

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR

ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

Centre Universitaire BELHADJ Bouchaib d'Ain Témouchent

DEPARTEMENT DE GENIE CIVIL

Mémoire de fin d'études

En vue de l'obtention du diplôme de Master en Génie Civil

OPTION : Travaux Publics

THEME

**Comportement du sol
traité par la chaux**

Présenté par:

MEDJAHED KHEIRA

Présenté devant le jury :

Présidente :

Examineur :

Encadreur : Madame belbbaci zyneb

Promotion 2015-2016

REMERCEMENTS

*Je tiens à exprimer ma gratitude à Monsieur **Sidi Mohamed AISSA MAMOUNE**, chef département, Et Madame **Zineb BELABBACI** pour m'avoir guidée tout au long de ce mémoire.*

Je le remercie vivement pour sa disponibilité, pour ces conseils avisés et son aide précieuse pour la rédaction de ce mémoire.

*Je ne saurais comment remercier Monsieur **Alkhedim Mohamed**, directeur du Laboratoire National de l'Habitat et de Construction*

(L.N.H.C) DIRECTION REGIONALE A SIDI BEL ABBES.

pour m'avoir accueillie au sein de son équipe et ainsi de remercier l'ensemble du personnel des laboratoires pour le soutien matériel qui m'a été offert pour la réalisation de ce mémoire.

Je remerciées a tous mes profs de département de génie civile, pour ses multiples conseils, son encouragement, je tiens à lui exprimer ma très sincère et respectueuse reconnaissance

Mes remerciements vont également à tous les membres du jury pour avoir apporté un grand intérêt à cette étude.

Table des matières

LISTE DES FIGURES

LISTE DES TABLEAUX

LISTE DES PHOTOS

1ère PARTIE : Revue bibliographique sur les sols

Chapitre 1 : CARACTERISATION ET CLASSIFICATION DES MATERIAUX UTILISES

1.1. Introduction	4
1.2 Définition des sols	4
1.2 .1 Les argiles.....	5
1.2 .2 Les limons	5
1.2.3 Les marnes.....	5
1.3 Définition des minéraux argileux	6
1.3.1. Les argiles du groupe de la kaolinite :.....	7
1.3.2. Les argiles du groupe des micas (Les illites) :.....	8
1.3.3.1. Différents stades du gonflement des smectites (La Montmorillonite)	9
1 .4 .2 Phénomène de gonflement	11

Chapitre 2 : identification de sol

3.1 Introduction	38
3.2. Sol étudié	38
3.2.1 Prélèvement des échantillons	39
3.2.2 Propriétés chimiques	39
3.2.3 Propriétés physiques.....	40
3.2.3.1 Analyse granulo-sédimentométrique	40
3.2.3.2 Limites d'Atterberg.....	41
3.2.3.3 Essai au bleu de méthylène (Vb)	42
3.2.4 Propriétés mécaniques	44
3.2.4.1 Essai Proctor normal et modifié	44
3.2.5 Interprétation des résultats et classification du sol....	45
1 .4 .2 Phénomène de gonflement	11
3.3. chaux utilisée	50
3.3.1 Introduction.....	50
3.3.2 Identification de la chaux utilisée.....	51
3.3.2.1 Définition	51
3.3.2.2 Spécification du produit.....	51
3.3.2.3 Caractéristiques physico-chimiques de chaux	51
3 .4 Conclusion	53

Chapitre 3 : Comportement physique des mélanges (argile +chaux)

4 .1 Introduction.....	54
4.2 Préparation des mélanges	55
4.3 Effet de la chaux sur les limites d'Atterberg	55
4.3.1. Résultats et interprétation.....	56
4.4. Effet de la chaux sur la valeur au bleu de méthylène.....	57

4.4.1. Résultats et interprétation.....	58
4 .5.Etude de la compactibilité des mélanges	58
4 .5.1.Compactage des mélanges:.....	59
4 .5.2.Résultats et interprétation.....	59
4 .6 Conclusion.....	62

Chapitre 4 : Comportement mécanique des mélanges (argile +chaux)

5.1 Introduction.....	63
5.2 Préparation des mélanges	63
5.3 Résistance à la compression des mélanges.....	64
5. 3.1 Reconstitution des éprouvettes	64
5.2.3 Résultats et interprétation.....	66
5.3 Etude de la portance.....	67
5.3.1 Mode opératoire.....	67
5.3.2 Résultats et interprétation.....	67
5.3 Etude de la compressibilité	68
5.3.1 Reconstitution des éprouvettes.....	68
5.3.2 Mode opératoire.....	69
5.3.2.1 Système de chargement	69
5.3.2.2 Détermination de l'indice de compressibilité (Cc) et l'indice de gonflement (Cg).....	69
5.3. 3 Présentation des résultats et interprétations.....	70
5.4 Etude du potentiel de gonflement	72
5.4.1 Mode opératoire.....	73
5.4.2 Présentation et interprétation des résultats	73
5.5 Etude de la pression de gonflement.....	75
5.5.1 Mode opératoire.....	75

5.5.2 Interprétation et présentation des résultats.....	75
5.6 Paramètre du cisaillement direct	77
5.6.1 Reconstitution des éprouvettes	77
5.6.2 Mode opératoire.....	78
5.6.2 Présentation des résultats et interprétation.....	80
5.6.2.1 Relation contrainte - déformation	80
5.6.2.2 Paramètres de la résistance au cisaillement.....	83
5.7 Conclusion.....	85

Chapitre 4: Techniques de stabilisation des sols argiles

2.1. Introduction.....	16
2.2. Stabilisation mécanique.....	17
2.2.1 Méthode de substitution.....	17
2.2.2 Méthode de compactage.....	17
2.2.3 Méthode de pré humidification.....	17
2.3. Stabilisation aux sables.....	17
2.4 Stabilisation avec des additifs	18
2.4.1 Les sels	18
2.4. 2 Les liants	20
2.4. 2.1 Liants organiques	21
2.4. 2.2 Liants hydrauliques	22
2.4. 2.2 .1 Stabilisation au ciment	22
2.4. 2.2 .2 Stabilisation aux cendres volantes	24
2.4. 2.2 .3 Stabilisation à la chaux.....	24
2 .5 Conclusion	36
7 .5 Conclusion.....	106
Conclusion générale.....	108

Notations

C Pourcentage en chaux (%)

c Cohésion totale (MPa)

G Potentiel de gonflement (%)

Cc Indice de compression (%)

Cg Indice de gonflement (%)

Dmax Diamètre maximal des grains (mm)

CBR Indice de portance imbibé (%)

e Indice des vides

IP Indice de plasticité (%)

IR Indice de retrait (%)

RC Résistance à la compression (MPa)

VB Valeur au bleu de méthylène (g /kg)

W Teneur en eau (%)

WL Limite de liquidité (%)

WP Limite de plasticité (%)

WR Limite de retrait (%)

τ Contrainte du cisaillement (bars)

Φ Angle de frottement interne (°)

σ Contrainte normale du cisaillement à la boite (bars)

Résumé :

Avec la réduction de ressources en matériaux de qualité, de plus en plus les constructions de structures de génie civil sont réalisées sur le sol de faible résistance, ce qui mène à penser au développement de techniques de stabilisation de ce type de sol. La stabilisation à la chaux a été largement appliquée en pratique du génie civil comme des fondations. Avec l'ajout de la chaux aux sols, des réactions est établie avec les grains du sol qui mènent à l'amélioration des propriétés géotechniques du sol traité.

Une étude bibliographique à été faite sur les sols évolutifs ainsi que sur les différentes techniques de stabilisation des ces sols avec la présentation de quelques résultats des chercheurs.

Une méthodologie expérimentale a été développée permettant d'étudier le comportement physique et mécanique des mélanges traités par l'évaluation de l'influence d'une variété du pourcentages en chaux (C= 1, 2, 3 et 4%) sur les limites d'Atterberg, la valeur au bleu, la compactibilité, la portance, Une augmentation continue en chaux de 1 à 4% implique une amélioration des paramètres physicomécaniques, ce qui signifie le bon comportement des mélanges traités.

MOTS CLES: *Argile, stabilisation, traitement ; chaux éteinte,*

Liste des photos

Liste des tableaux

Liste des figures

Introduction Générale

Le comportement des sols fins, notamment des argiles, est complexe. Son étude a nécessité le développement d'un grand nombre de techniques d'essais en laboratoire (comportement, traitement) . alors Les sols argileux sont constitués de minéraux variés dont l'affinité à l'eau dépend de plusieurs paramètres, entre autre la structure minéralogique. Certains sols comportent une proportion de particules argileuses telles que les Illites et les Smectites, etc.

La durabilité naturelle du sol peut être améliorée par le processus de la stabilisation de sol en utilisant différents types de stabilisateurs (ciment, chaux, cendre volante). Le but est d'augmenter la résistance contre les forces destructives dans le temps par l'accroissement de la cohésion et la diminution du mouvement d'humidité dans le sol. Le traitement des sols à la chaux est une technique aisée à mettre en oeuvre, économique et efficace.

L'objectif de ce travail est d'étudier le comportement d'une sol argileuse traitée à la chaux éteinte. Le travail s'attache à évaluer au laboratoire l'influence d'une variation du pourcentage en chaux sur les paramètres physiques et mécaniques du sol.

La **première partie** consiste en une revue bibliographique, constituée de deux **chapitres : le premier** est consacré à la définition des sols, structure de l'argile, les minéraux argileux ainsi que les désordres occasionnés par ces types de sols, au niveau des constructions de génie civil.

Le deuxième chapitre concerne la présentation des principaux identification de sol étudié dans (L .H.N.C) de sidi bel abbes est les résultats .

***Le chapitre 3** s'attarde sur l'identification et la classification des matériaux (argile et chaux).

* **Le chapitre 4** porte sur la caractérisation du comportement physique des mélanges (argile+chaux)

* **Le chapitre 5** s'attache à évaluer le comportement mécanique des mélanges à savoir

la résistance à la compression, compressibilité à l'oedomètre, résistance au cisaillement, potentiel et pression de gonflement. L'objectif principal étant de déterminer l'évolution des caractéristiques mécaniques de l'argiles en fonction du pourcentage en chaux additionnée.

En fin Notre travail s'achève par une conclusion générale

CHAPITRE 1 :

CARACTERISATION ET CLASSIFICATION DES MATERIAUX UTILISES

2. Définition des sols

Dans le cadre de l'amélioration des sols nous nous limiterons à l'étude des sols ayant un comportement mécanique ne pouvant pas répondre aux besoins d'un projet du génie civil.

2.1. Définition géotechnique des sols

Nous schématiserons les sols comme étant composé de quatre phases. Une phase solide

composé de particules minérales solides et organiques. Une phase liquide sous différentes



modèle de sol

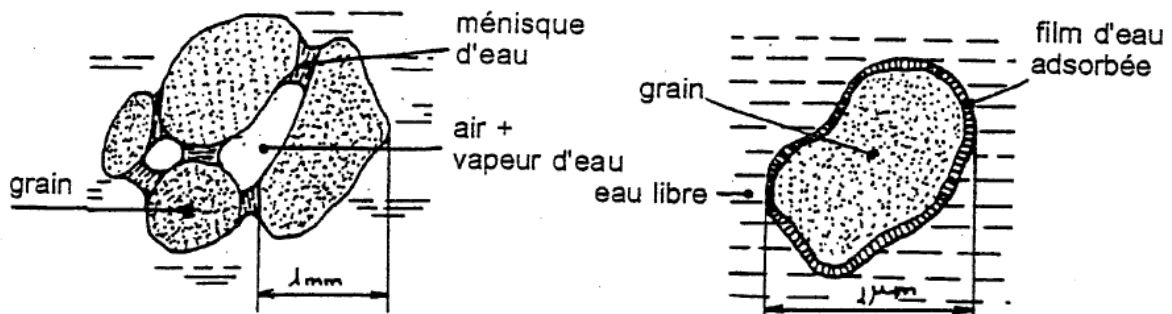
Solide----- squelette du sol : assemblage des particules solides minérales et/ou org

Liquide----- différentes formes d'eau

Gaz----- vapeur d'eau, air se

Trois type de sols ressortent comme étant les plus souvent rencontrés sur un chantier :

- Sols grenus
- Sols fins
- Sols organiques



a - Sol humide et non saturé

b - Particule de sol très fin

LES PRINCIPAUX D'UN SOL

LES ARGILES :

Les argiles sont des roches sédimentaires à grains fins, de taille inférieure à 0,005 mm, contenant au moins 50 % de silicate d'alumine. Elles absorbent l'eau et forment une pâte imperméable

(perméabilité inférieure à 0,2 mm/h), appelée couramment terre glaise, colorée par des oxydes de fer en ocre, rouge, vert.

Les argiles peuvent être gonflantes, notamment celles de la famille des Montmorillonites lorsqu'elles absorbent l'eau et, au contraire, diminuer de volume sous l'effet de la sécheresse, allant jusqu'à craqueler en surface et même sur une profondeur de 2 m à 4 m. Par ailleurs, sous l'effet d'une charge, par exemple celle d'une construction, une partie de l'eau absorbée contenue entre les grains d'argile est chassée, ce qui a pour conséquence de provoquer un tassement sensible du sol. Les argiles représentent en général une assise acceptable à médiocre lorsqu'elles sont recouvertes par d'autres couches de terrain. En revanche, elles sont dangereuses lorsqu'elles affleurent au niveau du sol, du fait de leur instabilité, se traduisant par des variations de volume et un fluage dans les terrains en pente.

1.2 .2 Les limons

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

1.2 .3 Les marnes

Les marnes sont à la fois argileuses et calcaires. On considère, selon leur composition, trois grandes catégories :

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

Comme pour les argiles, les marnes argileuses présentent notamment l'inconvénient de craqueler sur une certaine profondeur en cas de sécheresse. Les marnes ont souvent fait l'objet d'exploitation en carrières à ciel ouvert ou en souterrain pour donner respectivement : de la chaux avec les marnes argileuses ; de la chaux hydraulique avec les marnes proprement dites ; et du ciment avec les marnes calcaires ou calcaires marneux. Elles ont également été utilisées pour amender les terres des exploitations agricoles. D'une façon générale, les marnes sont une assise de fondations bonne à moyenne en l'absence de gypse. En revanche, elles sont médiocres,

voire dangereuses, lorsqu'elles sont très argileuses en affleurement ou lorsqu'elles se situent au-dessus d'une masse de gypse, avec risque de formation de fontis.

Les marnes sont des roches relativement tendres, elles subissent une géodynamique très active à leur surface et leur fragilité les rend très vulnérables aux aléas de la nature et des hommes. Une combinaison de facteurs naturels et anthropiques a provoqué une érosion hydrique intense qui s'est manifestée par une dégradation des sols et une diminution importante de leur productivité. [52].

On peut conclure que l'évolution des sols fins est due à la présence des minéraux argileux dans les sols tels que : les marnes, les argiles....etc, qui manifestent une grande sensibilité à l'air (retrait, fissuration désagrégation progressive des couches de sol) et une forte affinité pour l'eau (avec les conséquences classiques de l'humidification : gonflement, déconsolidation, perte des caractéristiques mécaniques) [33].

1.3 Définition des minéraux argileux

Les minéraux argileux sont des silicates d'alumine hydratés provenant de la décomposition des feldspaths et des micas, leur formule chimique est de la forme : **(SiO₂)_M (Al₂ O₃)_N (H₂O)_P**

Ils sont composés de particules de forme aplatie et de dimensions très petites (Inférieures à 2µm), ceci leur confère une très grande surface spécifique. Les éléments structuraux sont le tétraèdre de silice et l'octaèdre d'alumine où éventuellement ils sont composés de particules de forme aplatie et de dimensions très petites (Inférieures à 2µm), ceci leur confère une très grande surface spécifique.

