par définition, il représente la différence entre la limite de liquidité et la limite de plasticité, nous avons calculé cet indice pour les différents mélanges argile+chaux. Les résultats sont représentés graphiquement sur la figure III.14.

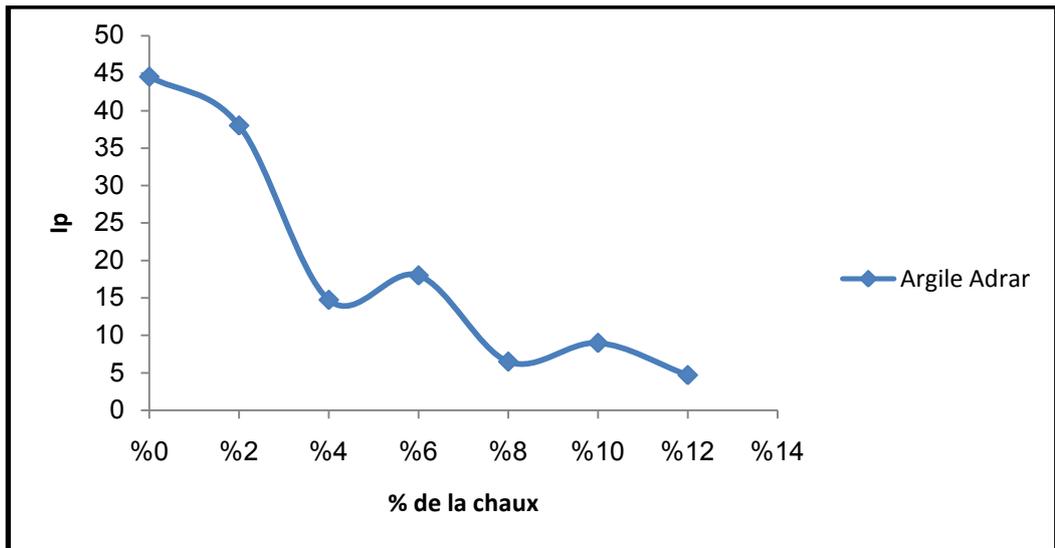


Figure III.12 : Influence de % de chaux sur l'indice de plasticité .

D'après la figure III.12 on observe que l'indice de plasticité «IP » diminue fortement avec la quantité de chaux ajoutée jusqu'à 4 %, puis augmente plus faiblement à 6% avant de se stabiliser pour des pourcentages plus élevés (8%,10%,12%).

Enfin on conclure que plus le pourcentage de chaux augmente plus la limite de liquidité et l'indice de plasticité diminue la limite plasticité augmente sauf, le point de 4% donne des valeurs exceptionnelles.

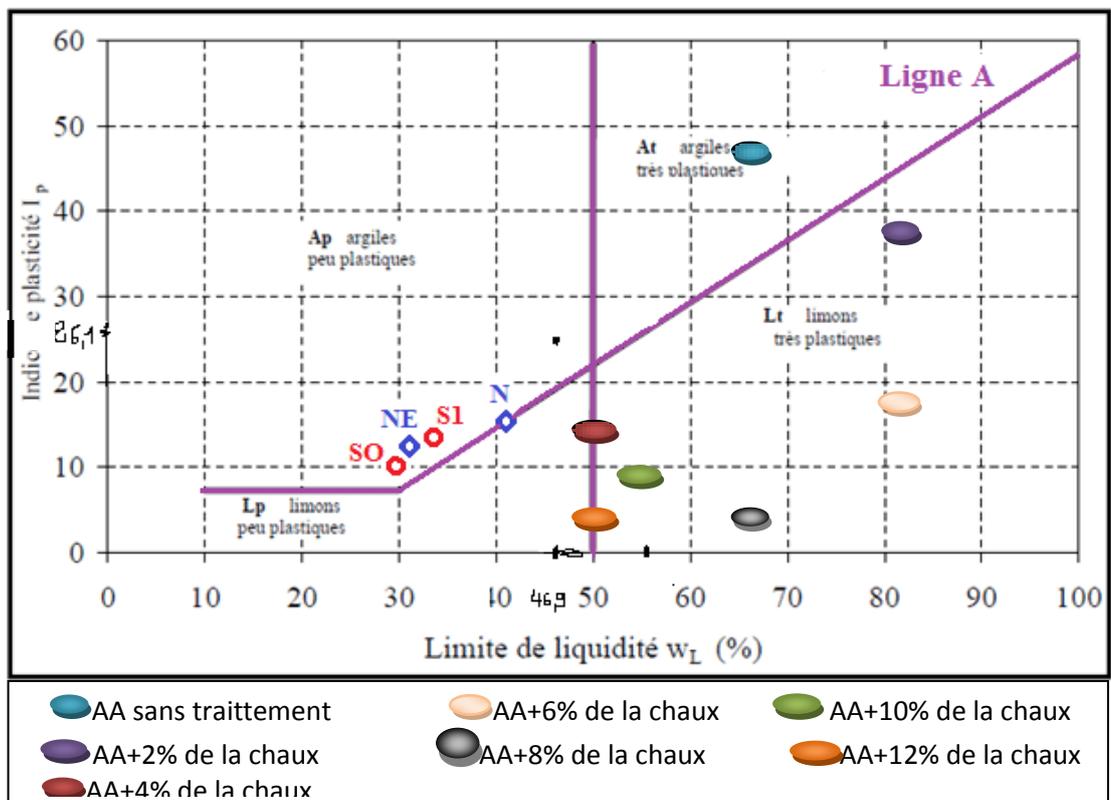


Figure III.13 : Abaque de plasticité de Casagrande selon la classification L.C.P.C des sols fins

D'après classification des sols dans l'abaque de plasticité (*Abaque de Casagrande*), on peut conclure que l'ajout de la chaux sur notre sol a changé la plasticité de l'argile très plastique à limons très plastique (l'ajout de la chaux fait une rugosité sur l'argile (figure III.13)

III.8. Conclusion

Les méthodes d'amélioration et de renforcement de l'argile avec des pourcentages de chaux 2, 4, 6, 8,10 et 12 % ont donné des 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 diminution remarquable du poids volumique sec optimal. en fonction du pourcentage de chaux à ajouter.

Pour le mélange au sable les résultats de l'optimum de Proctor ont donné des résultats non remarquable il faut augmenter le pourcentage de sable à ajoutée.

La classification chimique de notre sol nous permet de conclure que plus le pourcentage de la chaux est augment, plus la valeur de bleu est diminuer.

Dans ce qui suit on va traité les essais oedométriques en se basant sur les optimums de proctor avec les quelles on calcul les paramètres de gonflement pour tous les pourcentages.

L'essai au bleu méthylène a donné des résultats

Chapitre IV

Etude du comportement mécanique de l'argile stabilisé

IV .1 Introduction :

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.

Plusieurs travaux ont été effectués sur l'utilisation de la chaux et du sable comme stabilisant. Ces travaux de recherche montrent que la chaux et le sable ont un rôle positif sur la réduction des paramètres du gonflement.

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

VI.2. Etude du phénomène de gonflement de l'argile :

Du tableau II.21 du chapitre II, nous pouvons dire que notre argile a un pouvoir de gonflement important qu'il faut étudier.

IV 2.1. Définitions

Gonflement libre : Le gonflement libre est mesuré à l'odmètre sur un échantillon soumis au seul poids du piston, mis en contact avec un réservoir d'eau à charge nulle. La variation de hauteur du piston est mesurée en fonction du temps jusqu'à ce qu'elle se stabilise. La valeur finale du gonflement, après stabilisation, permet de calculer la variation relative de volume de l'échantillon, notée G , que l'on exprime en pourcentage.

