

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE  
SCIENTIFIQUE

Université de Mohamed El-Bachir El-Ibrahimi - Bordj Bou Arreridj

Faculté des Sciences et de la technologie

Département Science et Technologie

# Mémoire

Présenté pour obtenir

**LE DIPLOME DE MASTER**

FILIERE : Génie Civil

Spécialité : Matériaux

Par

- **GANA Housseem Eddine**
- **BELMEZOUAR Abdelhalim**

Intitulé

*Effets de l'utilisation de ciment pour le traitement des argiles*

Soutenu le : 2021/2022

Devant le Jury composé de :

Nom & Prénom	Grade	Qualité	Etablissement
M.BENGAZI ZIAD	MCB	Encadreur	Univ-BBA
M. DJELLALI ADEL	MCA	Encadreur	Univ-BBA
M. ACHOUR YACIN	MCB	Examineur	Univ-BBA

## **Remerciement**

*Je remercie tout ce qui ont aidé a réalisé cette mémoire qui j'espère va apporter "un plus" aux étudiants qui vont prendre la continuité les plus grandes richesses du contenu en éléments éducatifs et informatifs.*

*Je passe mes salutation les plus distinguées a mon encadreur MR : Djelali Adel et tous les professeures de ma section, et bien sur MR : Boukhari de laboratoire LTPE .*

*Je remercie du fond du cœur tous ceux qui ont contribué à la réalisation de cette mémoire et particulièrement ma mère et mon père et mes frères et sœurs et tous mes amis (MADJID, HALIM, SEIF EDDINE, ABDENOOR, RAMDAN, OUSSAMA, SALAH, MOUNIR...)*

*Bien sur ma deuxième famille de l'univ et tous le personnelle.*

*GANNA HOUSSEM Eddine*

*BEL MEZAOUAR HALIM*

# Sommaire

# Sommaire

---

## Sommaire :

Titre	Page
Remerciement _____	
Sommaire _____	I
Liste des Tableaux _____	III
Liste des Figure _____	V
Introduction générale _____	VII
<b>CHAPITRE I : Généralité sur les argiles gonflantes</b>	
Introduction _____	9
Les Argiles _____	9
Mécanisme De Gonflement _____	20
Conclusion _____	24
<b>CHAPITRE II : Méthodes de stabilisation des sols gonflants</b>	
Introduction _____	26
Méthode de Compactage _____	26
Méthode De Substitution _____	27
Méthode De Prehumidificatio -----	27
Stabilisation Par Ajout De Sabl -----	27
Stabilisation Par Des Solutions Saline -----	29
Stabilisation Par Les Liants Hydrauliques (Chaux,Ciment (-----	35
Conclusion _____	44
<b>CHAPITRE III : Méthodes de stabilisation des sols gonflants</b>	
Introduction _____	46
Géographie _____	46
Climatologie _____	46
Géologie Régionale _____	48
Caractéristiques Géotechniques Du Site -----	50
Identification Des Paramètres De Gonflement -----	57
Conclusion _____	62
<b>CHAPITRE IV : Stabilisation des sols gonflants</b>	
Introduction _____	64
Essai Proctor _____	64
Essai CBR _____	72
Essai De Limite D'aterberg _____	75

## Sommaire

---

Gonflement Libre A L'œdomètre (XP P 94-091) -----	78
Résultats Et Discussions _____	79
Conclusion Générale _____	84
Résumé -----	84
Bibliographie _____	87

## Liste des Figure

---

### Liste des Figure :

N°	Titre	Page
<b>Chapitre I</b>		
01	Argile naturelle (MEB)	9
02	Feuillet en tétraèdr	11
03	Feuillet en octaèdre	12
04	Position des minéraux argileux les plus communs sur l'abaque de plasticité de Casa grand	13
05	Photographies au Microscope Electronique à Balayage des argiles Mitchell (1976) cité par Huidi et al (2006).	14
06	Les argiles de cette famille sont appelées T-O	14
07	Structure de kaolinite.	15
08	Structure de famille de l'illite.	16
09	Représentation de la structure	19
10	Différentes structures des argiles, selon Terzaghi	20
11	Types de gonflements	21
12	Mécanismes de gonflement des argiles par hydratation. Bouzid.	22
13	Courbe du gonflement en fonction du temps (Chen,1988)	23
<b>Chapitre II</b>		
01	Variation du potentiel de gonflement dans le temps du mélange argile de Sidi Chahmi et MersEl Kébir+sable de rivière.	29
02	Action des différents types de sels sur le taux de gonflement	31
03	Évolution du potentiel de gonflement en fonction du temps en Présence de différentes concentrations salines la bentonite de M'zila	32
04	Évolution du potentiel de gonflement en fonction du temps en Présence	33
05	Évolution finale de pression de gonflement en fonction de différentes concentrations	34
06	Courbes de gonflement des argiles de Sidi Chahmi et Mers El Kébir	35
07	Variation de l'indice de plasticité avec l'ajout de la chaux.	37
08	Figure II.8:Influence de la chaux sur les caractéristiques de compactage, Azouz, (2006)	38
09	Évolution de la valeur au bleu en fonction de consistance en fonction temps de méthylène en fonction de Pourcentage de chaux.	39
10	Courbe Proctor de l'argile traitée à la chaux et non l1traitée	39
11	Evolution du potentiel de gonflement	40
12	Évolution	40