Les éléments structuraux sont le tétraèdre de silice et l'octaèdre d'alumine où éventuellement

Mg⁺⁺ peut remplacer Al⁺⁺⁺. Les particules d'argile sont formées d'un empilement de feuillets qui sont constitués par l'association de deux unités structurales de base (Figure 1.1) [27] :

a) Unité tétraédrique :

Elle est formée d'un tétraèdre au sommet duquel quatre ions d'oxygènes (O²⁻) enserrent un ion de silicium (Si⁴⁺), équidistant à chacun d'eux. Ces tétraèdres se combinent entre eux pour former une couche tétraédrique.

b) Unité octaédrique :

Elle est formée d'un octaèdre au centre duquel un ion d'aluminium (Al^{3+}) ou de magnésium (Mg^{2+}) est équidistant aux six hydroxyles (OH^-) des sommets.

Ces octaèdres se combinent pour former des couches planes dites couches octaédriques, et la liaison avec la couche tétraédrique se fait au niveau des oxygènes.

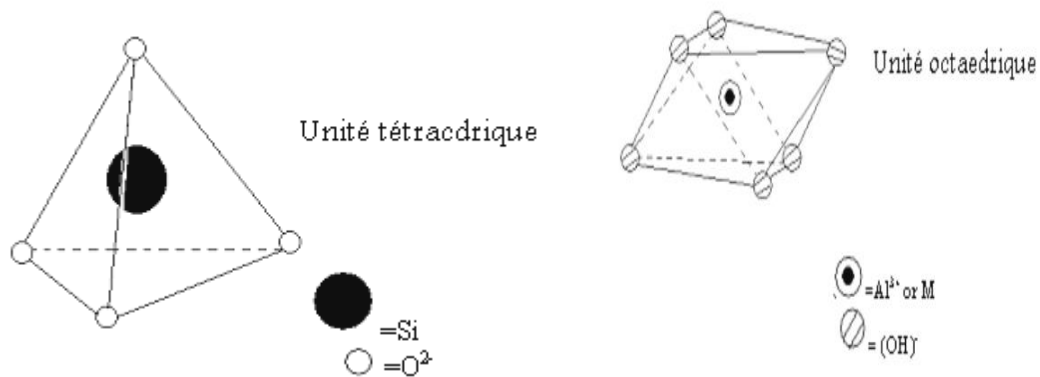
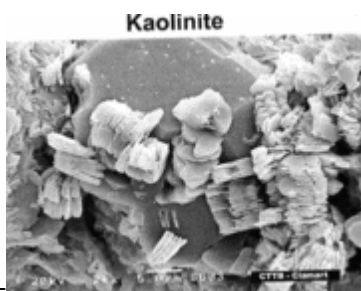


Figure 1.1 : Structure de base des argiles.

A partir de ces structures de base nous pouvons définir plusieurs familles d'argiles (La kaolinite, l'illite, la chlorite, la montmorillonite). Précisons à présent les propriétés principales des trois grandes familles (ou groupes) d'argile.

1.3.1. Les argiles du groupe de la kaolinite :

Dans la kaolinite les couches d'octaèdres et les couches de tétraèdres sont parallèles, et s'intercalent de telle façon que les atomes supérieurs et inférieurs de chacune des couches appartiennent à un même plan. [35].



L'espace de base entre les ions d'oxygène dans l'unité tétraédrique et les ions hydroxyles dans l'unité octaédrique est presque identique, de ce fait les couches tétraédriques et octaédriques peuvent s'associer et former ainsi le feuillet de kaolinite avec pour formule générale : $N (Al_2 Si_2 O_5 (OH)_4)$

Notons que l'épaisseur du feuillet élémentaire est d'environ 7Å mais les dimensions dans les deux autres directions sont infinies. La structure de la Kaolinite est donnée dans la figure 1 .2

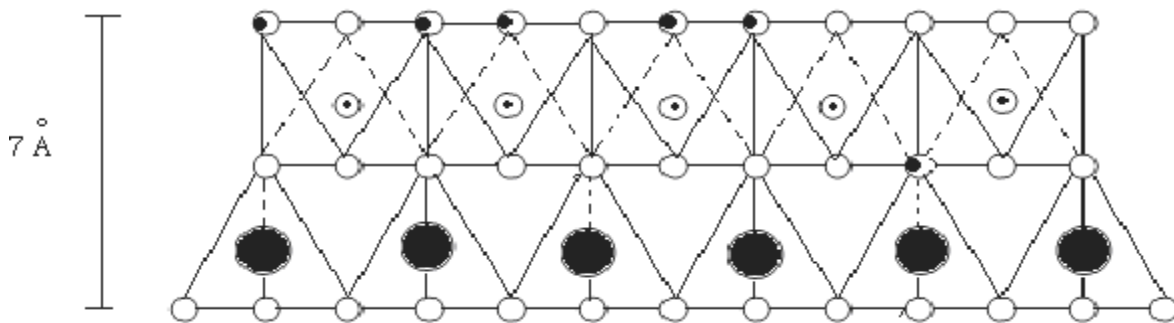


Figure 1 .2 : Structure de la kaolinite.

=O²⁻

= (OH) ⁻

=Al³⁺ or Mg²⁺

=Si⁴⁺

1.3.2. Les argiles du groupe des micas (les illites) :

La structure du feuillet est en forme de « sandwich », composée d'une couche octaédrique comprise entre deux couches tétraédriques [27].

L'illite est un des minéraux argileux du groupe des micas le plus répandu dans la nature. La structure de l'illite ressemble à celle de la montmorillonite. La différence provient de ce que

l'aluminium remplace à 20 % le silicium dans les tétraèdres et que des atomes de potassium venant rétablir l'équilibre des charges rompu par le remplacement, assurent la liaison des couches tétraédriques et octaédriques. Cette liaison est suffisante pour empêcher l'eau de s'insérer à l'inter-couche et l'illite n'est pas donc une argile très gonflante [35].

Les illites sont des particules de dimensions plus petites que la kaolinite de diamètre équivalent moyen de 0,3 μm , et d'une épaisseur de 100Å. [27]

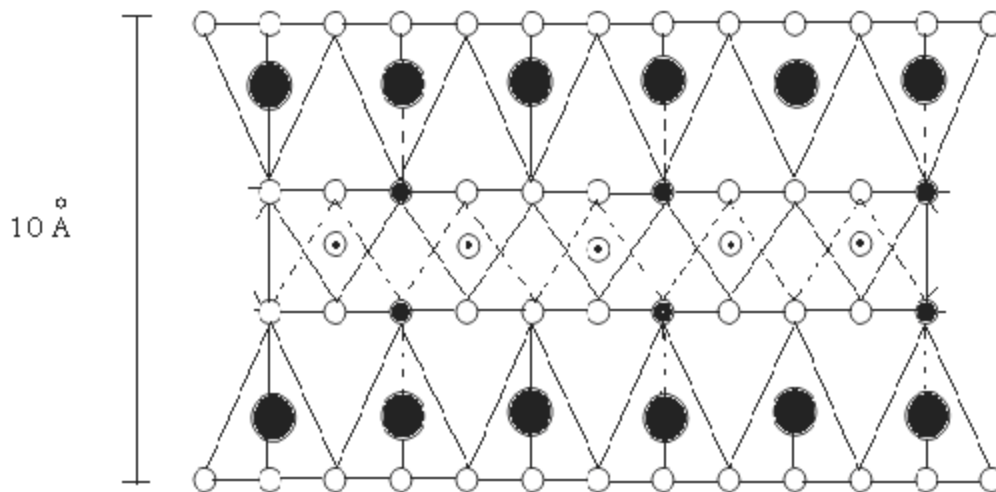


Figure 1. 3 : Structure d'illite

Ce sont des argiles du même type que le mica (une couche octaédrique entre deux couches tétraédriques), mais les liaisons entre feuillets sont plus faibles.

Les substitutions isomorphiques sont principalement localisées en couches octaédriques.

Les smectites possèdent ainsi des propriétés de gonflement qui se produisent surtout en présence d'eau et peuvent provoquer la dissociation complète des feuillets.

Les smectites (par exemple la montmorillonite) se caractérisent par l'existence entre deux feuillets d'un certain nombre de couches d'eau contenant des cations échangeables (libres) généralement des cations sodiques et calciques, ce qui entraîne un écartement des feuillets

variables suivant les conditions du milieu. Dans la montmorillonite, il y a un remplacement partiel de l'aluminium des octaèdres par du magnésium (presque un sur six), le déficit de charge est composé par des cations généralement Na^+ ou Ca^{++} situés entre les feuillets et qui sont

échangeables (ou compensateurs), ainsi la montmorillonite peut se présenter par la formule suivante : **(Si₄ Al₂ O₁₀ (OH) ₂)₂** Les feuillets sont empilés l'un sur l'autre comme les feuilles d'un livre, [27]. Les montmorillonites sont des minéraux ou les liaisons entre les feuillets ont affaiblies, si bien que de l'eau se glisse entre ces feuillets en quantité variable. C'est ce qui explique que les montmorillonites sont sujettes au gonflement Un sol contenant un pourcentage élevé de montmorillonite est susceptible de gonfler provoquant ainsi l'endommagement des fondations superficielles et des structures [35]

2'eme partie

identification de sol

3.1 Introduction

Quelque soient les objectifs recherchés dans une étude géotechnique, il est de règle d'effectuer initialement l'identification des sols concernés. Cette procédure permet d'orienter les analyses géotechniques ultérieures et surtout d'effectuer une classification des matériaux rencontrés. Les paramètres nécessaires pour cette classification sont aussi bien de natures physico-chimiques et mécaniques Ce chapitre est consacré à l'identification des matériaux désirés pour cette étude qui sont argile et la gypse.

3.2. Sol étudié

Dans notre étude on a choisit des matériaux provenant des zones de déblai situé au PK3+900 du tronçon d'autoroute section des 27 KM mis en dépôt au PK 5+800 Du point de vue géologique, cette zone est caractérisée par une dominance des; formations marno-calcaire renfermant des roches argileuses aux caractéristiques géotechniques médiocres Les reconnaissances géotechniques réalisées au niveau de ce tracé d'autoroute moyennant une

Localisation du site et identification:

Dans notre étude on a choisi des matériaux provenant des zones de déblai tronçon PENETRANT d'autoroute RN 43(MASCARA).

Les propriétés physico- chimiques et techniques sont regroupées dans le tableau I. La quantité de carbonate de calcium (CaCO_3) peut classer la marne comme étant une marne argileuse.

3.2.1 Prélèvement des échantillons

Les prélèvements d'échantillons effectués par le biais d'une pelle mécanique ont fait l'objet d'une sélection au niveau du dépôt situé au voisinage de Hassi Zahana et ce dans. Pour notre étude on s'est basé sur les matériaux argileux. Nous nous attachons ici à donner quelques indications sur les essais d'identification, les classements de sol qui s'en déduisent et les conclusions que l'on peut en tirer. Signalons qu'il existe des modes opératoires du L.C.P.C. pour certains essais

III-2-2-2 Essais d'identification

Les essais d'identification (teneur en eau, limites d'Atterberg, poids spécifique, indice de vides, porosité.....) sont d'un grand secours pour différencier les différentes sous couches. Cette procédure, qui nécessite évidemment de prélever les échantillons intacts en continu sur toute l'épaisseur des sols.

L'utilisation de carottiers travaillant, soit par battage, soit en rotation, les carottiers à paroi mince, enfoncés par pression continue, permettent d'obtenir des échantillons intacts de très bonne qualité.

Les essais classiques de mécanique des sols qui permettent l'identification sont :

3.2.3 Propriétés physiques

IV.3.1. Analyse granulométrique

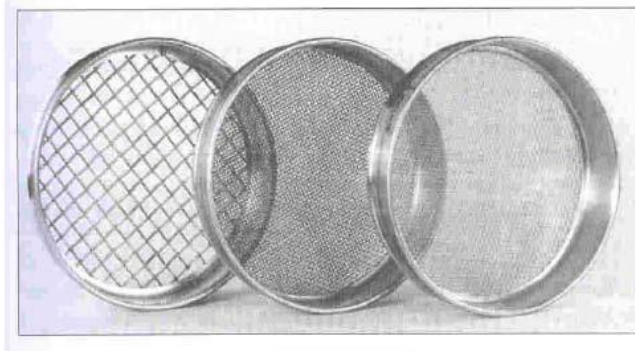
Elle se fait par tamisage par voie sèche après lavage pour les sols dont les éléments supérieurs à 80 mm (NF P94-056) et par sédimentation pour les éléments inférieurs ou égaux à 80 mm (NF P94-057). L'analyse granulométrique sol jusqu'au diamètre de 80 mm se fait en utilisant une série de tamis (NF P94-056).

IV.3.1.1. Conduite de l'essai

Les opérations préalables à effectuer sont les suivantes :

1. détermination de la teneur en eau **W** sur fraction de l'échantillon. La teneur en eau est déterminée en pesant l'échantillon dans son état humide naturel (Mh) et après séchage à 105°C (Ms). Par convention, la teneur en eau est égale au quotient du poids d'eau contenu dans l'échantillon par le poids du sol sec.
2. lavage de l'échantillon humide sur un ou plusieurs tamis d'ouverture décroissante afin de protéger le tamis d'ouverture la plus faible (généralement le tamis de 0.08mm).
3. les eaux de lavage sont récupérées dans le cas où l'on souhaite effectuer des analyses complémentaires sur les éléments fins. Dans le cas contraire, ces eaux sont éliminées.

4. les différents refus ainsi isolés sont regroupés et mis à sécher à l'étuve 105°C



Tamis



figure (VI – 2) (cas a, cas b).

Essai de Granulometrique(Cas A, B).

La granulométrie est exprimée par une courbe granulométrique qui donne la dimension moyenne des grains exprimée sous forme pourcentage du poids total du matériau.

L'analyse granulométrique du sol pour les particules inférieures ou égales à 80 mm se fait par la sédimentation. La sédimentation est un essai complet de l'analyse granulométrique par tamisage du sol (norme NFP 94- 056) ce qui peut être nécessaire à la description et la classification. La méthode utilise le fait que

dans le milieu liquide au repos, la vitesse de décantation des particules fines est fonction de leur dimension.

IV.3.1.2. But : c'est la détermination de la distribution pondérale de la taille des particules de sols de dimension inférieure à 0.08mm

IV.3.1.3. Principe de l'essai de sédimentation

-Tamiser l'échantillon de sol par lavage (passant au tamis 0.08mm), et récupérer le tamisât, sécher l'échantillon dans une étuve jusqu' au poids constant, prendre à 80g +10g de tamisât sec. Imbibber la prise d'essai dans une éprouvette cylindrique en verre de 2litre contenant un mélange d'eau distillée ou déminéralisée et solution à 5% d'hexamé ta phosphate de sodium ($\text{Na}_6(\text{PO}_3)_6, 10 \text{H}_2\text{O}$); figure (IV – 5).



Figure (IV-5): Appareil Agitateur et Solution.



Figure (IV-6): Essai de Sédimentation.

Les résultats des analyses granulométriques, synthétisés dans le tableau 3.2, ont montré que notre sol est constitué de plus de 50% d'éléments inférieurs à 80 μm .

IV.4.4. Limites d' Atterberg NF P 94-051

IV.4.4.1. Objectif : La limite d'Atterberg détermine l'état de consistance d'un sol et des constantes physiques conventionnelles qui marquent les seuils entre les états d'un sol.