Indice de gonflement (C_g) : Qui traduit l'importance de la déformation de gonflement induit par un déchargement par rapport un état de contraintes donné, il est défini par la pente de la courbe

$e = f(\log \sigma)$ obtenue en déchargement lors d'un essai œdométrique classique, il est comparé à l'indice de compression (C_c).

Pression de gonflement: définie de plusieurs façons dont:

- La pression nécessaire pour maintenir un échantillon de sol à un volume constant lorsque celui-ci est soumis à humidification.
- La pression nécessaire pour ramener un échantillon de sol, soumis à l'humidification et ayant complètement gonflé, à son volume avant gonflement.

IV.2.2 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 ($\gamma_{d_{opt}}$ 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 œdométrique.

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 en calcul le gonflement.

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

$$G\% = (H_f / H_0) * 100 \quad \text{IV.1}$$

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).

IV 2.2.1 Influence de la chaux sur le potentiel de gonflement :

Les résultats des potentiels de gonflement de l'argile stabilisée par la chaux sont présentés sur la figure IV.1. Cette figure présente les différents pourcentages de réduction du potentiel de gonflement en fonction du temps des pourcentages de la chaux.

Cette réduction du potentiel de gonflement est donnée par la relation suivante [Moulay Omar H 2008]:

$$\frac{\Delta G}{G} = \frac{G_0\% - G_p\%}{G_0\%} \quad \text{IV.2}$$

Avec : G_0 gonflement de l'argile sans ajout.

G_p gonflement de l'argile + ajout à un pourcentage

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

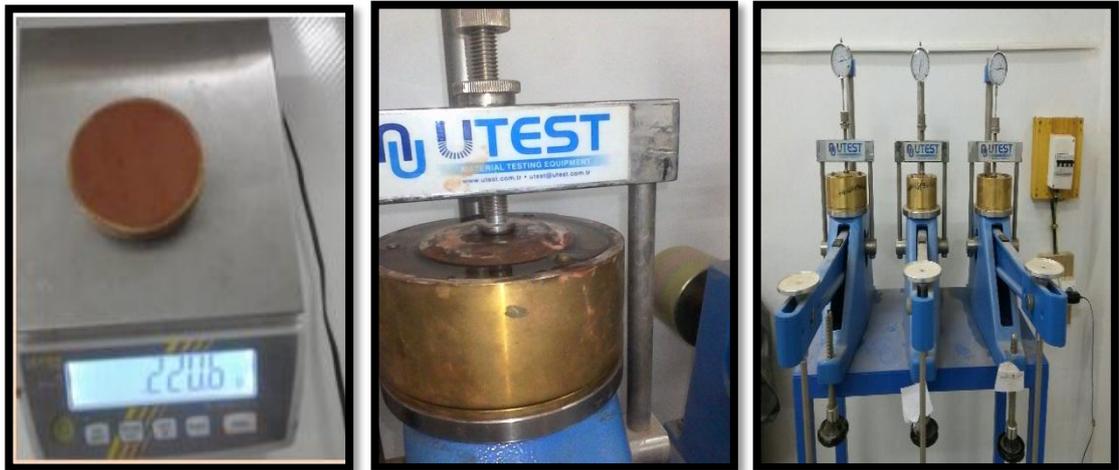


Photo IV.1 : Appareillage de l'essai œdométrique de gonflement.

Les essais utilisés pour mesurer le potentiel du gonflement sont les mêmes que ceux appliqués pour mesurer le gonflement libre pour l'argile non traité.

Les résultats des essais sont résumés dans le tableau IV.1 et montrés sur les courbes de la figure IV.1.

TableauIV.1 : Résultats de l'essai œdométrique de gonflement de chaux

Argile d'Adrar		
A + % C	G%(A + % C)	($\Delta G/G$) %
A	29.7	/
A + 2% C	26.05	12.45
A + 4% C	28.52	3.97
A + 6% C	28.8	3.03
A + 8% C	20.5	19.36
A+10%C	23.95	30.97
A+12% C	19.25	35.18

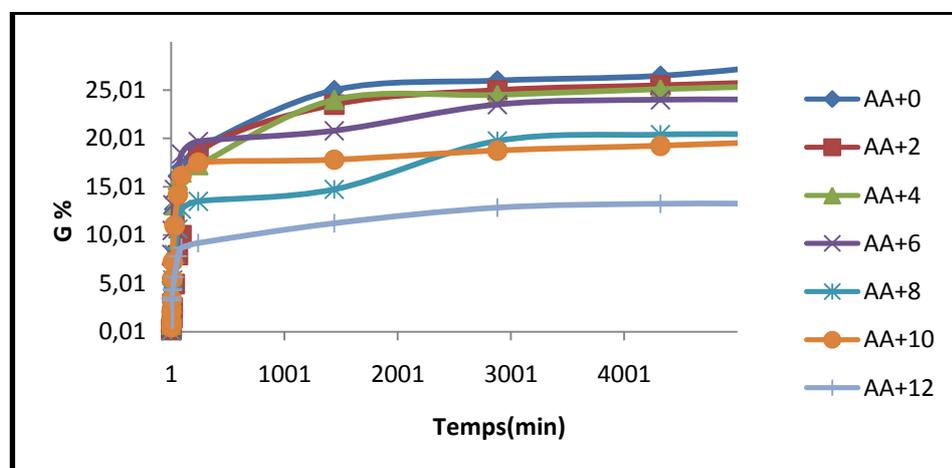


Figure IV.1 : Evolution du potentiel de gonflement libre en fonction du temps pour les mélanges Argile Adrar+chaux

La figure IV.1 montre la représentation graphique de l'évolution du taux de gonflement en fonction de temps pour les mélanges argiles-chaux. L'évolution de gonflement dans le temps est la même pour tous les mélanges. Cependant, plus le pourcentage de la chaux augmente, plus le potentiel de gonflement diminue, les pourcentages 2%.4%.6%.8%,10%.12% sont inférieurs à celui de sans traitement..

IV 2.2.2 Influence du sable sur le potentiel de gonflement :

Les résultats des essais sont résumés dans le tableau IV.2 et montrés sur la figure IV.2.

Tableau IV.2 : Résultats de l'essai œdométrique de gonflement de sable

Argile d'Adrar		
A + % S	G% (A + % S)	($\Delta G/G$) %
A	29.7	/
A + 2% S	25.2	15.15
A + 4% S	21.55	27.44
A + 6% S	20.5	19.19
A + 8% S	23.5	21.88
A+10%S	24	31.64
A+12% S	20.1	32.32

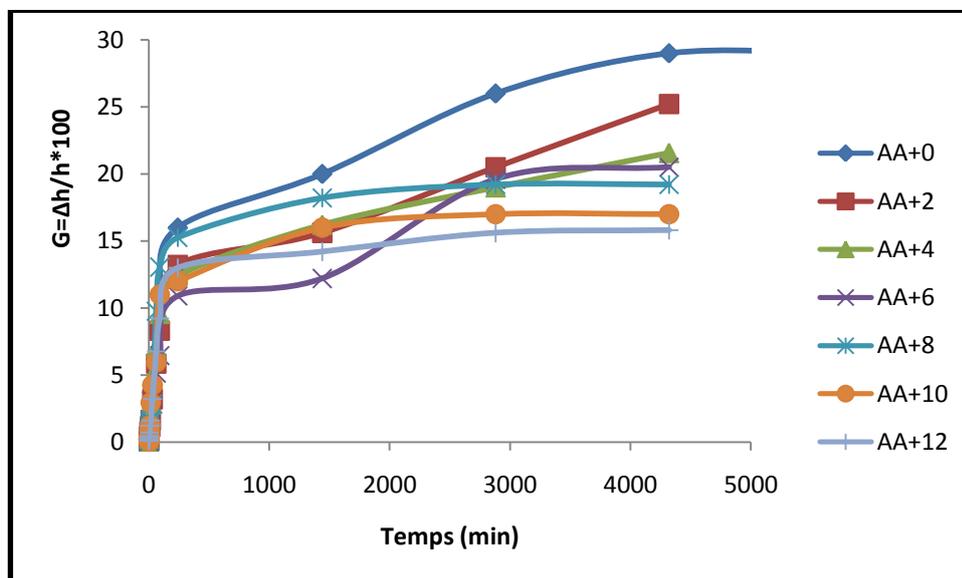


Figure IV.2: Evolution du potentiel de gonflement libre en fonction du temps pour les mélanges Argile Adrar+chaux

Les courbes montrant l'évolution du gonflement libre en fonction des pourcentages de chaux et du sable sont présentées sur la figure IV.3.

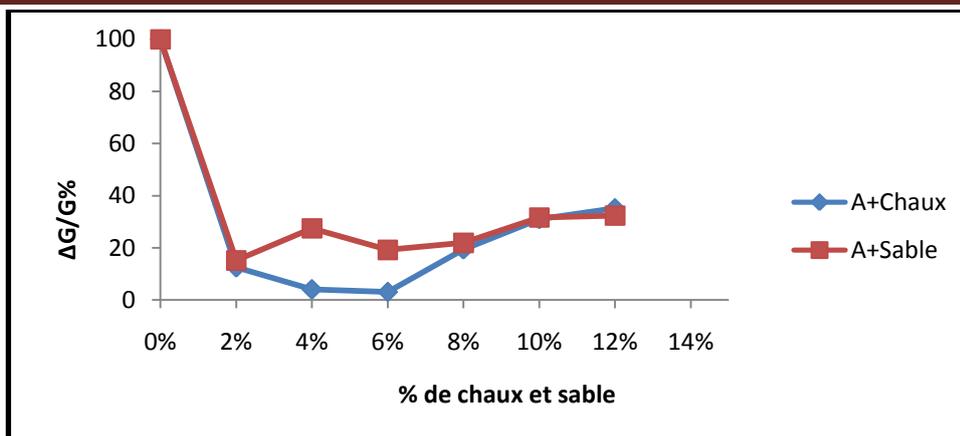


Figure IV.3: Evolution de gonflement libre en fonction des pourcentages de chaux

Commentaire

- La chaux et le sable diminuent le potentiel du gonflement ; cette diminution est proportionnelle aux pourcentages ajoutés de chaux et du sable.
- A un faible pourcentage 2% de chaux et du sable la réduction de gonflement est presque pareille.
- Aux pourcentages 4% et 6% de la chaux les réductions de gonflement ont été inférieures aux celles de sable.
- A un fort pourcentage (12% chaux) ; la réduction en gonflement est environ 35.18% du gonflement total, tandis qu'à 12% sable la réduction en gonflement est de l'ordre de 32.32%.

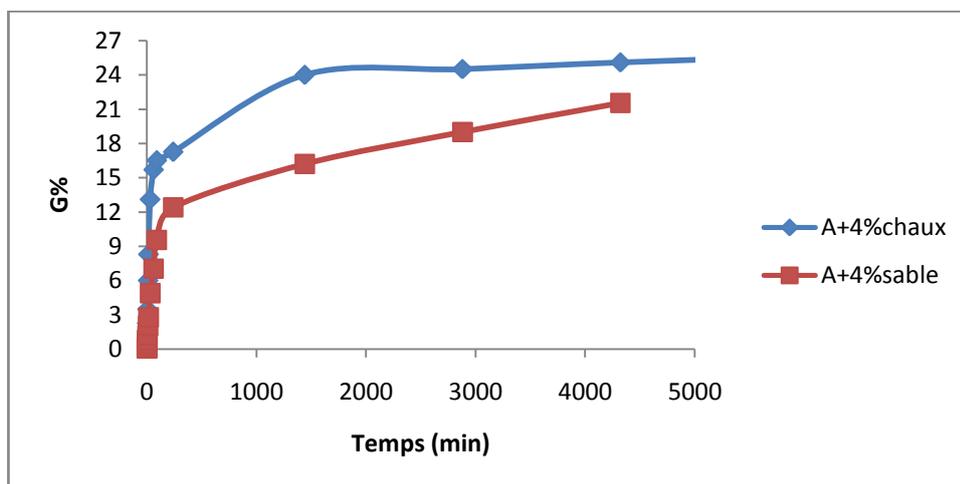


Figure IV.4 : Evolution du potentiel de gonflement libre en fonction du temps pour les mélanges de 4% chaux et de sable

La figure IV 4 montrant l'évolution du gonflement libre en fonction des pourcentages de chaux et du sable pour 4% (par exemple) ; des courbes on peut conclure qu' on la allure des deux mélange, et que l'argile d'Adrar a des valeurs supérieures que celle du sable.

. Cette étude sera poursuivie par des essais de mesures de pression de gonflement de calcul de C_c , de C_g de C_v et de K .

IV.2.6 Pression de gonflement : définie de plusieurs façons dont

- La pression nécessaire pour maintenir un échantillon de sol à un volume constant lorsque celui-ci est soumis à humidification.
- La pression nécessaire pour ramener un échantillon de sol, soumis à humidification et ayant complètement gonflé, à son volume avant gonflement

La méthode utilisés pour mesurer la pression de gonflement et celle du volume constant, les échantillons ont été préparés de la même procédure que pour la mesure le gonflement libre. Les résultats des essais sont montrés dans le tableau IV.3 et la figure IV.5.

Avec: $P_g = P/S = 10F/$ **IV. 3**

$$\frac{\Delta P_g}{P_g} = \frac{P_{g0\%} - P_{gp\%}}{P_{g0\%}} \quad \text{IV. 4}$$

Tableau IV.3 : Variation de la pression de gonflement en fonction de pourcentage de chaux.

Argile d'Adrar		
A + % C	$P_g(\text{bar}) (A + \% C)$	$(\Delta P_g/P_g) \%$
A	10	/
A + 2% C	7.5	25
A + 4% C	6.5	35
A + 6% C	6	40
A + 8% C	5	50
A+10% C	1.612	83.8
A+12% C	3.5	65

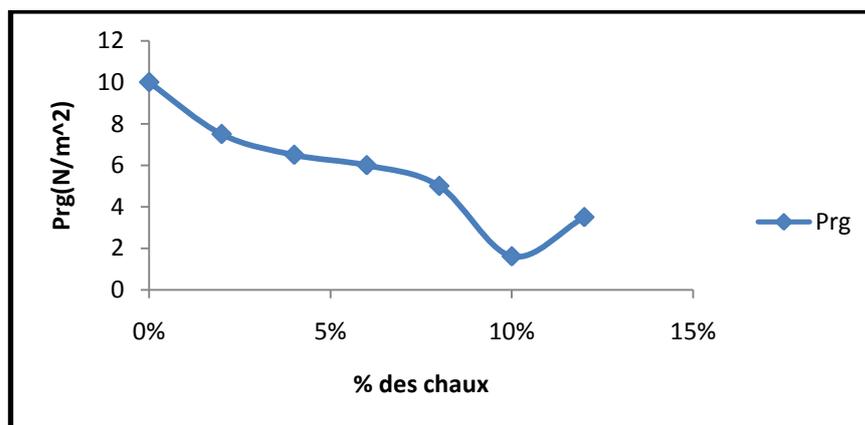


Figure IV.5 : Evolution de la pression gonflement en fonction des pourcentages de la chaux

La diminution de la pression de gonflement est proportionnelle aux pourcentages de chaux, sauf à 10% chaux la réduction de la pression de gonflement est de 83.8%, qui est une valeur importante.