IV.4.4.2. Principe

1. Procéder à un quartage afin que l'échantillon soit représentatif.

2. Imbiber l'échantillon dans un récipient.
3. Tamiser l'échantillon dans un tamis 0.04mm et récupérer le tamisât.
4. Sécher le matériau dans une étuve réglée à 105°C pour les sols non gypseux à 55°C pour les sols gypseux.
5. Placer l'échantillon de sol dans la coupelle et tracer un sillon avec l'outil à rainurer, par convention, la limite de liquidité est la teneur en eau du matériau qui correspond à fermeture d'un cm (1cm) des lèvres de la rainure après



Figure (IV– 9) : Limite de Liquidité

Prélever à l'aide d'une spatule deux échantillons des lèvres de la rainure dans des godets qu'on pèse puis les porter à l'étuve



Figure (IV– 10) : Limite de Plasticité.



6. Calcul la limite de liquidité.

7. Limite de plasticité I_p

A partir d'une boulette qu'on roule, sur marbre, à la main en forme un rouleau mince jusqu'à 3 mm de diamètre sur une longueur de 10 à 15 cm

Principe de l'essai :

La détermination des limites d'Atterberg est fondamentale dans le cas des argiles car elles permettent d'évaluer la plasticité qui est une propriété très importante pour les sols argileux. [57].

Limite de liquidité (WL) : correspond à la teneur en eau permettant un éloignement des particules suffisant pour annuler pratiquement les forces interparticulaires ce qui leur permet un libre déplacement relatif ;

Limite de plasticité (WP) : correspond à la teneur en eau suffisante pour permettre une certaine liberté de déplacement relatif des particules mais trop faible pour les éloigner au point de réduire fortement les forces de liaisons entre elles.

Indice de plasticité (IP) : $IP = WL - WP$: celui-ci correspond à l'amplitude du domaine plastique dans lequel le matériau peut subir des déformations irréversibles à volume constant sous contraintes.

Limite de retrait (WR) : c'est la teneur en eau qui sépare l'état solide avec retrait de l'état solide sans retrait (elle correspond à la quantité d'eau juste nécessaire pour combler les vides d'un sol lorsque celui-ci est à son volume minimum).

Indice de retrait (IR) : $IR = WL - WR$

Les résultats des limites d'Atterberg trouvés sont récapitulés dans le tableau suivant :

Tableau 3. 3 : Présentation des valeurs des limites d'Atterberg.

WL (%)	WP (%)	IP (%)	WR (%)	IR (%)
55.53	22.91	32.62	2,3	64

IV.4.4.3. Appareil de Casagronde : il est constitué d'une coupelle normalisée, montée sur un support métallique avec manivelle, le tout étant fixé sur un socle en bois bakélinisé L'ensemble permet de faire tomber la coupelle d'une hauteur de 10mm sur le bloc de bois dur, chaque choc entraînant la fermeture progressive de la rainure pratiquée dans l'échantillon de sol, celle-ci ayant été effectuée à l'aide de l'outil à rainurer *Figure (IV-11) R.Dupain R.Lanchon J.C.Saint.Arroman*



(Cas a , b)

Figure (IV-11) : Appareil de Casagrande(cas a, b)

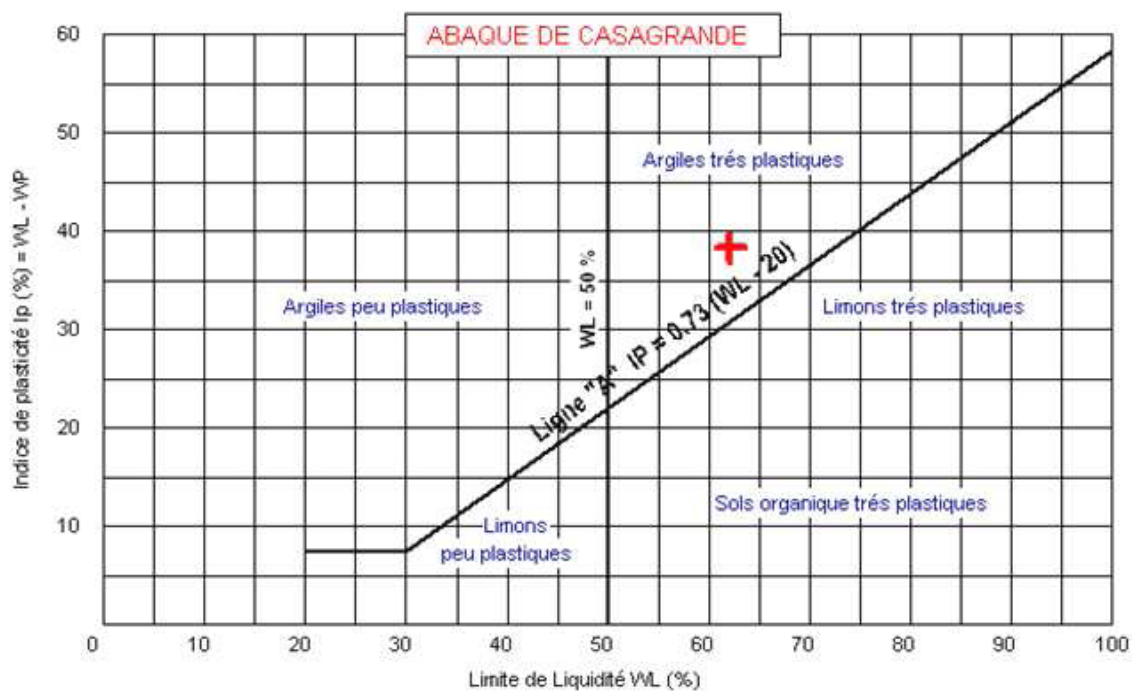
Préparation l'échantillon figure (IV – 12) : pendant évacuation l'échantillon d'étuve malaxe les échantillons



Figure (IV– 12) : Préparation de L'échantillon.

IV.4.4.4 Calcul et Résultats

La limite d'Atterberg, l'indice de plasticité (22.91) la limite de liquidité (55.53) et la limite de plasticité (32.62) sont des paramètres géotechniques destinés à identifier les sols caractériser leur consistance et permettre de ce fait de les classer dans la courbe de Casagrande et estimer à échantillon très plastique voire la figure (IV-13)



Valeur au bleu de méthylène

Cet essai est une mesure indirecte de la surface spécifique des grains solides par adsorption d'une solution de bleu de méthylène jusqu'à saturation. En d'autres termes, il exprime la quantité de bleu de méthylène pouvant être

absorbée par les surfaces des particules de sols. Le résultat VBS s'exprime donc en grammes de bleu pour 100g de sol.

On considère que cet essai exprime globalement la quantité et la qualité de l'argile contenue dans un sol.

Il s'agit d'un autre paramètre permettant de caractériser l'argilosité d'un sol mais dont l'application à l'identification des sols remonte seulement à quelques

Tableau 1.8 : Type de sol en fonction du % en CaCO_3

Teneur en Carbonate en %	Type de sol
0 – 10	Non marneux
10 – 30	Faiblement marneux
30 – 70	Marneux
70 – 90	Calco – marneux
90 – 100	Calcaireux – crayeux



c) La teneur en matières organiques : « MO »

C'est le quotient de la masse de matières organiques contenues dans un échantillon de sol par la masse totale des particules solides minérales et organiques. Sa détermination se fait par calcination.

Tableau 1.9 : Type de sol en fonction du % en MO

Teneur en matières organiques (MO%)	Type de sol
MO < 3	Non organique
3 < MO < 10	Faiblement organique
3 < MO < 30	Moyennement organique
MO > 0	Très organique

Les résultats des valeurs au bleu de méthylène sont récapitulés dans le tableau

Résultats		Type de sol
Teneur en matières organiques (MO%)	3.03	Faiblement organique
Teneur en Carbonate en %	44.28	Marneux

Tableau 3.4 : présentation des valeurs au bleu de méthylène.

CONCLUSION :

permet d'orienter les analyses géotechniques ultérieures et surtout d'effectuer une classification des matériaux rencontrés. Les paramètres nécessaires pour cette classification sont aussi bien de nature physico-chimique que granulométrique ce sont des marneux très plastiques. Le tableau 1 donne les résultats de l'ensemble des essais effectués sur les sols étudiés.

Tableau 1. Identification des sols étudiés

Paramètres physiques et chimiques de sol											
Profondeur (m) de sol	g d(kN /m3)	Wo p m (%)	Sr (%)	(%)_ Matière organique	wl (%)	wr	lr	wp (%)	Ip (%)	% 80mu	Caco3
4m	1.68	17.2	79.59	3.03	55.53	2.3	64	22.91	32.62	88.80	44.28

1.4.2 Phénomène de gonflement de argile :

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

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

.1.2. Les argiles

Les argiles sont des sols très sensibles à d'eau. Elles sont à l'origine de nombreux désordres dans les constructions. Elles peuvent être classées en deux grandes catégories :

1. argiles plastiques : indurés et très déformables.
2. argiles raides : indurées et présentent un comportement plus fragile que de la limite d'élasticité. Ceci à cause de la présence des carbonates et du quart microscopique.

Les argiles sont formées par l'assemblage de particules de taille inférieure à 2 μm chargées négativement comme la Smectite, l'Illite et la Kaolinite. La présence de tels minéraux rend l'argile fortement sensibilité aux molécules polaires d'eau. Cette sensibilité se traduit par le gonflement et/ou le retrait du sol. C'est la variation de la teneur en eau qui est le facteur déclenchant des variations de volume. Une augmentation de la teneur en eau

entraîne le phénomène de gonflement tandis que sa diminution induit le phénomène de retrait. La variation du volume des argiles est fortement influencée par les facteurs microscopiques et macroscopiques. A l'échelle microscopique, ces facteurs sont complexes et dépendent principalement des propriétés minéralogiques des matériaux argileux et des propriétés chimiques du fluide hydratant. A l'échelle macroscopique, ils dépendent des liaisons électriques entre les particules.

I.3. Structure élémentaire des minéraux argileux

Tous les minéraux argileux sont composés par l'assemblage, en réseau cristallin, d'eau (H₂O), de silice, sous forme de silicates (SiO₃) et d'aluminium, sous forme d'alumine (Al₂O₃). Leur structure élémentaire, appelée feuillet, est constituée d'un arrangement de deux cristaux de base : silicates et alumines. Chaque minéral argileux est composé d'un empilement de feuillets (Tarek Kormi 2003). Ce dernier a un nombre variable de couches pouvant être regroupées en deux types :

1- Le tétraèdre de silice SiO₄ (Te)₄ : 4 atomes d'oxygène disposés au sommet d'un tétraèdre régulier enserrant un atome de silicium. Les tétraèdres se combinent entre eux pour former des couches planes dites couches tétraédriques (Freeah 2006) (Fig. I-1).

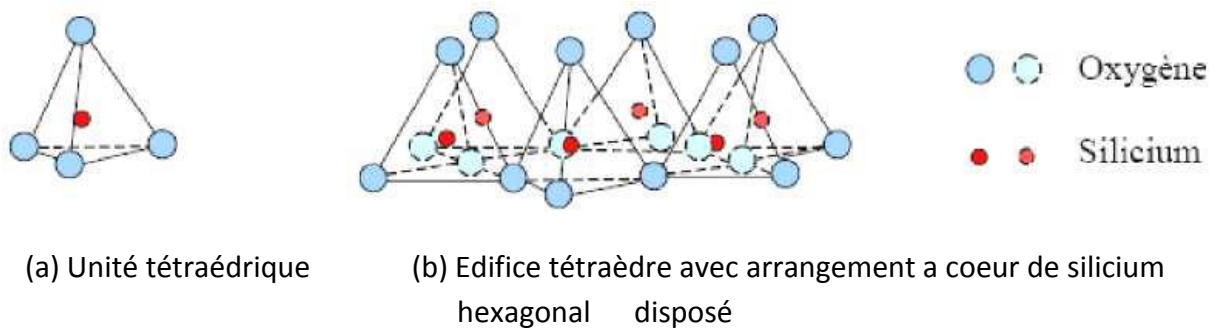


Figure (I-1) : Structure Élémentaire Tétraédrique (Freeah 2006).

2- L'octaèdre d'alumine Al₂(OH)₆ et éventuellement de magnésium Mg₃(OH)₆ (Oc):

6 ions hydroxydes enserrant un atome d'aluminium ou de magnésium. Les octaèdres se combinent également pour former des couches planes dites couches octaédriques

a) Unité octaédrique b) Structure en couche à base d'octaèdre de

Brucite Mg (OH)₂ ou de Gibbsite Al (OH)₃

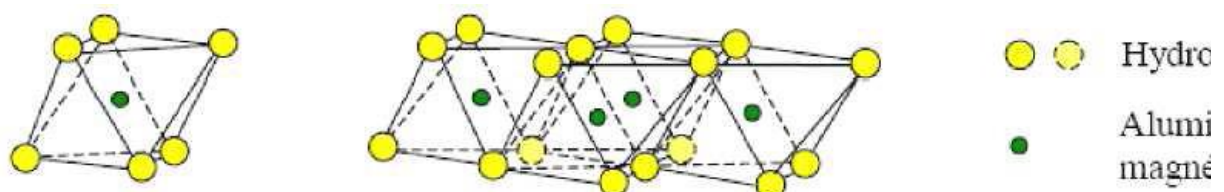


Figure (I- 2) : Structure Elémentaire Octaédrique (Freeah 2006).

I.4. Structure moléculaire microscopique des argiles

Le feuillet élémentaire se compose d'un empilement de 2 ou 3 unités de base. Les liens covalents et les liaisons ioniques assurent l'assemblage des feuillets élémentaires.

Les forces de liaison entre feuillets sont principalement :

- les forces d'attraction moléculaires de qui sont des liaisons faibles
- les liaisons hydrogène qui apparaissent avec des atomes fortement électronégatifs, comme l'oxygène.
- les substitutions isomorphes qui consistent en le remplacement de certains cations constitutifs du réseau cristallin par d'autres de moindre valence. Ce dernier phénomène crée des déficits de charge qui affaiblissent les forces ioniques de liaison entre les feuillets (remplacement d'un ion Si^{4+} par in ion Al^{3+} dans la couche octaédrique d'aluminium.

Les particules sont donc soumises à un ensemble de forces d'attraction et de répulsion qui varient avec la teneur en eau et dépendent des substitutions isomorphes. Malgré la simplicité apparente de la structure des argiles, on en compte un grand nombre d'espèces, qui se distinguent par les défauts liés aux substitutions isomorphes au moment de la formation Trois types d'argile sont couramment rencontrés : la Kaolinite, l'Illite et la Montmorillonite (Freeah 2006).