IV.3.1 Essai de compressibilité oedométrique

L'essai de compression oedométrique est un essai fondamental et est une application directe de la théorie de la consolidation. Il permet d'évaluer l'amplitude des tassements des ouvrages ainsi que leurs évolutions.

Il s'agit de l'essai de compressibilité par paliers, cet essai permet d'établir pour un échantillon donné, deux types de courbes :

La courbe de compressibilité qui indique le tassement de l'échantillon en fonction du logarithme de la contrainte appliquée.

La courbe de compressibilité, qui indique le tassement de l'échantillon en fonction du temps sous l'application d'une contrainte constante.

Dans ce qui suit, nous allons nous intéresser aux paramètres oedométriques appropriés aux sols fins à caractère gonflant, et qui sont C_c et C_g suivant la figure IV.6



Photo IV.2 : Photo présentant le mode opératoire de l'essai de compressibilité oedométrique

IV.3.1.1. Le coefficient de gonflement C_g : (tableau IV.5) :

qui est la pente de la courbe de déchargement.

IV.3.1.2. L'indice de compressibilité C_c (tableau IV.5) :

qui est la pente de la courbe de la tangente à la courbe de chargement, ce coefficient permet de préciser la sensibilité du sol au tassement le long de cette courbe.

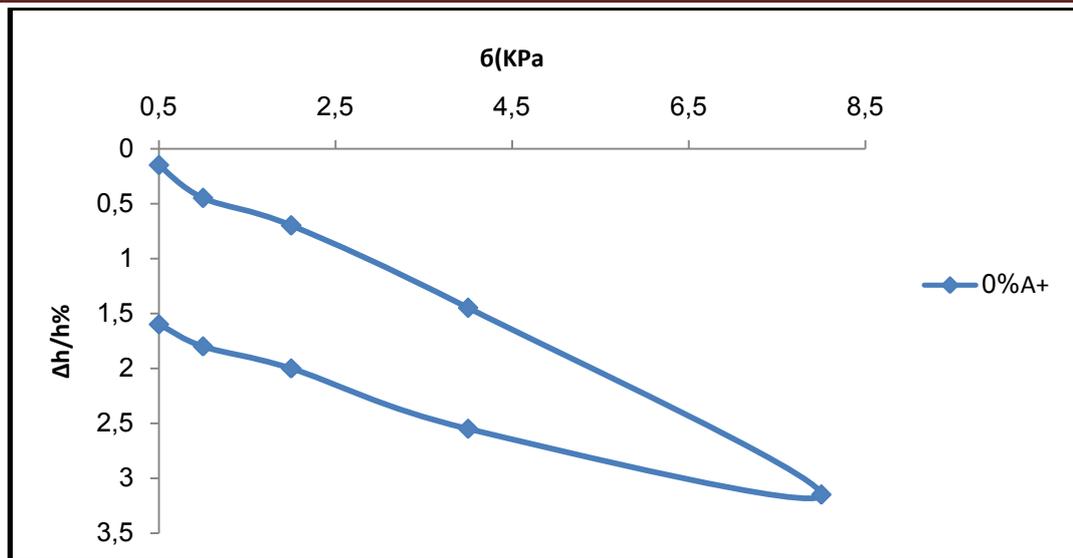


Figure IV.6 : Courbe œdométrique de notre argile

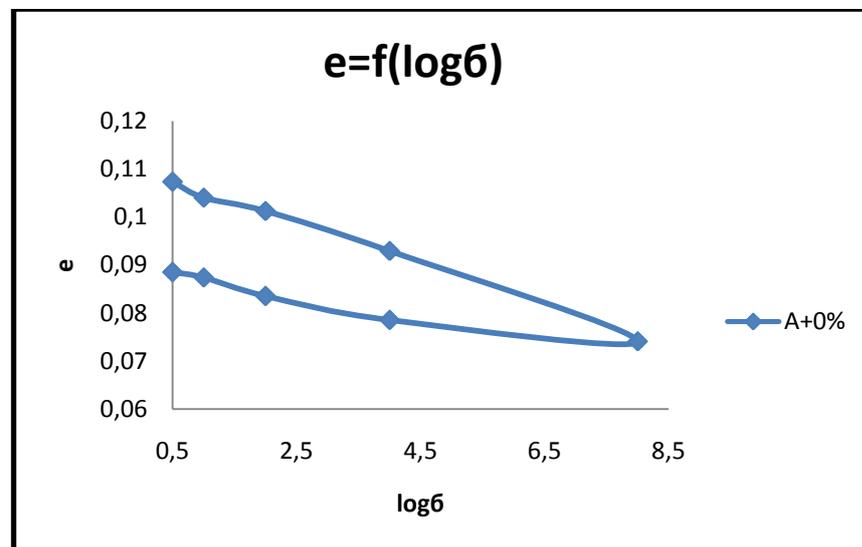


Figure IV.7: Courbe module œdométrique de notre argile

Tableau IV. 4: Classement des module oedometrique en fonction de nature des sols.[In Mellouki et Soudi]

Sol	Sable	A Kaolinite	A Illite	A Montmorillonite
E'(bars)	100à300	15à100	10à15	1a10

A partir des figures IV.6 et IV.7, on peut calculer le module oedométrique.

On a: $E' = - \Delta\sigma / \Delta h/h$ IV. 5

Les valeurs de E' sont montrées dans le tableau IV.5.

Tableau IV.5 : Les résultats de l'essai œdométrique de l'argile d'Adrar

Paramètres	Cc=-Δe/Δlogσ	Cg=-Δe/Δlogσ	E'(bars)	e0	Cc/1+ e0
Argile	0,628	0,0147	2,24	0,760	0,376

Suivant la valeur de E' on peut classer notre sol dans la classe des argiles Montmoriollite

Tableau IV.6 : Compressibilité des sols.[Mellouki Soudi 2017]

$C_c/(1+e_0) < 0.015$	Sol incompressible
$0.015 < C_c/(1+e_0) < 0.05$	Sol peu incompressible
$0.05 < C_c/(1+e_0) < 0.2$	Sol moyennement incompressible
$C_c/(1+e_0) > 0.2$	Sol très incompressible

On a déduire la compressibilité du sol en fonction du rapport $C_c / 1 + e_0$ (voir Tableau IV.5.6). Notre argile est un sol très incompressible.

IV .3.2 Coefficient de consolidation C_v :

Le coefficient de consolidation C_v est un paramètre très important pour l'estimation de la conductivité hydraulique, il est fonction de la hauteur de l'échantillon H_0 et $\sqrt{t_{90}}$ (méthode de Taylor et Casagrande). Sa valeur est donnée par l'expression suivante:

$$C_v = 0,848 * H_0^2 / t_9 \quad \text{IV. 6}$$

$$C_v = (0,197 * H_0^2) / t_{50} \quad \text{IV. 7}$$

H_0 : hauteur de l'échantillon ($H_0 = 0,02 \text{ m}$)

La figure IV.8 présente les deux méthodes de Taylor et de Casagrande pour la détermination du coefficient de consolidation C_v .

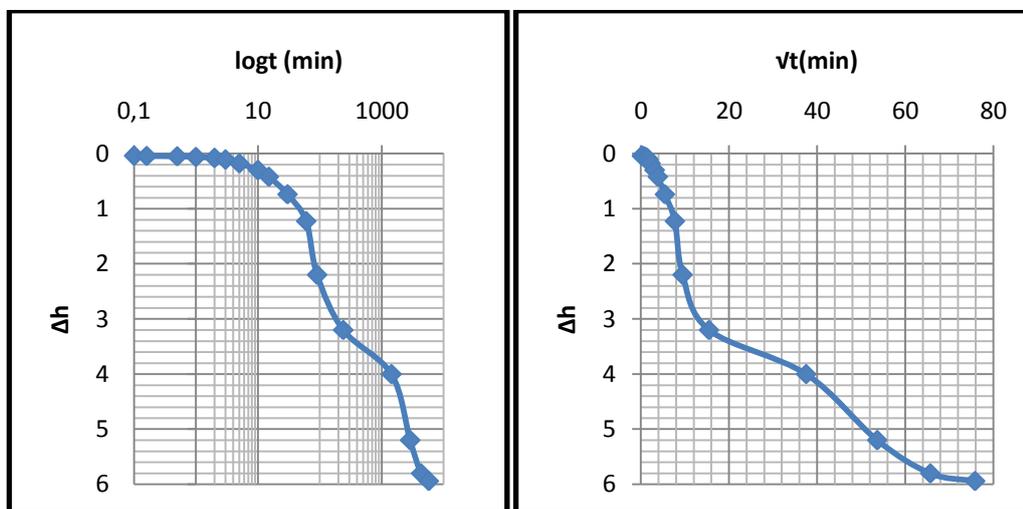


Figure IV.8: Courbes des tassements en fonction du temps

Le tableau IV.7 nous montre les valeurs de C_v pour les différents sols.

Tableau IV.7 : Classement des valeurs de C_v en fonction de la nature des sols.[In Mellouki et Soudi]

sole	kaolinite	Illite	montmoillnite	Argilesableseus
$C_v(\text{cm}^2/\text{s})$	$4 * 10^{-3}$ à $2 * 10^{-3}$	$2 * 10^{-3}$ à $1 * 10^{-3}$	10^{-3} à $0.2 * 10^{-3}$	10^{-3} enerson

Tableau IV.8:Résultat des valeurs de Cv

Cv(cm ² /s)	Taylor	Casagrande
Argile A	2,15*10 ⁻³	2,25*10 ⁻³

On a déduire la coefficient de consolidation Cv du sol (voir Tableau IV.8). Notre argile est classer dans la classe des Kaolinite

IV. 3.3 Coefficient de perméabilité K :

Par la suite la valeur du coefficient de perméabilité de notre argile est calculée par la formule suivante :

$$Cv = k E' \gamma_w / w \quad \text{IV. 8 ;}$$

$$d'où : k = Cv \cdot \gamma_w / E' \quad \text{IV. 9.}$$

Tableau IV.9:Résultat des valeurs de K

K(m/s)	Taylor	Casagrande
Argile	9,41*10 ⁻⁹	9,85*10 ⁻⁹

Donc on peut conclure que notre argile est très imperméable

IV.4. Conclusion

Ce chapitre nous a permis de déterminer la caractérisation mécanique de l'argile. Dans les essais oedométriques, on a mesuré directement le gonflement libre, la pression de gonflement, des essais de stabilisation avec différents pourcentage de la chaux et du sable ; et déterminer les valeurs de Cc, Cg, E' (module oedométrique) et la valeur de Cc/1 + e₀ qui nous renseigne sur la compressibilité du sol.

Il a été aussi calculé la valeur de Cv (coefficient de consolidation) et le coefficient de perméabilité K qui peut nous renseigner sur la nature de l'argile étudié.

Les résultats obtenus sur l'ajout de chaux montrent que le traitement des sols au chaux peut constituer une solution à envisager.

Cette étude sera poursuivie par des essais de traitement de l'influence de chaux sur les paramètres de gonflement a différents pourcentage de chaux et du sable (2.4.6.8.10.12).

Ces axes de recherche seront étudiés au niveau de chapitre V

Chapitre V

Étude de l'influence de la chaux sur les paramètres mécaniques

V.1 Introduction

Dans ce chapitre, on entame le suivi des essais oedométriques de l'argile d'Adrar qui permettent d'étudier l'influence de la chaux sur les paramètres mécaniques tel que l'indice des vides e_0 , le coefficient de gonflement C_g , l'indice de compression C_c , le module oedométrique E' , le coefficient de consolidation C_v et le coefficient de perméabilité K .

V.2 Etude de l'influence de la chaux sur les paramètres mécaniques de l'argile d'Adrar

V.2.1 L'indice des vides e_0

Les résultats de l'indice des vides pour les différents pourcentages de la chaux sont résumés dans tableau V.1. La variation de l'indice des vides initial des mélanges en fonction du pourcentage de chaux est représentée graphiquement sur la figure V.1.

Tableau V.1 : Résultat de l'indice des vides pour différents % de la chaux

Pourcentage(%)	0%	2%	4%	6%	8%	10%	12%
e_0	0,670	0,315	0,469	0,482	0,501	0,492	0,345

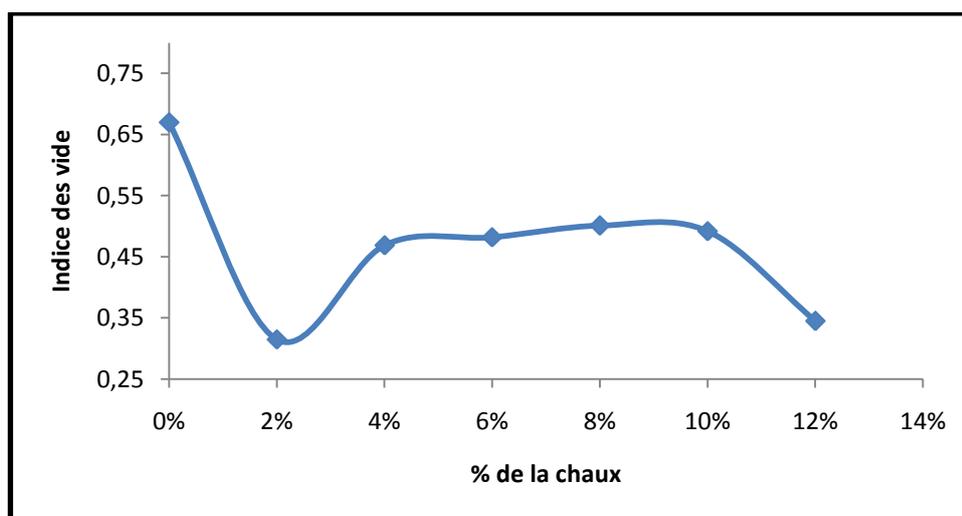


Figure V.1 : Courbe de variation de l'indice des vides en fonction du pourcentage de chaux

On remarque que l'indice des vides initial diminue fortement avec 2% de chaux, par contre à partir de 2% jusqu'à 10% de chaux, l'indice des vides est presque stable. Par la suite, on note une réduction importante de l'indice des vides à 12% de chaux (0,345),

en comparant à la valeur de l'indice des vides sans traitement (0,670). Le traitement à la chaux est influencé à 2 et 12% de chaux, par contre l'argile traitée à 4 jusqu'à 10% ne montre pas un changement important dans la valeur de l'indice des vides.

V.2.2 Module œdométriques (E')

La variation du module oedometrique E' des mélanges argile +chaux en fonction du pourcentage de la chaux est représentée graphiquement sur la figure V.2 et dans le tableau V.2.