I.4.1. La Kaolinite :

(Si_4O_{10}) Al_4 (OH) 8 Le feuillet élémentaire est composé d'une couche de silice et d'une couche d'alumine. Entre différents feuillets de kaolinite, le contact se fait entre un plan contenant les ions hydroxydes. OH^- de l'octaèdre, et celui contenant les ions d'oxygène O^{2-} du tétraèdre. Dans ce cas, les liaisons interfoliaires résultent de l'effet composé de liaisons hydrogène et de forces de Van Der Waals, ce qui se traduit par un lien assez fort. Ainsi une particule de kaolinite sera constituée, par exemple, de quelques centaines de feuillets et pourra avoir une épaisseur de quelques dizaines de micromètres. Les particules sont stables et leur structure élémentaire n'est pas affectée par la présence d'eau (Fig. I-3)

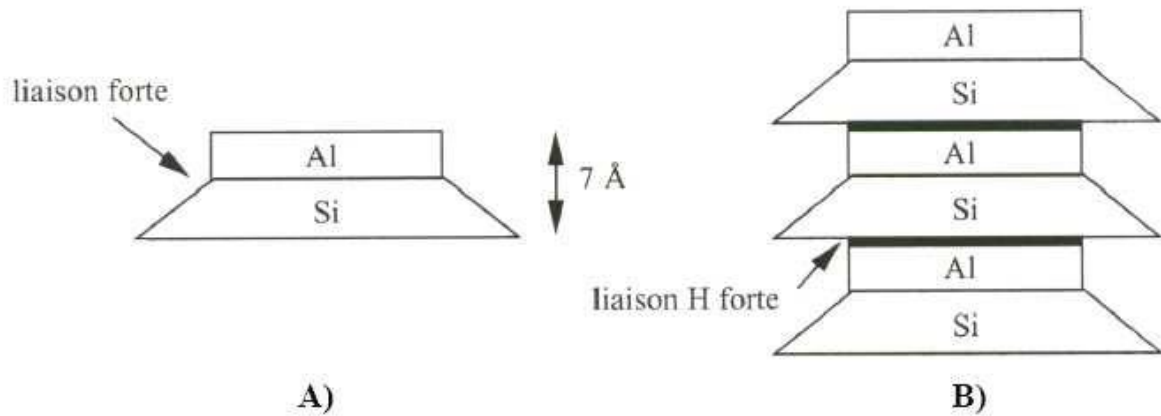


Figure (I-3) : Structure Particulare de la Kaolinite,

(Mouroux et al., 1987) (Freeah 2006).

I.4.2. L'Illite : $(K, H_2O)_2 Si_8 (Al, Fe, Mg)_{4,6} O_{20} (OH)_4$: Le feuillet élémentaire est

composé d'une couche d'alumine comprise entre deux couches de silice. Dans les couches de silice, un ion Si^{4+} sur quatre est remplacé par un ion Al^{3+} . La charge qui en résulte est compensée par les ions potassium K^+ qui assurent des liaisons assez fortes entre les feuillets. La particule d'Illite comportera, par exemple, une dizaine de feuillets et pourra avoir une épaisseur de quelques centièmes de micromètres. L'espace créé à l'intérieur du feuillet de silice est occupé par un ion K^+ qui, par sa présence, induit un lien fort entre les couches (Freeah 2006) (Fig. I-4).

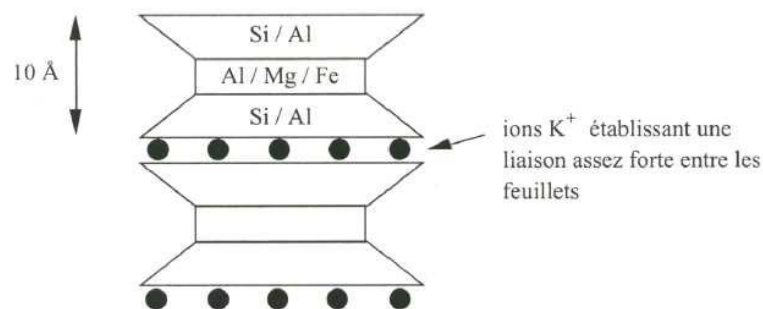
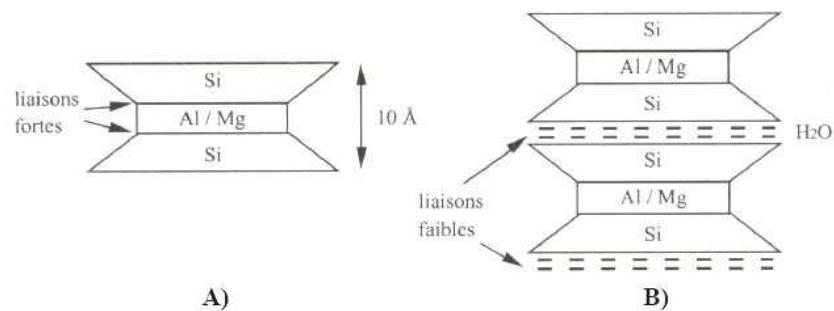


Figure (I- 4) : Structure Particulare de L'Illite,

(Mouroux et al., 1987) (Freeah 2006).

I.4.3. La Montmorillonite :

$(OH)_4 Si_8 (Al_{10/3}, Mg_{2/3}) O_{20}, n H_2O$ (6) Le feuillet élémentaire est composé, comme pour l'illite, d'une couche d'alumine comprise entre deux couches de silice. Un ion Al^{3+} est remplacé par un ion Mg^{2+} dans les couches d'alumine (Fig. I-5). Le déficit de charge qui en résulte est compensé par des ions Ca^{2+} (montmorillonite calcique) ou par des ions Na^+ (montmorillonite sodique). La valence des ions sodium étant plus faible que celles des ions calcium. C'est la montmorillonite sodique qui aura la plus grande surface spécifique et la plus grande C.E.C. Les liaisons entre feuillets étant très faibles, ces argiles sont très sensibles à la teneur en eau et ont un fort potentiel de gonflement. L'épaisseur d'une particule de montmorillonite peut-être très faible puisque, contrairement à autres argiles, on peut isoler un feuillet élémentaire. La montmorillonite fait partie de la famille plus générale des smectites définies comme argiles gonflantes.



. Figure (I-5) : Structure Particulaire de la Montmorillonite,

(Mouroux et al., 1987) (Freeah 2006).

2. Identification du potentiel de gonflement des sols argileux

L'identification des sols gonflants est généralement abordée à partir des paramètres physico-chimiques facilement mesurables lors des essais préliminaires.

Or, cette identification se trouve compliquée par l'existence de plusieurs approches qui ne se basent ni sur les mêmes paramètres ni sur le même nombre.

Le recensement à partir de la bibliographie (Djedid et al., 2001, Bultel F., 2001 et Khemissa M. et al., 2005) des classifications permet de les ranger en trois classes en fonction du nombre de paramètres physico-chimiques utilisés.

Ainsi, la classification d'Altmeyer (1955) donnée par le tableau I, celle de Seed,

Woodward et Lundgren (1962) donnée par le tableau II, celle de Ranganatham et Satyanarayana (1955) donnée par le tableau III et celle de Snethen (1980) donnée par le tableau IV se basent tous sur un seul paramètre.

Les classifications basées sur deux paramètres sont celle établie par l'établissement de recherche en bâtiment (Grande Bratagne, 1980) donnée par le tableau V, celle établie par Ghen (1988) donnée par le tableau IV, celle établie par Vijavergia et Ghazzaly (1793) et celle établie par Dakshanamurphy et Raman (1973). Ces deux dernières classifications utilisent l'abaque de plasticité de

5. Classification des sols expansifs :

Procéder à une classification convenable des paramètres géotechniques représentatifs du gonflement sont con difficulté réside dans la de la famille des phyllo silicates est basé sur un veut que ce soit la pression et l'amplitude de gonflement qui soient utilisées pour caractériser les sols expansifs. La littérature contient un nombre considérable d'approches empiriques qui

permettent d'apprécier le potentiel de gonflement des sols. Certains auteurs pensent relier ce potentiel à un seul paramètre. Ainsi et comme le montre les tableaux 2,3 et

4 ci-dessous, Altmeyer, Ranganatham et Satyanarayan et Snethen proposent des classifications qui donnent respectivement le potentiel de gonflement en fonction de la limite de retrait WR, de l'indice de retrait IR et de l'indice de plasticité IP.

WR (%)	Potentiel de gonflement
< 10	Forte
10 – 12	Critique
> 12	Faible

. *Tableau2.Potentiel de gonflement d'après Altmeyer 1955)*

Taux de gonflement	Sp (%)	Ip
Faible	0-1.5	1,5 – 5
Moyen	1.5-5	10 – 20
Elevée	5-25	20 – 35

Tableau3.*Potentiel de gonflement d'après Seed, Woodward et Lungreen (1962),*

IR	Potentiel de gonflement
0-20	Faible
20-30	Moyen
30-60	Fort
> 60	très fort

Tableau4.*Potentiel de gonflement d'après Ranganatham et Satyanarayan (1965),*

P<2nm	Ip(%)	WR(%)	L'indice de retrait (%)	Gonflement de potentiel
>28	>35	<10	> 30	Tres eleve
20-30	20-40	7-10	20-30	Eleve
13-23	15-30	10-15	10-30	Moyen
>15	<18	>15	<10	Faibel

Tableau 6. *Potentiel de gonflement d'après Holtz Et Gibbs (1956),*

p<74mm	WL (%)	Pression de gonflement (6ans)	Potentiel de gonflement
> 95	> 60	10	Très élevé
60-95	40-60	2.5-5	Elevé
30-60	30-40	1.5-2.5	Moyen
<30	<30	<0.5	Faible

Tableau7.Potentiel de gonflement d'après Ghen (1988)

Potentiel de gonflement	Ip (%)	WR(%)	WL (%)
Faible	<18	> 17	35-20
Moyen	25-15	15-10	35-50
Fort	41-25	12-7	70-50
Très fort	> 35	<11	> 70

Tableau8.Potentiel de gonflement d'après Holtz, Dakshanamurphy et Raman(1973)

6. Corrélation entre le gonflement et les paramètres physico-chimiques :

Afin de tester la comparaison des classifications citées ci-dessus, elles ont été appliquées à des échantillons de sols étudiés , Les identifications sont données dans le tableau 9. De ces classifications, il se dégage les remarques suivantes :

Certaines classifications comme celle d'Altmeyer ont tendance à surestimer le potentiel de gonflement des sols puisqu'elle donne tous les échantillons comme fortement expansifs. Les diverses classifications ne convergent pas toutes vers la même qualification du potentiel expansif pour le même échantillon Ces contradictions trouvent leurs explications dans le nombre et la nature des paramètres pris en compte par chacune de ces classifications. Il y a lieu de relever que les paramètres déterminants dans le caractère expansif d'un sol sont tous connus. Par contre, l'incidence de chaque paramètre dans ce caractère expansif est difficile à quantifier

So l	Altme Yer	Ranganat h am et Satyanara yan	Sneth en	Seed, Woodwa rd et Lungree n	Gh en	Holtz et Gibbs	Holtz, Dakshanamur t Hy

Chapitre 3 : Comportement physique des mélanges (argile +chaux

4.1 Introduction

**la définition du traitement (nature et dosage du «liant ») et l'apport de ce traitement en terme de portance obtenue

.Le traitement des sols est souvent opéré 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 comme dans le cas des sols expansifs.

Ce chapitre a pour but de voir le comportement physique des mélanges traités par le biais des essais des limites d'Atterberg , des essais au bleu et des essais Proctor normal et

modifié sur les mélanges composés de la sol argileuse identifiée et classifiée (chapitre2) et de la chaux avec des proportions variées (G= 2, 4, 6et 8%).

4.2. Préparation des mélanges

La préparation des mélanges est faite selon la norme française.

La méthode que l'on utilise pour la préparation des mélanges est simple et nécessite des moyens de laboratoire :

- * Des bacs
- * Des petites pelles
- * Une étuve
- * Balance électrique
- * Des tamis

On prend chaque fois une quantité de marnes tamisées à 5 mm puis on ajoute des quantités De chaux suivant le pourcentage voulu.

Le mélange est mis dans un bac ; le malaxage du mélange se fait à sec à l'aide des pelles jusqu' a l'homogénéisation, cette opération dure environ 5 à 10 min pour éviter la perte de la réactivité chaux



(A) avant le malaxage

Photo N°2 : Préparation des mélanges au laboratoire



(B) après le malaxage

4.3 Effet de la chaux sur les limites d'Atterberg et la limite de retrait

Plusieurs auteurs ont essayé de relier le gonflement et la sensibilité du sol à l'eau avec les limites de consistance des sols argileux. A cet effet nous allons étudier l'influence des différents pourcentages de gypse sur les limites d'Atterberg de la marne argileuse. De la même façon que l'état naturel, les

limites d'Atterberg des mélanges sont déterminés selon les normes françaises NF P94-051 et NF P94-060-1.

4.3.1. Résultats et interprétation

Les résultats des limites d'Atterberg sont représentés dans le tableau 4 .1.

Matériaux	WL (%)	WP (%)	IP (%)	WR (%)	IR (%)
Marne 0%	55.53	22.91	32.62		
1%	55.54	23.47	31.07		
2%	56.30	25.04	31.26		
3%	57.10	26.82	30.28		
4%	51.54	23.00	28.54		

Selon la figure 4 .1, les indices de plasticités et de retrait varient presque inversement proportionnelle avec l'augmentation du pourcentage de gypse.

L'augmentation du pourcentage de gypse implique une réduction importante des indices de retrait et de plasticité, un pourcentage de 4% de chaux fait réduire les deux indices d'un taux de 50%.

Figure 4 .1 : Variation des indices de plasticité et de retrait pour les différents pourcentages de chaux

Les limites de retrait et de plasticité varient presque linéairement avec l'augmentation du pourcentage de chaux (Figure 4. 2), contrairement pour les limites de liquidité qui ne donnent aucun signe de changement, elles gardent presque la même valeur du sol non stabilisé.

Figure 4.2 : Variation des indices de plasticité et de retrait pour les différents pourcentages de chaux

Les mêmes résultats sont constatés par nombreux chercheurs [2], [9], [64].

D'après les résultats trouvés et suivant les différentes classifications du sol citées dans le chapitre 2, on peut dire que l'addition de la chaux éteinte à notre argile avec les pourcentages 1, 2, 3 et 4% implique une réduction de plasticité et de retrait donc une réduction du degré de gonflement, également une diminution de la, sensibilité à l'eau. L'addition de la chaux peut faire passer un sol de l'état plastique

(déformable, collant - donc difficilement compactable) à l'état sec (rigide, frottant, friable - donc beaucoup plus facile à travailler).

4.4. Effet de la chaux sur la valeur au bleu de méthylène

La valeur au bleu est l'un des paramètres physiques qui caractérise la sensibilité des sols

argileux, pour cela on va étudier la variation de ce paramètre en fonction des pourcentages de chaux proposés (G =1, 2, 3 et 4%).

4.4.1. Résultats et interprétation

Les résultats obtenus (figure 4. 3) mettent en évidence une révolution irréversible, une diminution presque linéaire de VB avec l'augmentation du pourcentage de chaux, de même que les limites d'Atterberg, on atteint un taux de réduction de 50% pour le mélange de 4%.

Figure 4. 3 : Variation des valeurs au bleu pour les différents pourcentages de chaux

Selon la classification de susceptibilité élaborée par Chassagneux et al (1996) cité dans le chapitre 3, l'addition de la chaux donne une diminution très importante de la sensibilité de la marne argileuse

4.5 Etude de la compactibilité des mélanges

La compactibilité d'un matériau est défini par son aptitude au compactage, celui-ci peut être considérée comme un effet statique ou dynamique qui s'exerce sur un sol pour réduire son volume des vides en réarrangement les éléments d'une façon optimale en faisant intervenir le pouvoir lubrificateur de l'eau et de l'argile. Le compactage modifie certaines propriétés du sol, notamment la résistance mécanique, la perméabilité et la susceptibilité au tassement et au gonflement [10].

4.5.1. Compactage des mélanges:

De même principe que l'état naturel, la préparation des mélanges et le compactage ont été effectuée selon le principe de l'essai normal et modifiée.

4.5.2. Résultats et interprétation

La sensibilité à l'eau des mélanges se traduit par des formes de courbes variées, selon la figure 4.4, on remarque que pour l'état naturel, la courbe de compactage soit à (l'OPN ou l'OPM) présente une forme accentuée, ce qui explique la grande sensibilité du sol. Pour les mélanges de C= 1, 2,3 et 4%, les courbes proctor sont déplacées vers la droite elles présentent une forme aplatie qui traduit la faible sensibilité des mélange à l'eau.

Figure 4. 4: Variation des caractéristiques de compactage à l'OPN pour les différents pourcentages de l'eau

Figure 4.5: Variation des caractéristiques de compactage à l'OPM pour les différents pourcentages de l'eau.

Cette tendance de variation des courbes Proctor de sol traité et non traité a été déjà observée par plusieurs auteurs (chapitre 2) , la courbe Proctor d'un sol traité à la chaux éteinte 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 4.6 : Variation de la densité sèche à l'OPN et l'OPM en fonction du pourcentage en chaux

Figure 4.7 : Variation de la teneur en eau à l'OPN et l'OPM en fonction du pourcentage en chaux

Par ailleurs, la teneur en eau à l'OPN et à l'OPM (Figure 4.8) augmente avec le pourcentage en chaux additionnée, elle atteint sa valeur maximale à un OPM de 15.3% pour un pourcentage de chaux de 4%.

Par ailleurs, la teneur en eau à l'OPN et à l'OPM (Figure 4.8) augmente avec le pourcentage en chaux additionnée, elle atteint sa valeur maximale à un OPM de 15.3% pour un pourcentage de chaux de 4%.

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 optimale.

L'augmentation de la teneur en eau optimale est due à la réaction d'hydratation de la chaux, puis la raison la diminution de la densité sèche maximum est le faible poids volumique de la chaux [44].

4.6 Conclusion

L'addition de la chaux implique une diminution importante de la plasticité et de retrait se qu'il faire passer le sol d'un état plastique à un état solide, friable, facilement travaillable et perd une partie de sa sensibilité à l'eau.

Le gypse attaque aussi les paramètres de la compactibilité, on constate une augmentation de la teneur en eau et une diminution de la densité sèche maximale

Les paramètres physiques des mélanges trouvés n'interviennent pas de façons explicites dans la caractérisation du comportement mécanique de ces matériaux

III.3. Techniques de stabilisation utilisées

2.1 Introduction

Le traitement des sols est souvent opéré 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 comme dans le cas des sols expansifs. Concernant ce traitement on peut spécifier [14]:

L'amélioration des sols : elle est appliquée aux sols ayant une grande plasticité (limon, argile), afin d'améliorer leurs caractéristiques géotechniques : facilité de mise en oeuvre et de compactage, portance et résistance au poinçonnement. Ceci se traduit par une meilleure praticabilité pour le trafic de chantier.

La stabilisation des sols : elle a pour objectif la réalisation des couches de fondations de qualité dont les caractéristiques mécaniques ont été considérablement rehaussées, ce qui donne une plus grande portance et une meilleure distribution des charges. En outre, ces couches acquièrent ainsi une meilleure résistance à l'érosion et au gel, augmentant dès lors

sensiblement leur durabilité. La stabilisation exige des pourcentages de 4 à 6 % de ciment ou d'une combinaison de ciment avec d'autres liants, tels que la chaux, les laitiers de hautfourneau ou l'émulsion de bitume.

Parmi les techniques de stabilisation les plus couramment utilisées, on distingue :

- * La stabilisation mécanique.
- * La stabilisation aux sables.
- * La stabilisation chimique (par additifs).

2.2 Stabilisation mécanique :

Nous citerons trois méthodes de stabilisation mécanique:

2.2.1 Méthode de substitution :

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

2.2.2 Méthode de compactage :

Elle consiste à baisser la densité en place du sol. Chen (1988), suggère pour les sols très expansifs, un compactage à faible densité [4].

L'argile expansive se développe très peu lorsqu'elle est compactée à une basse densité et une grande teneur en eau, contrairement à ce qui se produit pour un compactage à une grande densité et une faible teneur en eau : gonflement important.

2.2.3 Méthode de préhumidification :

Elle consiste à augmenter la teneur en eau du sol jusqu'à saturation, nous aurons donc le maximum de gonflement, Chen (1988) [4], cette méthode est basée sur les hypothèses suivantes :

* le sol permet un gonflement par humidification précédant la construction.

* Le mouvement de gonflement soit stabilisé lors de la construction réalisant ainsi un état de non soulèvement. Il faut donc compter sur la permanence de la teneur en eau artificiellement créée.

2.3 Stabilisation aux sables :

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

*Didier (1972), en étudiant un mélange de montmorillonite et de sable, a montré que 10% de sable suffisent à réduire la pression de gonflement d'environ 50%, cité par [35].

*Suratman (1985), a trouvé qu'un pourcentage de sable de 20% permet de réduire le gonflement libre de la montmorillonite seule de 42,3% à 26% cité par [35].

*Rao (1987), a montré que 40% de sable comme produit stabilisant ajouté à les argiles gonflantes de l'Inde connu sous le nom Black Cotton, a donné une valeur optimale de CBR et un accroissement de la résistance à la compression, de l'angle de frottement et de la cohésion, cité par [35].

*Aola (1987), a montré que l'ajout de sable à une argile gonflante (Nigeria Black Cotton) permet d'augmenter la densité sèche maximale, et diminuer la teneur en eau optimale, cité par [35].

*Bengara et al (2004), ont étudié l'évolution du potentiel de gonflement et sa pression par l'ajout du sable à différents pourcentages et granulométrie, ils ont remarqué une réduction importante du gonflement de cette argile. [9].

2.4 Stabilisation avec des additifs

Les additifs permettant d'améliorer les caractéristiques des sols sont classés en deux grandes familles : Les sels et les liants.

2.4.1 Les sels

Le principe de base est l'augmentation de la concentration ionique de l'eau libre et

l'atténuation du phénomène d'échange. C'est une technique utilisée surtout dans les pays développés, en particulier aux Etats Unis. De nombreux travaux de recherche ont été effectués en laboratoire en vue d'étudier l'influence des produits chimiques sur les propriétés des argiles.

Nous signalerons quelques exemples d'utilisation de ces produits servant à la stabilisation des sols argileux.

*Haxaire (1956) a étudié la fixation de plusieurs familles de molécules organiques sur la montmorillonite. Cette étude a permis de montrer que certaines molécules telles la guanidine et la benzidine, se fixent irréversiblement, en quantité supérieure à la capacité d'échange de base, sur la montmorillonite, cité par [32].

*Hazart et Wey (1965), ont étudié la cinétique du gonflement de montmorillonite en présence de l'éthylène glycol, au moyen de la diffraction X, et ont mis en évidence la formation du complexe argile-glycol en insistant sur le rôle important joué par le cation inter-foliaire, cité par [32].

*Dider (1972), s'est penché dans ses recherches sur l'influence des sels sur la pression du gonflement et le gonflement libre de la montmorillonite. Il a donné des relations exprimant

le gonflement en fonction du pourcentage théorique d'éléments inférieurs à 2μ et de l'indice de retrait de la montmorillonite pour divers fluides hydratants, cité par [11].

*Nabil et al, (2004), ont étudié l'effet des sels (KCl, NaCl, CaCl₂ et (NH₄)₂ SO₄) sur deux argiles, la première est une argile naturelle intacte extraite du site de Mansourah (Banlieue Ouest de la ville de Tlemcen) et la deuxième est une Bentonite de Maghnia (Située à 60 km à l'Ouest de Tlemcen). [1]

Les figures suivantes représentent l'amplitude du gonflement en fonction du temps de l'argile intacte de Mansourah à différentes concentrations des solutions salines utilisées. Ils ont montré que les sels minéraux ont une efficacité très forte sur le gonflement. Le KCl s'avère le sel ayant le plus d'effet sur le taux de gonflement est sur les limites d'Atterberg.

Une concentration en KCl de 0.5 mol/l a permis de réduire de près de 70% le taux de gonflement d'une argile de la famille des montmorillonites.

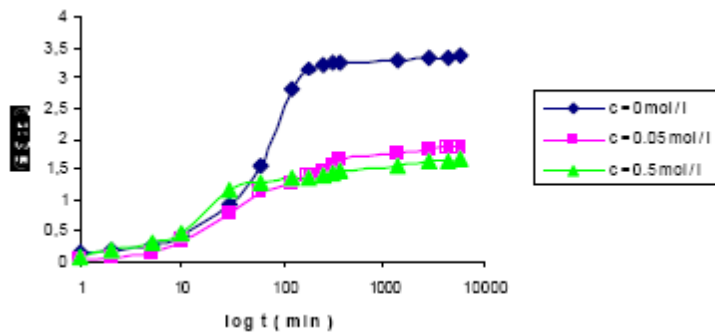


Figure 2.1 : Variation du taux gonflement de l'argile intacte de MANSOURAH en fonction du temps en présence du NaCl[1]

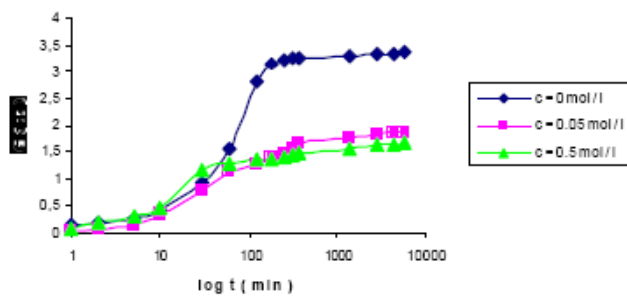


Figure 2.2: Variation du taux de gonflement de l'argile intacte de MANSOURAH en fonction du temps en présence du KCl [1]

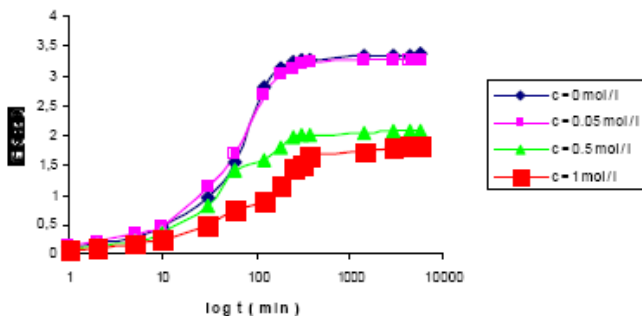


Figure 2. 3 Variation du gonflement en fonction du temps en présence du CaCl₂ de l'argile intacte de MANSOURAH [1]

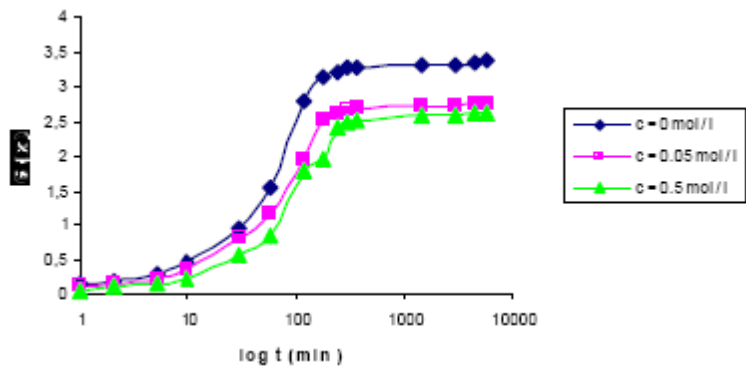


Figure 2.4: Variation du taux gonflement de l'argile intacte de Mansourah en fonction du temps en présence du $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ [1]

2.4. 2 Les liants

Les liants se divisent en deux grandes familles qui sont les liants hydrauliques et les liants organiques. les principaux liant existants dans l'industrie sont :

Liants	
Hydrauliques	Organiques
Ciments	Goudrons
Chaux	Bitumes
Cendres Volantes	Polymères
Laiteries + Chaux	
Pouzzolane	

2.4. 2.1 Liants organiques

Ce sont des produits de type colle, c'est à dire des composés organiques susceptibles d'une

bonne adhésion au squelette minéral. On en distingue deux sortes:

*Les mono-composants : composés d'un seul constituant à un caractère thermoplastique, ce sont par exemple les bitumes de pétrole, les goudrons et les brais de houille.

* Les bi-composants : composés de deux constituants qui sont mélangés au moment de la mise en oeuvre. Le résultat est intermédiaire entre le collage thermoplastique des mono composants et le scellement des liants hydrauliques, ce sont par exemple des polymères, des résines. L'action de ces produits donne au sol des propriétés hydrophobes qui dépendent de

l'enrobage des particules du sol par le liant. L'inconvénient majeur de ces liants organiques est leur biodégradabilité sous des climats tropicaux.

De nombreux chercheurs ont travaillé sur ce genre de traitement :

*Vessely et al (2002), ont montré que les inclusions de géosynthétiques sont efficaces sur la réduction du potentiel de gonflement des sols expansifs [61]

*Ikizler et al 2008, ont reporté que la réduction du potentiel et la pression de gonflement est le résultat de l'inclusion de polystyrène placé entre un sol expansive et un mur rigide. [31]

*Tang et al (2007), montrent que le renforcement par les fibres augmente la résistance à la compression et permet de réduire le potentiel de gonflement des argiles expansives. [55]

*Cai et al (2006), reportent que l'augmentation de contenu en fibre implique une réduction

dans le potentiel de gonflement des argiles stabilisées à la chaux. [16]

* Viswanadham et al (2006), ont montré que les mélanges renforcés par les fibres engendrent une grande réduction du gonflement avec des faibles pourcentages (0.25%) et

des petites ratios de 15 et 30 (Figure 2. 5). [62]

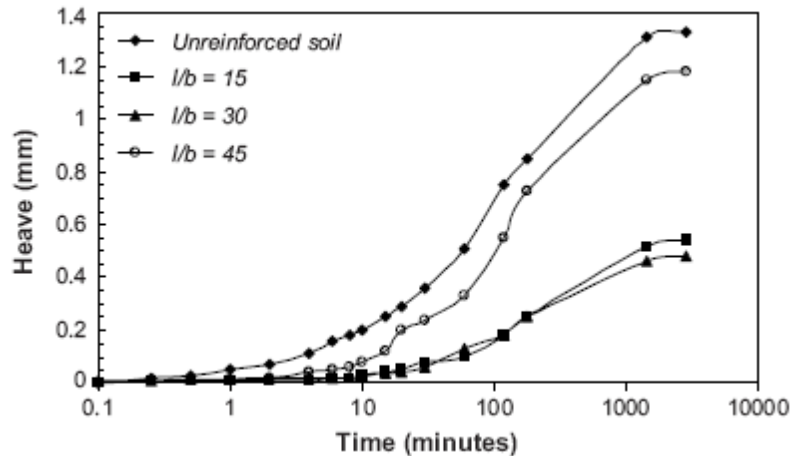


Figure 2. 5: Variation du gonflement en fonction du temps ($f = 0.25\%$). [62].

f continue de fibre dans le sol l largeur de fibre b longueur de fibre

2.4. 2.2 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. Ils sont tous à base de la chaux qui va réagir avec l'argile par échange

cationique, floculation et agglomération, carbonatation et par réaction pouzzolanique. Ces réactions se traduisent par une amélioration immédiate des propriétés mécaniques du sol et

une diminution de la sensibilité à l'eau par floculation et échange cationique.

2.4. 2.2 .1 Stabilisation au ciment :

Le traitement au ciment convient plus particulièrement aux sols peu plastiques, qui sont à priori inadaptés au traitement à la chaux du fait de leur faible teneur en argiles, auxquels il apporte cohésion, résistance mécanique et stabilité à l'eau et au gel.

Le ciment rigidifie rapidement le sol de manière irréversible mais s'il y a rupture de

l'horizon traité (action mécanique) il n'y a pas de nouvelle prise. Les constituants hydratés du ciment relient les grains de sable entre eux en formant des sortes de ponts nombreux et

solides, d'où l'augmentation de la portance, de la résistance mécanique et de la résistance au gel. Les doses varient de 3,5 à 5 % du poids de sol sec à traiter. [12].

Dans les sols argileux, la réaction chimique sol-ciment est le responsable de son amélioration. Le processus d'hydratation du ciment produit les deux majeurs produits : les CSH et la chaux, l'interaction de cette chaux avec les minéraux argileux du sol joue un rôle essentiel en terme de processus de stabilisation sol- ciment. [49].