Tableau V .2 : Influence du pourcentage de la chaux sur le module oedométrique

Pourcentage (%)	0%	2%	4%	6%	8%	10%	12%
E' (bar)	2,24	3,43	3,32	3,24	3,38	2,05	1,75

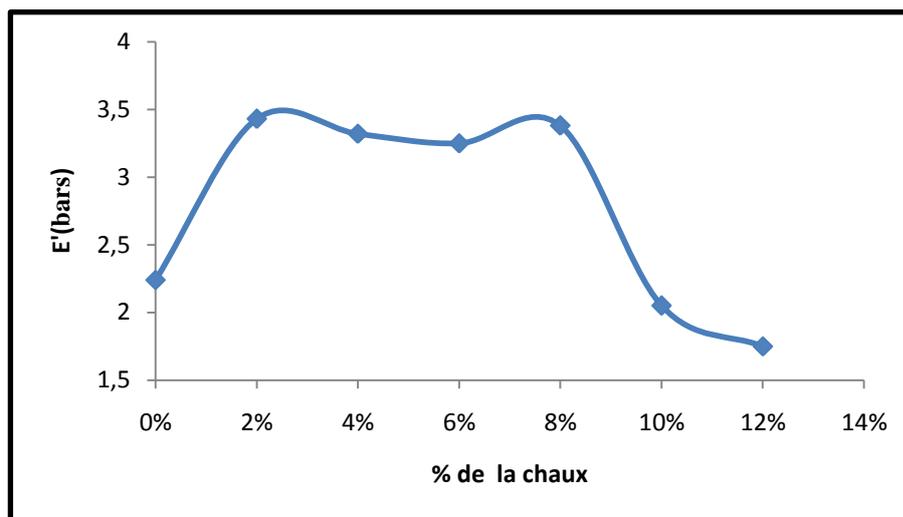


Figure V.2 : La variation du module oedométrique en fonction du % de la chaux

De la courbe, on peut conclure que l'allure est instable entre 2 et 8% de chaux. On remarque que E' a augmenté avec la valeur de 2%, après on a un palier stable jusqu'à 8%, et une diminution importante pour les autres traitements de 10 et 12% de chaux.

V 2.3 L'indice de compression C_c

Le tableau V .3 présente l'influence du % de la chaux sur l'indice de compression, et l'allure de la courbe est montré sur la figure V.3. On remarque que les valeurs de C_c diminuent avec l'augmentation du % de la chaux à 2%. Mais entre 2 et 12% de chaux, le traitement ne montre pas une influence importante sur la valeur de l'indice de compression C_c .

Tableau V .3 : Résultat del'indice de compression en fontiondu % de la chaux

Pourcentage(%)	0%	2%	4%	6%	8%	10%	12%
C_c	0,628	0,064	0,061	0,051	0,051	0,027	0,059

La variation de l'indice des compression des mélanges en fonction du pourcentage de la chaux est représentée graphiquement sur la figure V.3.

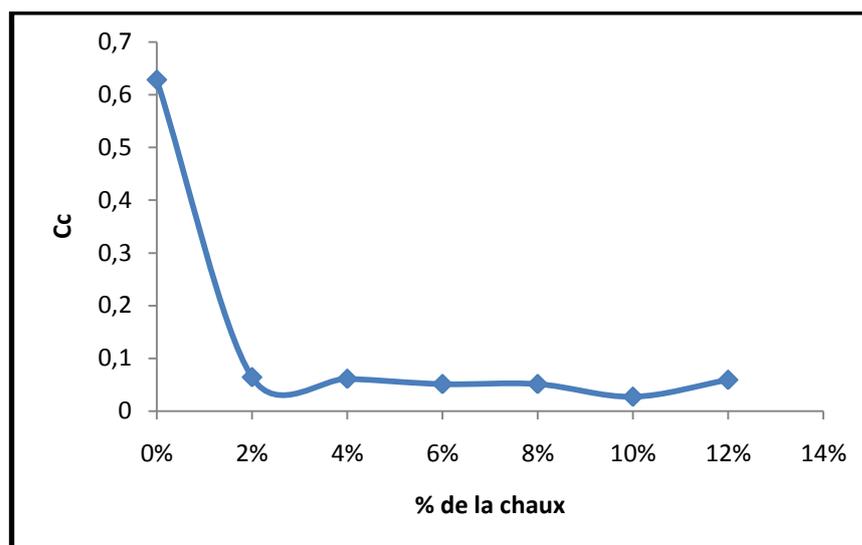


Figure V.3 :La variation de l'indice des compression en fonction du % de la chaux.

V 2.4 La compressibilité $Cc/(1+e_0)$

Les résultats de la compressibilité pour différents pourcentages de la chaux sont résumés dans tableau V.4. La variation de cette dernière des mélanges en fonction du pourcentage de la chaux est représentée graphiquement sur la figure V.4.

Tableau V .4 : Influence du pourcentage de la chaux sur la compressibilité

Pourcentage(%)	0%	2%	4%	6%	8%	10%	12%
Cc	0,376	0,048	0,042	0,034	0,034	0,018	0,028

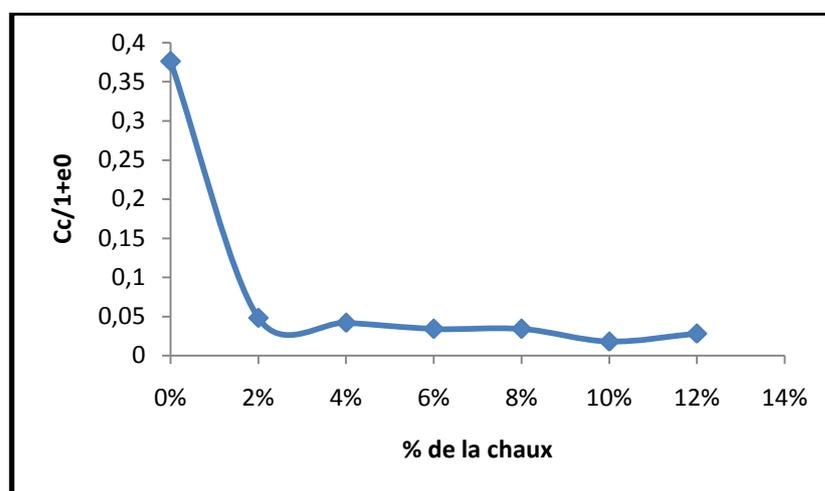


Figure V.4 :La variation de la compressibilité en fonction du % de la chaux

De la figure V.4, on note que la valeur de la compressibilité est presque stable entre 2 et 12% de chaux. On remarque que ce rapport a diminué considérablement à 2% de chaux.

V 2.5 Coefficient de gonflement C_g

La variation du coefficient de gonflement C_g des mélanges argile +chaux en fonction du pourcentage de la chaux est représentée graphiquement sur la figure V.5 et dans le tableau V.5.

Tableau V.5 : La variation de l'indice de gonflement en fonction du % de la chaux

Pourcentage(%)	0%	2%	4%	6%	8%	10%	12%
C_g	0,0147	0,0228	0,0237	0,0126	0,0107	0,0159	0,055

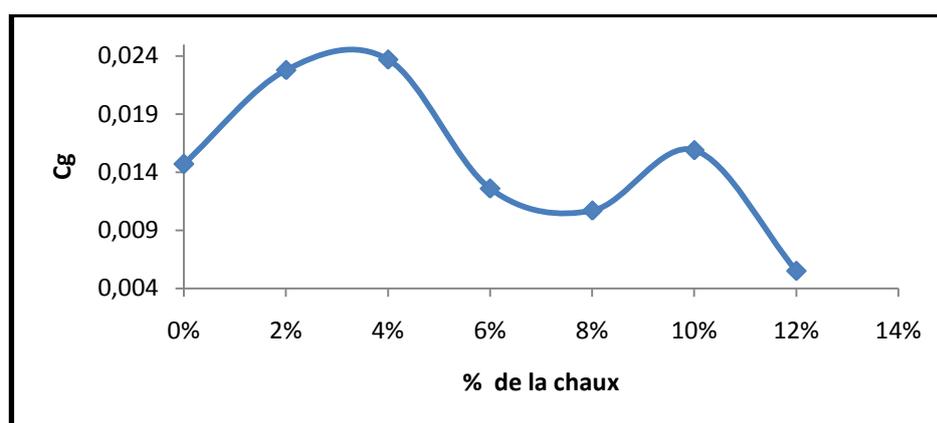


Figure V.5 :La variation de l'indice de gonflement en fonction du % de la chaux

De la courbe on peut conclure que l'allure est instable. On remarque que le coefficient de gonflement initial ne montre pas une influence importante jusqu'à 4% de chaux. Mais à partir de 6 jusqu'à 10% de chaux, le coefficient de gonflement diminue rapidement. A 12% de chaux, on peut conclure que l'argile ne subit aucun gonflement (le gonflement est nul).