*D'après Léonarde, cité par [35], une argile très plastique traitée avec 10% de ciment acquière une résistance à la compression de plus de 3,5 bars.

*D'après Chen, Jones, cité par [35], le traitement de l'argile gonflante de Porterville de Californie avec 2 à 6% de ciment portland, présente une réduction considérable du potentiel de gonflement.

L'action de stabilisation par les ciments, est complexe et dépend de la nature du sol, de la teneur en ciment, de la teneur en eau et des conditions de température. De plus, la présence

de la chaux dans les ciments provoque des réactions d'échange. Les pourcentages utilisés varient de 2 à 6%. Le ciment est parmi les liants les plus fréquemment utilisés dans le traitement des sols de surface. [56].

*D'Après Haofeng et al (2009), la résistance à la compression à 7, 14 et 28 jours, augmente au fur et à mesure que l'augmentation du pourcentage en ciment (figure 2. 6)[28]

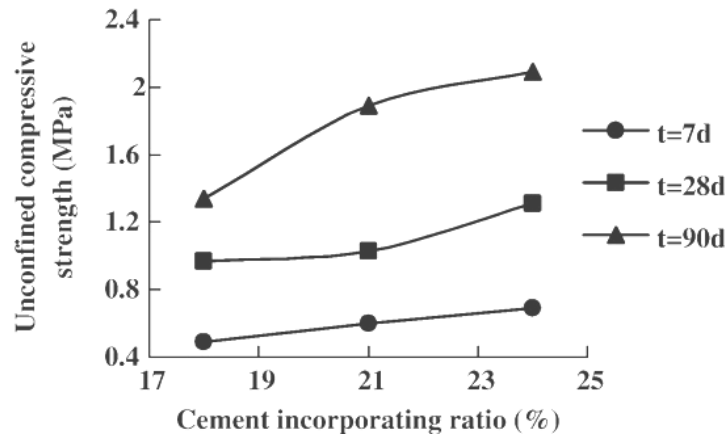


Figure 2. 6: Variation de la résistance à la compression en fonction du pourcentage en ciment à différentes durées de cure [28]

Les quatre mécanismes contribuant à la stabilisation au ciment des sols argileux sont résumés et classés selon leur importance comme suit :

.hydratation par ciment : les fortes interactions se développent entre les particules de sol.

Le plus haut squelette continu des formes matérielles dure et fortes et enferme une matrice

de sol inchangé, renforçant le matériel traité et en remplir des vides Echange cationique : l'échange cationique change la charge électrique, réduit la plasticité et a pour résultat la floculation et l'agrégation des particules de sol. Carbonation : la chaux libre produite pendant l'hydratation du ciment réagit avec de l'anhydride carbonique en air aux agents de cimentages de forme.

Réaction pouzzolanique : la chaux libre libérée pendant l'hydratation réagit avec la silice ou l'alumine des particules d'argiles en présence de l'humidité pour former les agents de cimentation.

2.4. 2.2 .2 Stabilisation aux cendres volantes

Les cendres volantes sont un sous-produit des centrales thermiques qui brûlent le charbon en poudre. Elles sont considérées comme une pouzzolane artificielle et s'emploient comme

telle, avec du ciment pour faire du béton ou dans le sol-ciment. Les cendres volantes ont été employées aussi avec de la chaux dans la stabilisation des sols. [38].

Zalihe Nalbantoglu, (2004) ; a étudié la stabilisation des argiles gonflantes par les cendres volantes. Les résultats d'essai en laboratoire sur ces sols indiquent que ces cendres volantes sont efficaces à l'amélioration de la texture et la plasticité des sols traités. Elles permettent de réduire l'indice de plasticité et le potentiel de gonflement [42].

2.4. 2.2 .3 Stabilisation à la chaux

La stabilisation par ajout de la chaux est la technique de traitement des sols la plus répandue, elle concerne essentiellement les sols fins (argileux, limoneux et marneux)

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 se basant sur les essais de laboratoire, les essais de chantier et sur le prix de revient.

a. Chaux vive

La chaux vive diminue la teneur en eau du sol via trois phénomènes distincts:

- L'hydratation de la chaux vive: une partie de l'eau «disparaît» via la réaction exotherme avec la chaux vive $\text{CaO} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Ca}(\text{OH})_2$
- L'évaporation d'une partie de l'eau, provoquée par la chaleur dégagée par l'hydratation de la chaux vive.
- L'apport de matière sèche qui diminue le rapport de la masse d'eau à la masse de solide (teneur en eau). La diminution attendue est de 1 % de teneur en eau par pourcentage de chaux vive

introduite. Si les conditions atmosphériques sont bonnes, la teneur en eau peut diminuer encore plus sous les effets du malaxage et du vent.

b. Chaux éteinte

b .1 Action à court terme La chaux éteinte diminue également la teneur en eau mais uniquement via l'apport de matière sèche dans le sol. La chaux influe sur les charges électriques se trouvant autour des particules d'argile et modifie ainsi les champs électriques entre ces particules. Ceci entraîne

leur floculation, et des conséquences non négligeables sur les caractéristiques

géotechniques du sol. L'expérience a montré que suite à un traitement, certaines modifications se produisent sur les caractéristiques du sol.

Influence de la chaux sur la teneur en eau et les limites d'Atterberg

L'ajout de la chaux, permet de réduire la plasticité, le retrait et la sensibilité des sols par une augmentation immédiate de la limite de plasticité (w_p), la limite de retrait la limite (w_r), réduction de la valeur au bleu de méthylène, et une conservation de la valeur de la limite de liquidité (w_L). [9] [64].

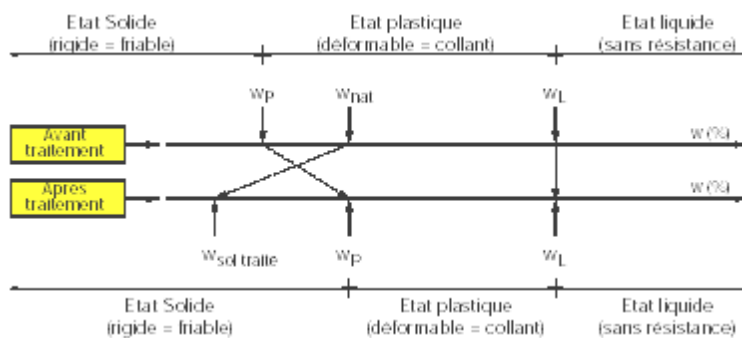


Figure 2. 7: Variation de l'indice de plasticité avec l'ajout de la chaux. [9].

La figure (2. 7) montre que les phénomènes combinés de la diminution de la teneur en eau naturelle du sol traité et de la diminution de l'indice de plasticité peuvent faire passer un sol

de l'état plastique (déformable, collant -donc difficilement compactable) à l'état sec (rigide,

frottant, friable - donc beaucoup plus facile à travailler). Afès et Didier (1999), ont étudié l'influence de la chaux sur les limites d'Atterberg de l'argile gonflante de Mila, la figure 2. 8 illustre le chemin suivi par cette argile suite à un traitement à 3 et 6% de chaux pour des temps de cure de 7, 28, et 90 jours. Ils ont remarqués que l'argile qui est de plasticité moyenne voit, après traitement à la chaux, sa consistance évoluer vers un limon de faible

plasticité. Cette évolution de la consistance liée

au pourcentage de chaux et à la durée de la cure, se traduit par une diminution de l'indice plasticité de. [2]

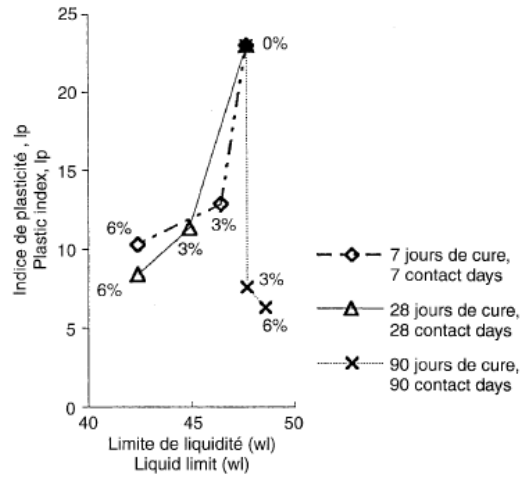


Figure 2. 8 : Variation des limites de consistance en fonction du temps pour 3 et 6% de chaux[2].

Influence de la chaux sur la valeur au bleu de méthylène

Afès et Didier (1999) [2], ont étudiée l'effet de la chaux sur la valeur au bleu de méthylène de l'argile gonflante de Mila, La Figure 2. 9 présente l'évolution de la valeur au bleu de méthylène en fonction de la quantité de chaux ajoutée, après 7, 28, et 90 jours. Ils ont remarqués une diminution continue de la valeur au bleu. Cette diminution est d'autant plus accentuée que la durée de la cure est lente.

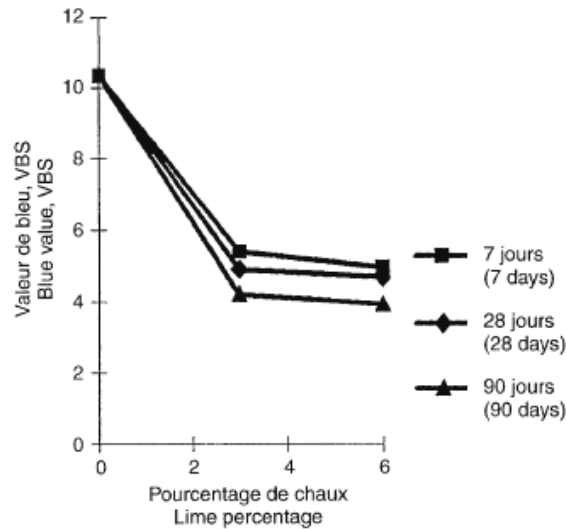


Figure 2. 9 : Evolution de la valeur au bleu de méthylène en fonction du pourcentage de chaux [2].

Influence de la chaux sur les caractéristiques de compactage

Afès et Didier (1999), Koliass et al (2005) , ont montré que le traitement à la chaux réduit la valeur maximale de la masse volumique sèche et augmente la valeur de la teneur en eau optimale et implique un aplatissement des courbes Proctor du sol. [2], [36].

La Figure 2. 10 représente l'argile traitée à 3 et 6% de chaux et compactée à l'énergie Proctor normal 30 min après l'adjonction de chaux. La courbe Proctor obtenue s'aplatit au fur et mesure que le pourcentage de chaux augmente. Ils ont vérifié que le traitement à la chaux conduit à une augmentation de la teneur en eau optimale et une diminution de la densité sèche maximale (Figure 2. 11).

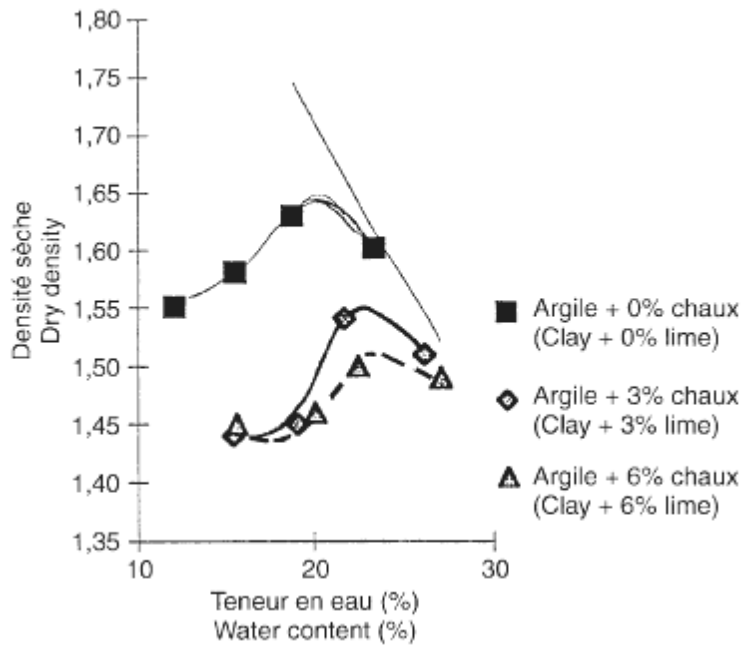


Figure 2. 10 : Courbe Proctor de l'argile de Mila traitée à la chaux et non traitée [2].

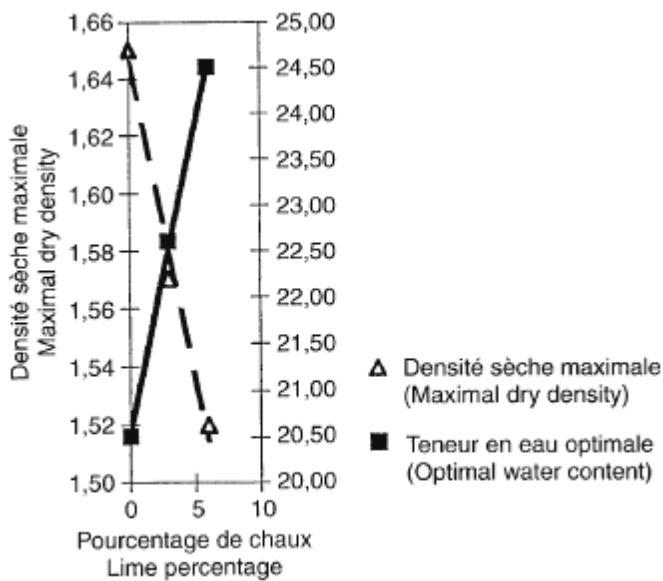


Figure 2. 11 : Evolution des caractéristiques de compactage en fonction du pourcentage de chaux [2].

b .2 Action à long terme

La stabilisation à long terme est due à une action pouzzolanique qui se produit par la mise en solution en milieu de pH élevé (supérieur à 12) de la silice, de l'alumine et des oxydes

de fer présents dans les minéraux argileux sous des formes cristallisées plus ou moins altérées. Ces éléments en solution réagissent ensuite avec la chaux pour former des ferrosilico-aluminates de calcium insolubles qui précipitent et cristallisent en présence d'eau, créant ainsi des liaisons de même nature que celles produites avec les liants hydrauliques. 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 volumes après gonflement et retrait.

Influence de la chaux sur la portance

Alimi-Ichola et Didier (1990), cité par [35], ont travaillé sur deux types de sols gonflants du Maroc en vue de leur réutilisation dans le domaine routier. Ils remarquent qu'une teneur

en chaux de moins de 6% suffit pour avoir de bons résultats vis à vis de la teneur à l'eau et de la portance. Malhotra (1987) cité par [35] a étudié un mélange de chaux avec une argile gonflante de Bhopal (Inde) avec 4% seulement de chaux. Il observe une nette amélioration de la valeur

du C.B.R, elle passe de 1,95 à 0% de chaux et de 43.8 à 4% de chaux.

Raymond et Ouhadi, (2006) ont étudié l'effet de la chaux sur le paramètre de portance CBR [49]. La figure 2. 12, montre que l'addition de pourcentage élevé de chaux augmente la valeur du CBR de la marne stabilisée donc une augmentation de la portance.