V 2.6 Coefficient de consolidation C_v

On dispose deux méthodes pour déterminer le coefficient de consolidation et cela déjà cité dans le chapitre 4.

La variation de coefficient de consolidation des mélanges de l'argile +chaux est représentée graphiquement sur la figure V.6 et les valeurs sont montrées dans le tableau.6.

Tableau V .6 : Résultats du coefficient de consolidation des deux méthodes Casagrande et Taylor en fonction du % de la chaux

Pourcentage(%)	0%	2%	4%	6%	8%	10%	12%
$C_v(\text{casa})10^{-3}$	2,25	2,18	2,07	3,03	2,23	1,68	2,31
$C_v(\text{taylor})10^{-3}$	2,15	2,14	2,17	2,63	2,49	1,66	2,15

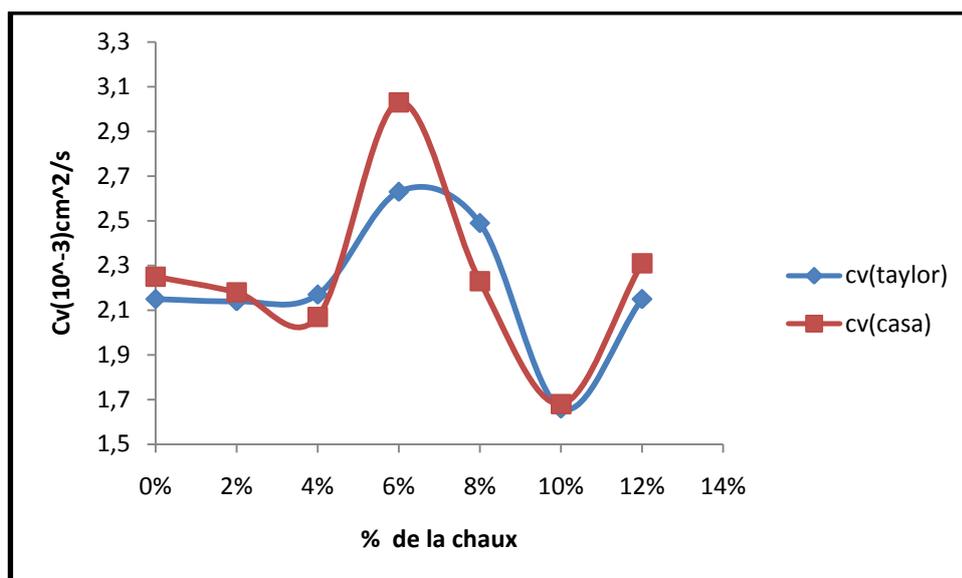


Figure V.6 :La variation des coefficients de consolidation en fonction du % de la chaux des deux méthodes

On remarque que les coefficients de consolidation obtenus par les deux méthodes (Taylor et Casagrande) sont variables et les perturbations sont très marquées à 6% de chaux. Les valeurs des coefficients de consolidation avec les différents traitements sont proches à une valeur de $2 \times 10^{-3} \text{ cm}^2/\text{s}$.

V 2.7 Coefficient de perméabilité K

La variation de coefficient de perméabilité des mélanges de l'argile + chaux est représentée graphiquement sur la figure V.7 et les valeurs sont montrées dans le tableau V.7.

Tableau V .7 :Résultat de coefficient de perméabilité des deux méthodes en fonction du % de la chaux

Pourcentage(%)	0%	2%	4%	6%	8%	10%	12%
K(casa)10^{-9}	9,85	6,23	6,11	9,14	6,47	8,08	0,126
K(taylor)10^{-9}	9,41	6,12	6,41	7,93	7,22	7,94	0,12

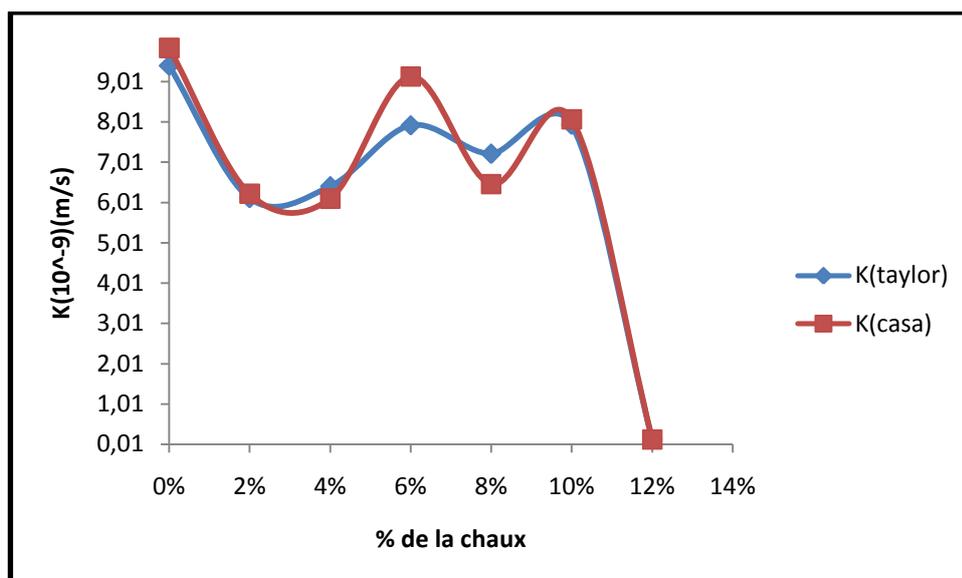


Figure V.7 :La variation des coefficients de perméabilité en fonction du % de la chaux des deux méthodes

On remarque que les perméabilités obtenues par les deux méthodes (Taylor et Casagrande) sont variables entre 2 et 10% de chaux, mais les valeurs des coefficients de perméabilité se situent entre 6 et 9×10^{-9} m/s. Par contre pour le traitement de 12% de chaux, la valeur du coefficient de perméabilité est très marquée et diminue rapidement à 10^{-11} m/s.

V.3 Conclusion

Ce chapitre nous a permis de déterminer l'influence de la chaux sur les paramètres mécaniques de l'argile étudié en utilisant les essais oedométriques sur des mélanges à la chaux à des pourcentages différents (2, 4, 6, 8, 10 et 12 %).

Nous remarquons que l'ajout de la chaux a donné une influence remarquable sur les paramètres mécaniques de l'argile de C_c et C_g , le module oedométrique E' et la valeur de $C_c/1 + e_0$ qui nous renseigne sur la compressibilité du sol).

Les différents traitements à la chaux sur les paramètres mécaniques sont très marqués à 2% de chaux et surtout à 12% de chaux. Entre 2 et 10% de chaux, le traitement n'influe pas considérablement sur ces paramètres.