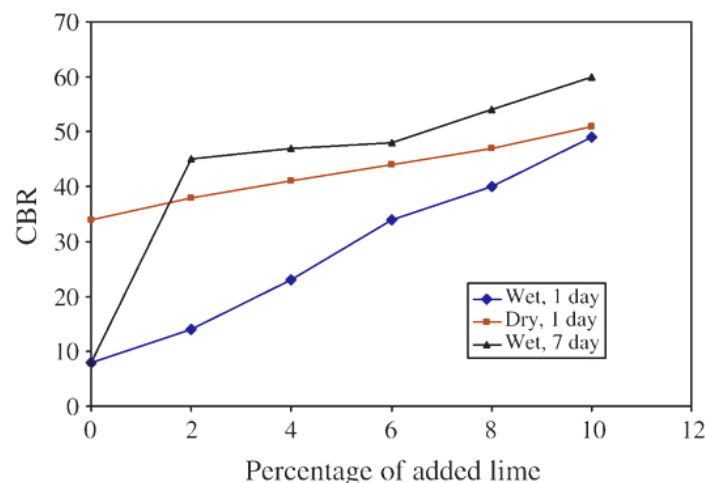


Figure 2. 12 : Valeurs de CBR imbibés et immédiats de la marne naturelle et stabilisée à différentes durées de cure. [49].

Influence de la chaux sur la résistance à la compression

Rao et son équipe (1987), cité par [35], ont étudié le mélange de chaux et d'argile gonflante de l'Inde. Ils notent une bonne amélioration de la résistance à la compression, avec 12% de chaux RC= 16,8 bars, alors qu'elle était de 1,77 bars à 0% de chaux.

Kolias et al (2005) ont étudié l'effet de la chaux hydratée $\text{Ca}(\text{OH})_2$ sur la résistance à la compression des deux argiles pour différentes durées de cure, ils ont conclu que l'augmentation du pourcentage en chaux de 0,92 à 3,66 % augmente la résistance à la compression (figure 2. 13). [36]

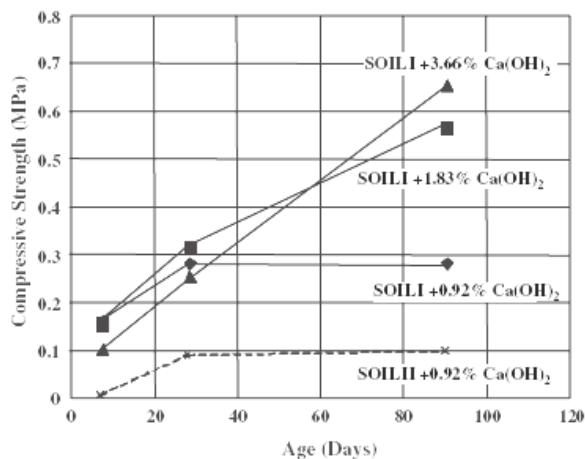


Figure 2. 13 : Effet du pourcentage en chaux $\text{Ca}(\text{OH})_2$ sur la résistance à la compression des sol I-II à différents duré de cure. [36]

Yi et al (2006) ont montré que l'augmentation du pourcentage en chaux de 2 à 5% donne une augmentation importante de la résistance à la compression, mais l'addition de la chaux

de plus que 5% donne un effet inverse sur l'amélioration de la résistance à la compression

Figure 2. 14[63]

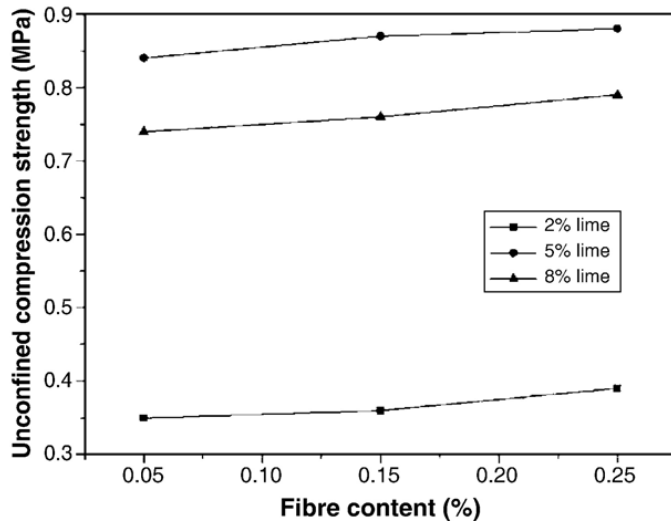


Figure 2. 14: Effet du pourcentage de chaux sur la résistance à la compression du sol renforcé par différents pourcentages en fibr

e

Influence de la chaux sur le gonflement

Afès et Didier (1999) ont étudié l'influence de la chaux sur les paramètres du gonflement (potentiel et pression de gonflement) de l'argile gonflante de Mila.

La figure 2. 15, montre que le pourcentage de chaux introduit diminue le potentiel de gonflement final pour un même temps de cure quel que soit le pourcentage additionné. [2]

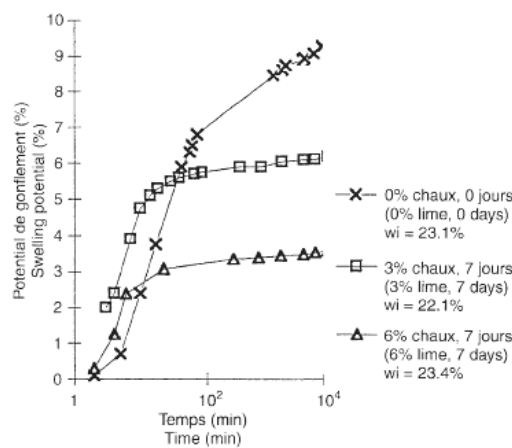


Figure 2. 15: Cinétiques du potentiel de gonflement des éprouvettes traitées à 3 et 6% de chaux pour différentes durées de cure [2]

La Figure 2. 16, montre l'évolution de la pression de gonflement finale en fonction du pourcentage de chaux pour des périodes de conservation de 7 à 90 jours. On remarque que

la pression de gonflement finale obtenue sur des éprouvettes traitées diminue au fur et à mesure que le temps de conservation augmente. Ainsi pour 6% de chaux à 90 jours nous obtenons une pression de gonflement pratiquement nulle donc une inhibition totale du gonflement

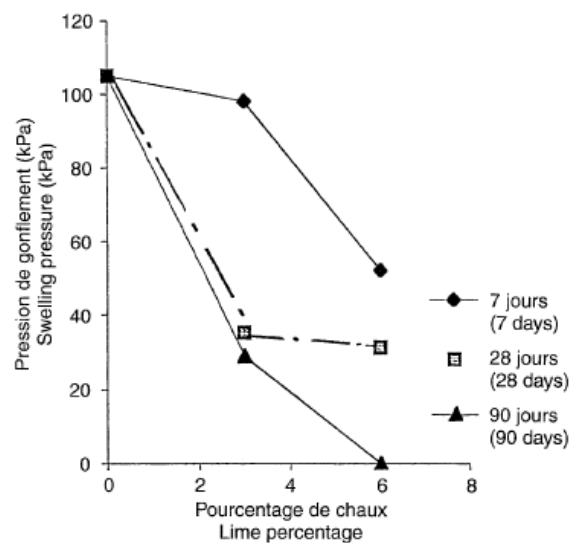


Figure 2. 16: Evolution de la pression de gonflement en fonction du pourcentage de chaux [2]

Yucel et al, (2005) ont étudié, l'impact du cyclique de mouillage et du séchage sur le comportement des sols argileux gonflants (A, B et C) en présence de la chaux. [64]

Le sol A est composé de 70% de bentonite et de 30% de kaolinite,

Le sol B est constitué de 30% de bentonite et de 70%de kaolinite,

Le sol C est un sol argileux de plasticité moyennement élevée. Il s'agit de l'argile de Turkmen.

Les figures suivantes représentent les résultats des potentiels de gonflement et du pression

de gonflement pour les mêmes sols et même pourcentage de chaux 3% et 6%.

Les résultats de la pression et du potentiel de gonflement ont montré que l'effet initial du

sol, bénéficiaire de la stabilisation à la chaux a été perdu après le premier cycle et le potentiel de gonflement a augmenté aux cycles suivants. D'autre part, le potentiel de gonflement et la pression de gonflement du sol non traité ont commencé à diminuer après le premier cycle qui est due à la formation des minéraux expansifs telles que l'étringite et la thaumasite. L'équilibre a été atteint après le quatrième cycle.

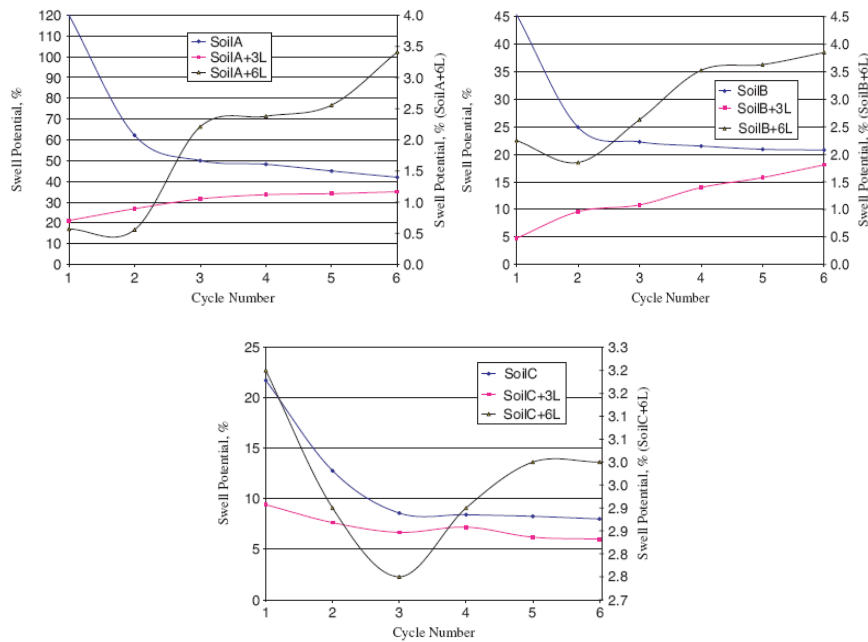


Figure 2.17: La variation de potentiel du gonflement avec le nombre des cycles pour les sols (A , B et C) dans un état traité et non traité . [64].

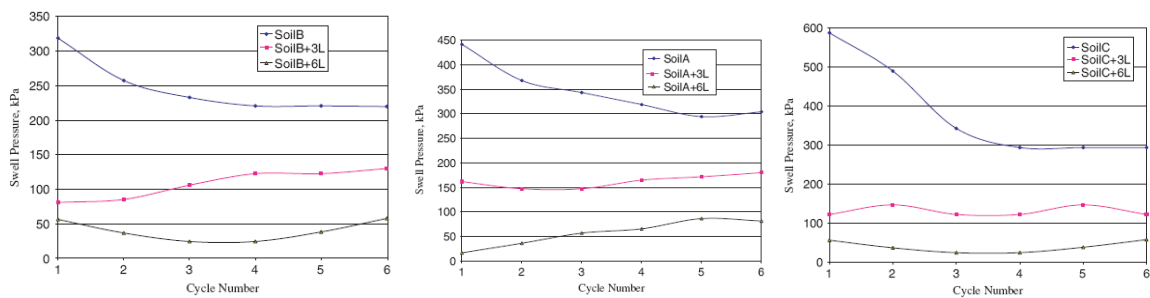


Figure 2.18: La variation de la pression du gonflement avec le nombre des cycles pour les sols (A, B et C) dans un état traité et non traité. [64].

Influence de la chaux sur les paramètres de la résistance au cisaillement

Deneele (2008) confirme que l'addition de la chaux à un sol argileux implique une modification de son angle de frottement interne et sa résistance au cisaillement, il a remarqué une augmentation de ces paramètres avec l'augmentation du pourcentage en chaux additionnée. [19] Yi et al (2006) ont étudié l'influence des fibres sur les paramètres de cisaillement (cohésion et angle de frottement) des mélanges traités à la chaux (figures 2.19 et 2.20), ils ont montré que l'augmentation du pourcentage en fibre et en chaux augmente ces paramètres jusqu'à un seuil de chaux de 5%. [63]

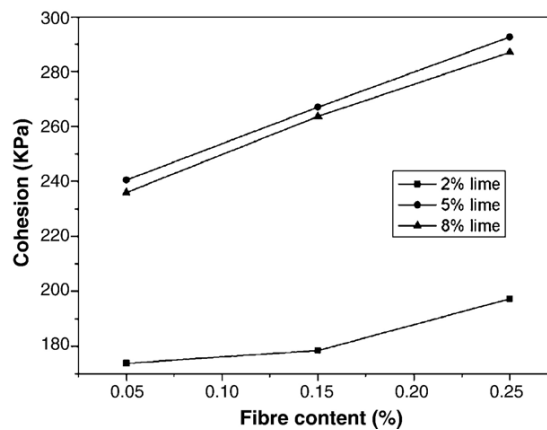


Figure 2.19: Effet de continu en fibre sur la cohésion des mélanges traités à la chaux après 28 jours [63]

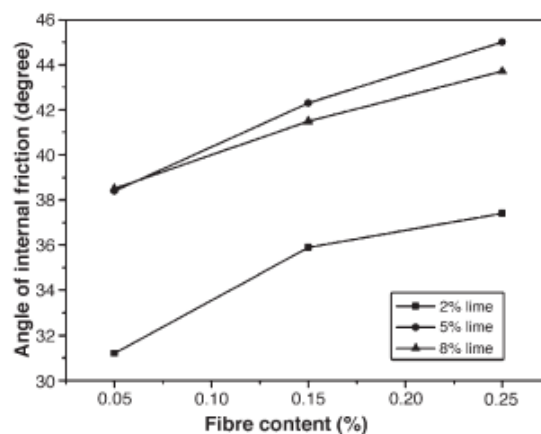


Figure 2.20: Effet de continu en fibre sur l'angle de frottement des mélanges traités à la chaux après 28 jours [63]

2.5 Conclusion

Les conséquences et les désordres dans les ouvrages géotechniques dus aux sols évolutifs étudiés dans le chapitre 1, ont permis de mettre en évidence l'importance de l'application des solutions stabilisatrice de ce type de sol.

De nombreux chercheurs ont étudié différentes méthodes avec différents ajouts en vue de stabiliser ces formations évolutives. Les différents résultats trouvés concernant la stabilisation à la chaux peuvent classé cette dernière comme la meilleurs et l'idéal dans le domaine de stabilisation.

C'est pourquoi nous avons décidé d'étudier l'influence des la solution traitement à la chaux sur notre sol.