Pour plus de compréhension sur l'influence du traitement à la chaux de l'argile d'Adrar, il est important de réaliser des analyses minéralogiques des différents échantillons traités.

**conclusion
générale**

Conclusion générale

Conclusion générale

La stabilisation des sols argileux a été étudiée par un grand nombre de chercheurs. Beaucoup de méthodes et d'appareillages ont été mis au point, pour avoir des solutions qui minimisent le phénomène de gonflement.

Le choix des techniques de stabilisation les plus utilisées dépend de plusieurs paramètres tels que : les considérations économiques, la nature du sol à traiter, la durée de l'opération, la disponibilité des matériaux à utiliser ainsi que les conditions d'environnement.

L'objectif de ce travail est de montrer la possibilité d'amélioration et de valorisation des caractéristiques mécaniques des matériaux locaux par des techniques de compactage. Dans le présent mémoire, nous avons mené un travail expérimental permettant la caractérisation physico-chimique, mécanique des matériaux argileux locaux de la région d'Adrar ; une argile (Adrar Nord). Cette étude a pour objectif principal l'évaluation de la possibilité d'exploitation un.

D'après la caractérisation physique et chimique, l'argile d'Adrar est une très plastique et très gonflante de la famille d'illite, un gonflement élevé à fort.

Dans les essais de compactage, nous avons calculé les optimum de Proctor modifié avec les quelles on traite les essais oedométriques.

On a pu aussi déterminer les valeurs de C_c et C_g (que E' (module oedométrique) et la valeur de $C_c/1 + e_0$ qui nous renseignent sur la compressibilité et la perméabilité K du sol.

Les résultats obtenus sur notre sol ont permis de constater que l'amélioration par l'ajout de chaux à des pourcentages de 2, 4, 6, 8, 10 et 12%, modifie considérablement les caractéristiques physiques, chimiques et mécaniques ainsi que la classification ; les résultats ont montré aussi qu'il y a une augmentation de la teneur en eau optimale, et une diminution remarquable du poids volumique sec optimum en fonction du pourcentage de chaux à ajouter.

On a passé à l'amélioration par l'ajout de sable à des pourcentages de 2, 4, 6, 8, 10 et 12%, ou on a traité les essais mécaniques des mélanges; les résultats modifient considérablement les caractéristiques mécaniques et donnent des valeurs inférieures à celle du mélange à la chaux.

Pour d'éventuelles suites à ce travail, il serait intéressant de connaître la possibilité d'amélioration et de valorisation des caractéristiques mécaniques d'autres matériaux locaux de la région d'Adrar tel que l'Argile de Timimoun, de Regane... etc.

Bibliographie

Bibliographie

- 1) **Article Azzouz FZ** 2015 [Stabilisation des sols argileux de la région de Tlemcen par les sels]
- 2) **Sakran Salah**2014 [Préparation, caractérisation et réactivité catalytique des nanoparticules d'or supportées sur argile]
- 3) **Jad Wakim**2005[Influence des solutions aqueuses sur le comportement mécanique des roches argileuses]
- 4) **Abdellaoui** 2006[Etude des phénomènes d'absorption et de diffusion des métaux lourds dans les sols argileux]
- 5) **Tizzaoui** 2013[ELIMINATION DES METAUX LOURDS EN SOLUTION AQUEUSE PAR DES ARGILES ALGERIENNES]
- 6) **P. Mekarta.B.** Cour géotechnique 2017
- 7) **Belabbaci** 2015 [STABILISATION DES SOLS GONFLANTS]
- 8) **Hossein NOWAMOOZ** 2007[RETRAIT/GONFLEMENT DES SOLS ARGILEUX COMPACTES ET NATURELS]
- 9) **Mémoire Mellouki et Soudi** 2017 [Amélioration des caractéristiques physiques chimiques et mécaniques d'argile dans la région d'Adrar]
- 10) **Mémoire Hafsi et Mekki** 2015 [Amélioration des caractéristiques physiques et mécaniques de l'argile rouge de Mraguen (Adrar)]
- 11) **Mémoire .Gueddouda M.K** 2011 [Comportement hydro-mécanique des sols compactés :Application à la conception d'une barrière ouvragée « sable de dune –bentonite »]
- 12) **Article Moulay Omar** 2016 [ETUDE DU CONTEXTE GEOLOGIQUE DES GISEMENTS D'ARGILES D'ADRAR DANS DES APPLICATIONS EN GENIE CIVIL]
- 13) **Article Hachichi** 2009 [Etude des phénomènes retrait- gonflement et stabilisation des sols gonflants de la région d'Oran]
- 14) **Article Gue douda**2012 [COMPORTEMENT MECANIQUE D'UN SOL EXPANSIF STABILISE PAR AJOUT DE SABLE DE DUNE]
- 15) **Mémoire Mamouni** 2017 [Etude des formulations des matériaux locaux de la région d'Adrar dans des applications en technique routière]

Résumé:

Les sols argileux gonflants posent de nombreux problèmes en construction . Ces sols sont rencontrés dans de nombreux pays. Les sols argileux que l'on rencontre en Algérie rentrent dans cette catégorie. La mauvaise qualité de ce sol est liée à sa sensibilité à l'eau et à son gonflement important. C'est pourquoi un traitement par la chaux ou par le sable rend possible leur utilisation.

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 chaux et de sable.

Cette étude montre que le traitement modifie les caractéristiques physico-chimiques et mécaniques du sol et donne des résultats tout à fait satisfaisants en réduisant considérablement les phénomènes de gonflement. Les effets du dosage en chaux, du mode de conservation et du temps de contact sur le gonflement et la pression de gonflement sont étudiés.

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

Abstract:

Summary the swelling clay soils pose many problems in the construction. These soils are found in many countries. The clay soils meet me .Algeria rentxent.in this.category.the poor quality of soil is linked to its sensitivity to water and its swelling .This is why treatment with lime or sand makes it possible to use them . The present work sets out its principal objective in the study the different mineralogical characteristics. Physical and chemical clays.

Physical chemistry of clays UI consiste in a swelling of exploiting geotechnical studies to stabilize and modify the chemical and mechanical physical characteristics of this soils by addition of lime and sand. This study shows that the treattement modifies physicochemical characteristics and mechanics of the soil and gives quite satisfactory results by considerably reducing the phenomena of gonflemeat The effect of the lime dosage, the conservation mede and the contact time on the swilling and swilling pressure are studied .

Key words: Clay of Adrar,swilling ,improvement , stabilization ,lime ,sand

ملخص

تشير التربة الطينية المتورمة العديد من المشاكل في البناء هذه التربة تواجه في العديد من البلدان الظروف المؤلمة التي توجد في الجزائر تقع ضمن هذه الفئة ترتبط الجودة الرديئة لهذه التربة بحساسيتها للماء وتورمها هذا هو السبب في ان العلاج باستخدام الجير او الرمل يجعل من الممكن استخدامها يحدد العمل الحالي هدفه الرئيسي في معرفة الخصائص المعدنية والفيزيائية والكيميائية المختلفة للمحاور وتتمثل الخطوة الاولى تحليل ظاهرة تورم هذه المواد الخاصة واستغلال الدراسات الجيوتقنية لتحقيق الاستقرار لتعديل الخصائص الفيزيائية و الكيميائية لهذه التربة بإضافة الجير والرمل وتبين أن هذه الدراسة تغير الخصائص الكيميائية والميكانيكية ويعطي نتائج مرضية للحد من ظاهرة الإنتفاخ.

الكلمات المفتاحية: طين أدرار . إنتفاخ . تحسين . إستقرار .جير .رمل.