III.2-4-1 Essais oedométriques :

Le but principal de cet essai est de déterminer au laboratoire les caractéristiques du sol nécessaires au calcul des tassements du sol en place sous le poids d'une charge (fondation, remblai, etc....) L'appareil utilisé est l'oedomètre de Terzaghi. Cet appareil peut servir en outre à déterminer la perméabilité des sols en l'utilisant comme perméamètre à charge variable

Une série d'essais oedométriques a été réalisée au laboratoire L.N.H.C, sur différents niveaux pour obtenir la contrainte de préconsolidation. Le matériel utilisé est un oedomètre à chargement par l'arrière de type Wickham Farrance. Le chargement est de type incrémental par ajout de masses. La lecture des masses est visuelle sur comparateurs mécaniques au 1/100ièm

La taille, le montage des éprouvettes et la réalisation de l'essai ont été effectuées au

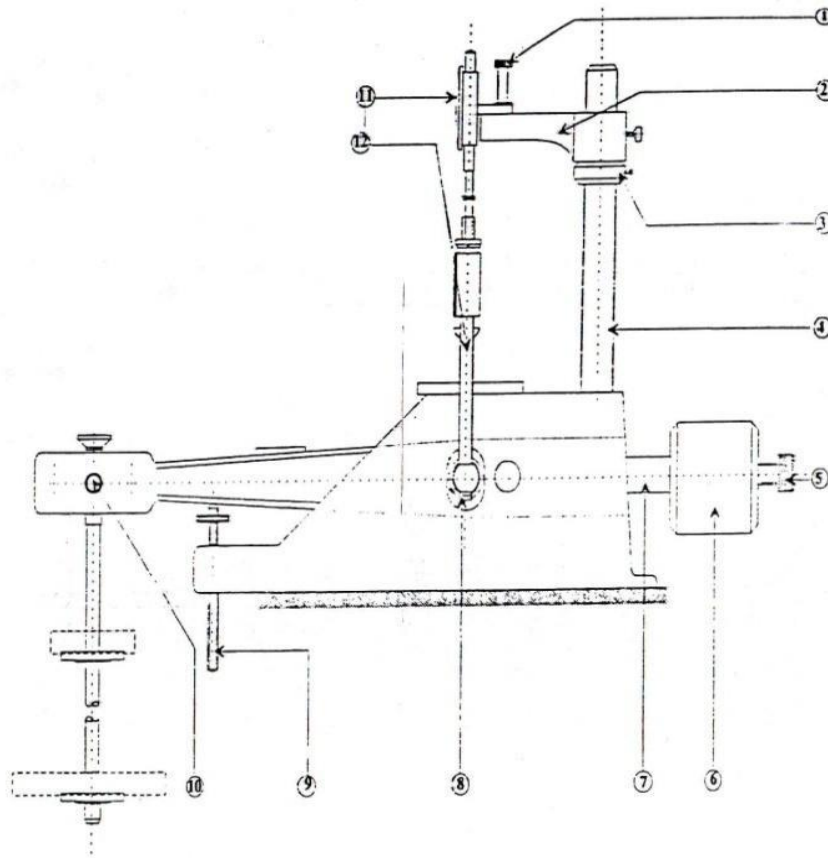


FIG.3-2 :Schéma détaille de l'Odomètre

1-Vis du comparateur

. 2-Console coulissante.

3-Vis de réglage de la hauteur.

. 4-Support rigide du comparateur.

5-Vis de réglage de contrepoids.

6- Contrepoids.7-Barre supportant contre poids

. 8-Articulation.

9-Vérin de support.

10-Articulation liant la poutre et les plateaux des masses.

11-Compateur.

12-Traverse de mise en charge

4 .6 Conclusion

L'addition de la chaux implique une diminution importante de la plasticité et de retrait se qu'il faire passer le sol d'un état plastique à un état solide, friable, facilement travailleuse et perd une partie de sa sensibilité à l'eau.

La chaux attaque aussi les paramètres de la compactibilité, on constate une augmentation de la teneur en eau et une diminution de la densité sèche maximale Les paramètres physiques des mélanges trouvés n'interviennent pas de façons explicites dans la caractérisation du comportement mécanique de ces matériaux

Chapitre 4: Techniques de stabilisation des sols argiles

III.3. Techniques de stabilisation utilisées

Le gonflement du sol peut être stabilisé par plusieurs méthodes. Celles-ci interviennent sur la minéralogie de l'argile, les charges électriques de l'argile, la caractéristique physicochimique de l'argile. Dans ce qui suit, une description bref sur de techniques de stabilisations des sols expansifs.

Parmi les techniques de stabilisation les plus couramment utilisées, on distingue :

1. la stabilisation mécanique.
2. la stabilisation thermique.
3. la stabilisation chimique. (par ajout de matériaux).
4. la stabilisation par sables.

Les liants se divisent en deux grandes familles qui sont les liants hydrauliques (sels, ciment, chaux, ciment et chaux...) et les liants organiques (goudrons, bitumes ...).

III.4. Chaux

La chaux est à la fois le liant minéral majeur de l'histoire de la construction et un des produits minéraux les plus utilisés depuis le début de l'ère industrielle. Avant la chaux, le plâtre, fut la première cuite pour réaliser trisé des l'Ancien empire de l'époque pharaonique. Puis, les mélanges avec des matériaux carbonatés apparurent.

Dans l'ajout de 2% à 8% de chaux à sol expansif diminue visiblement le potentiel de gonflement de celui-ci. De par l'affinité à l'eau de la chaux, une grande part d'eau existante dans le sol peut être absorbée par celle-ci, ce qui contribue largement à la réduction du potentiel de gonflement.

Par ailleurs, des travaux effectués sur le compactage des sols attestent que le poids volumique à l'optimum Proctor est souvent augmenté lorsqu'une faible quantité de chaux. Dans le projet de réalisation de l'aéroport de Dallas (USA) le sol a été stabilisé par ajout de chaux. La couche traitée est épaisse de 2.5m à 5m. Le potentiel de gonflement du sol, de l'ordre de 10%, fut diminué pour des valeurs satisfaisantes. Cette même technique a été utilisée dans la réalisation d'autoroutes aux USA (**Chen, 1988**). Des études élaborées par **Chen(1988)**, **Nelson et al,(1992)**, **Sivapullaiah et al,(2000)** et **Puppala et al,(2004)** montrent que, parfois, l'ajout de chaux au sol expansif contenant des proportions notables (>3%) en gypse ou en sulfate peut occasionner un soulèvement au lieu d'une stabilisation **Puppala et al,(2001)** rapportent que la chaux est l'unique matériau de stabilisation à base de calcium qui peut occasionner des réactions expansives en contact du sulfate.

Le gonflement est d'autant plus visible que la température est basse. Aussi, en présence d'eau, le sulfate ou le gypse se combine au calcium (Ca) et à l'alumine (Al_2O_3) de l'argile. Cette combinaison forme la thaumasite et l'ettringite, et provoque des expansions assez spectaculaires (Chen, 1988; Nelson et al, 1992).

L'ettringite ($3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 3CaSO_4 \cdot 32H_2O$) se forme à partir des aluminates tricalciques ($Ca_4Al_2O_6$) non hydratés. Trois types d'ettringites sont possibles: primaire, secondaire et différée. Le caractère expansif de l'ettringite, du type secondaire et différée, est particulièrement dû à sa teneur en chaux. L'ettringite de formation secondaire est susceptible au gonflement pour une large gamme de température. L'ettringite de formation différée gonfle particulièrement à des températures de l'ordre de $60^\circ C$ à $70^\circ C$. L'effet de l'expansion de l'ettringite peut être réduit par ajout d'un ciment résistant au sulfate (Carde, 2007).

La thaumasite ($(Ca_3Si(CO_3)(SO_4)(OH)_6 \cdot 12(H_2O))$) se forme par attaque du sulfate à des températures de $0^\circ C$ à $5^\circ C$. Elle peut, aussi, être produite par combinaison calcium – silicate hydraté d'une part, et les ions sulfate (SO_4) ou carbonates (CO_3) d'une autre part. Un des exemples de gonflement occasionné par ajout de chaux est celui présenté par **Hunter et Dal, (1988)** où un soulèvement de 30.5cm a été rapporté.

De ce fait, le traitement d'un sol expansif à la chaux doit faire objet d'une analyse de faisabilité et de mise en oeuvre soigneusement menée. Compte tenu de la rapidité de prise du ciment comparativement à la chaux, un mélange approprié de cette dernière par un ciment résistant aux sulfates permet d'accélérer la stabilisation du sol (**Chen, 1988**). **Chen (1988)** rapporte que la chaux réduit visiblement l'indice de plasticité du sol et augmente la limite de retrait de la montmorillonite. **Mateous (1964)** atteste que l'ajout de la chaux permet l'augmentation des résultats CBR des sols gonflants. **Holm (1979)** constate une augmentation du module de Young du sol de 0.3 MN/m^2 à 4.4 MN/m^2 lorsque celui-ci est traité à la chaux. **Bell et Tyrer (1987)** constatent une augmentation rapide et significative du module de Young d'une argile traitée à la chaux.

Le pourcentage de chaux ajouté eau sol traité est de 2% à 4%. Selon **Guney et al, (2007)**, la technique de traitement à la chaux ne donne pas de résultats satisfaisants dans les régions où les cycles humidification/séchage peuvent avoir lieu.

Les mêmes auteurs ajoutent que l'ajout d'un faible pourcentage de cendres volantes peut contribuer dans l'amélioration des résultats, cependant ces résultats doivent faire objet d'une analyse approfondie. En fait, le traitement superficiel du sol à la chaux réduit

le potentiel de gonflement. Cependant il ne constitue pas une imperméabilisation **(Mouroux et al, 1988), (Zenkhrri ,2010)**.

Les chaux existantes dans le commerce sont de deux types : chaux vive et chaux éteinte. Dans sa forme naturelle, la chaux est vive (CaO). Celle-ci peut aussi être rencontrée sous une forme appelée dolomite de chaux (CaO+MgO). La chaux éteinte est obtenue par hydratation de la chaux vive. L'expression (1) en montre la réaction chimique. Trois types de chaux sont industriellement productibles : la chaux hydratée (Ca(OH)₂), la chaux dolomitique hydratée (Ca(OH)₂+MgO) et la chaux dolomitique hydratée double (Ca(OH)₂+Mg(OH)₂)

CaO + H₂O → Ca(OH)₂ + Chaleur

Chaux vive + eau → Chaux éteinte + Chaleur

D'une autre part, l'utilisation de la chaux vive donne des résultats de stabilisation des sols gonflants meilleurs que ceux de la chaux éteinte. La différence entre les effets des deux chaux est attribuée à l'échange des cations Ca²⁺ plus abondants dans le cas de la chaux vive **(Bekkouche et al. 2002)**.

Les travaux de **Bekkouche et al. (2002)** montrent que l'ajout de 1% de chaux vive à un sol réagit avec 6% à 8% d'eau contenue dans ce dernier.

Lorsque la chaux est introduite à un sol, elle peut réagir non seulement avec l'eau, mais aussi avec les autres constituants du sol. Le processus de réaction de la chaux (vive ou éteinte) avec le sol dépend de la composition chimique du sol, du pourcentage de chaux ajoutée, de la température et de la durée de réaction. Selon **Thompson (1968)**.

Ce processus de réaction influera sur la fermeté du sol, la résistance de celui-ci et stabilité. **Bell (1988)** remarque que les montmorillonites réagissent avec la chaux de façon plus rapide que les kaolinites et les illites.

III.4.1. 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. **(Zenkhrri ,2010)**

Les chaux utilisées en technique routière sont essentiellement les chaux aériennes

Elles se présentent sous deux formes :

- chaux vive
- chaux éteinte

1) Echange cationique : L'addition de chaux engendre un excès de cations de calcium divalents qui tendent à remplacer les cations monovalents (Na^+ et K^+). Les ions de calcium non échangés seront adsorbés, ce qui conduit à augmenter la densité en ions. C'est à dire une baisse dans la capacité d'échange des particules. Tout ceci se traduit par une baisse du gonflement. **(Bekkouche et al.2002).**

2) Flocculation : L'ajout de chaux à des grains fins d'argiles cause une flocculation et une agglomération des particules. Ce phénomène a comme résultat un changement apparent dans la texture, les petits grains se regroupent pour former d'autres grains de grande taille. Donc, la flocculation d'argile augmente la grosseur effective des grains et joue un rôle important dans la stabilisation.

3) Carbonatation : La chaux réagit avec le dioxyde de carbone de l'air (CO_2) pour former de faibles agents de cimentation comme les carbonates de calcium par exemple (CaCO_3 , MgCO_3) selon le type de chaux utilisée. Généralement, on essaie de réduire ce phénomène par compactage du sol traité après une petite durée de malaxage. Des études ont montré que cette réaction est probablement plus nuisible qu'utile dans la stabilisation du sol.

4) Réaction pouzzolanique : Cette réaction se produit entre la silice (SiO_2) et/ou l'alumine (Al_2O_3) du sol et la chaux pour former certains types d'agents de cimentation ou de solidification. Le résultat de ces réactions donne la part la plus importante dans l'augmentation de la résistance du mélange sol- chaux et les propriétés acquises par le sol peuvent durer des années.

Ce phénomène est la cause principale qui assure la bonne stabilisation du mélange sol- chaux. **(Bekkouche et al.2002).**

III.4.2. Action de la chaux sur les argiles

Les argiles sont des minéraux généralement issus de l'altération des roches. On les trouve dans les sols, sédiments, roches sédimentaires, ainsi que dans les zones d'altération hydrothermales.

Ce sont principalement des phyllosilicates. C'est-à-dire qui présentent sous

forme de feuillets d'aluminium plus ou moins hydraté et de petite taille. Les feuillets sont constitués de couches de tétraèdres SiO_4 et de couches d'octaèdres $\text{Al}(\text{OH})_6$, reliées par les atomes O et OH^- mis en commun. Cependant, cette organisation peut être perturbée par des défauts cristallins entraînant un déséquilibre de charge plus ou moins prononcé selon le cas ; certaines argiles, comme les smectites, ont un déficit de charge dix fois plus prononcé que les kaolinites.

Ce déséquilibre est compensé par l'adsorption de cations dans l'espace interfoliaire, ce qui favorise le regroupement des feuillets sous forme de particules dont la taille dépend de la qualité des liaisons.

L'aptitude des minéraux argileux à adsorber des molécules d'eau, ainsi que différents cations, dans l'espace interfoliaire varie donc d'un type d'argile à l'autre. Elle est à l'origine de la sensibilité à l'eau des argiles, et des sols qui en contiennent, ou, en d'autres termes, de leur capacité à changer de consistance en fonction de la teneur en eau.

Lorsqu'on mélange de la chaux vive avec un sol argileux humide, elle s'hydrate rapidement en fixant une quantité d'eau. Puis, l'hydrate passe en solution dans l'eau. Les cations divalents Ca^{++} sont alors en mesure de déplacer les cations monovalents adsorbés à la surface des argiles, ainsi que ceux en plus faible concentration ou de plus petite taille. La hiérarchie est donnée par la série dite « lyotropique » dans laquelle les cations de droite remplacent ceux de gauche : Li Na H K NH_4 Mg Ca Al. (**Gontran Herrier, Didier Lesueur et Daniel Puiatti C 5 445**).

III.5. But de la stabilisation :

- 1.** Réduire le volume des vides entre les particules solides (augmenter la compacité);
- 2.** Colmater les vides que l'on peut supprimer;
- 3.** Créer des liens et améliorer les liaisons existantes entre particules (résistance mécanique).

Ces trois objectifs permettent d'améliorer la résistance mécanique, et de diminuer la sensibilité à l'eau. (**Monnaers 1947**).

III.7.1. Ciments

Les ciments sont des liants hydrauliques constitués de poudres fines de faire prise et de durcir progressivement au bout d'un temps plus ou moins long. Les composés obtenus sont stables au contact des eaux usuelles. Les ciments sont livrés dans le commerce en sacs ou en vrac.

III.7.2. Production du ciment par mouture /malaxage des constituants

La fabrication proprement dite du ciment consiste à doser et à moudre finement les différents constituants dans des proportions bien déterminées.

En moulant le clinker portland avec un régulateur de temps de prise et à éventuels constituants complémentaires en fonction du type de ciment à fabriquer, on obtient un mélange homogène et intime des finesses finale mouture est constituants.

III.8. Conclusion

D'après les conséquences des sols expansifs sur l'ouvrage géotechnique en surface et souterrain, plusieurs chercheurs ont étudié la stabilisation des sols expansifs. Ces différentes recherches s'orientent sur les ajouts qui minimisent le potentiel de gonflement et la pression de gonflement.

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 d'une solution ou d'un produit sur la stabilisation d'un sol argileux. Quelques exemples sont cités concernant l'utilisation de produits chimiques servant à la stabilisation des sols argileux.

Autour de cette idée que s'articule ce chapitre, a été consacré à l'étude bibliographique présentant l'état d'avancement de la recherche dans le domaine de la stabilisation des sols 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, durée de l'opération, la disponibilité des matériaux à utiliser ainsi que les conditions de l'environnement.