## **Liste des Figure**

---

<b>13</b>	Effet de la chaux sur la pression de gonflement des échantillons traités compactés à l'OPN Khattab (2002)	<b>41</b>
<b>14</b>	Effet du dosage à la chaux sur le gonflement de la Bentonite de Meghnia.	<b>41</b>
<b>15</b>	Variation du potentiel de gonflement dans le temps en Fonction du pourcentage de chaux utilisé	<b>42</b>
<b>16</b>	Variation de la pression de gonflement en fonction du pourcentage de chaux utilisé	<b>42</b>
<b>17</b>	Histogramme de résistances de compression des sols en fonction des dosages en chaux à 28 jours et 45 jours	<b>43</b>
<b>18</b>	Histogramme de variation de l'angle de frottement des deux échantillons	<b>43</b>

### **Chapitre III**

<b>01</b>	Localisation du site de Sidi Aissa dans la wilaya de M'sila	<b>46</b>
<b>02</b>	Carte climatique de Koppen-Geiger.	<b>47</b>
<b>03</b>	Diagramme ombrothermique de BAGNOULS et GAUSSEN (2015-2021) de la région de M'Sila	<b>48</b>
<b>04</b>	Carte géologique de M'sila [Direction générale des fores Antenne M'sila]	<b>49</b>
<b>05</b>	Courbe granulométrique par tamisage et sédimentation	<b>52</b>
<b>06</b>	Indice de plasticité et limite de liquidité en fonction de profondeur du 1er site.	<b>54</b>
<b>07</b>	Échantillon d'argile gonflant	<b>54</b>
<b>08</b>	photo de largeur millimétrique des injections des taches de l'échantillon	<b>55</b>
<b>09</b>	Daigramme de classification du potentiel de gonflement (seed et al,1962)	<b>59</b>
<b>10</b>	Daigramme de classification du potentiel de gonflement	<b>59</b>
<b>11</b>	Abaque de Gasagrande	<b>59</b>
<b>12</b>	Essais œdométriques sur sol de sidi aissa"profondeur de sondage	<b>60</b>

### **Chapitre IV**

<b>01</b>	COURBE CBR	<b>74</b>
<b>06</b>	Comparaison de l'évolution de la pression de gonflement	<b>78</b>

## Liste des Tableaux

---

### Liste des Tableaux:

N°	Titre	Page
<b>Chapitre I</b>		
01	le coefficient d'activité de différents types de minéral argileux. (Holtz 1991; Mitchell 1976)	12
<b>Chapitre III</b>		
01	La détermination des caractéristiques physico-mécanique	51
02	Les limites d'Atterberg	53
03	Propriété des argiles minérales (données compilées à partir de Mitchell 1993, Santamarina et al., 2002 et Magnan et al., 1989)	56
04	L'activité des argiles selon la norme NF P 94-068	57
05	Classification du niveau de gonflement	59
<b>Chapitre IV</b>		
01	Masse volumique sèche mélange 2 %	64
02	Teneur en Eau du mélange 2 %	64
03	Masse volumique sèche mélange 4 %	66
04	Teneur en eau mélange 4 %	66
05	Masse volumique sèche mélange 6 %	67
06	Teneur en eau mélange 6 %	68
07	Masse volumique sèche mélange 6 %	69
08	Teneur en eau mélange 6 %	71
09	Essai CBR avec l'optimum 2% 4% 6 %	73
10	Limite de plasticité	75
11	Limite de liquidité	76
12	Limite de plasticité	76
13	Limite de liquidité	77
14	Limite de plasticité	77
15	Limite de liquidité	77
16	Résultat de gonflement libre à l'œdomètre.	80
17	Résultat de stabilisation de gonflement avec 2 % de ciment	80
18	Résultat de stabilisation de gonflement avec 2 % de ciment	81
19	Résultat de stabilisation de gonflement avec 2 % de ciment	81

# **Introduction Générale**

## Introduction générale

Le phénomène de gonflement des argiles est connu depuis longtemps, causant principalement des dommages dans les constructions. Les zones les plus touchées par ce phénomène sont les zones arides et semi-arides avec un indice de plasticité considérable. Certains sols argileux subissent d'importantes variations de volume en fonction de la variation de leur teneur en eau : lorsqu'on humidifie un tel sol à partir d'un état initial sec et dense, son volume augmente. Lorsqu'on sèche ce même sol à partir d'un état initial plus meuble et saturé, son volume diminue et on parle de retrait. Ces deux mécanismes de gonflement et de retrait sont liés à la nature minéralogique des argiles et les mêmes particules peuvent provoquer un retrait ou un gonflement selon l'état initial de densité et d'humidité du sol. Dans les régions semi-arides comme la ville de Sidi Aissa, la plupart des sols gonflants sont des argiles ou des marnes dont l'état "normal" est sec et dense. Les problèmes créés par ces types de sols dans le domaine de la construction sont souvent gênants, et la raison est principalement due au gonflement. Pour cette raison, notre travail est axé sur la stabilisation du gonflement des sols argileux et la minimisation de ses effets sur les constructions.

Ce mémoire est divisé en quatre chapitres dont :

- Le chapitre 1 contient une synthèse bibliographique sur les argiles, leur origine et leur formation, et illustre leur texture et les principales propriétés des matériaux argileux ;
- Le chapitre 2 concerne l'étalage des méthodes de stabilisation des sols gonflants ;
- Le troisième chapitre comprend les résultats de plusieurs chercheurs qui ont travaillé sur l'identification du phénomène de gonflement. Il explique les paramètres essentiels et les méthodes de prédiction du gonflement ;
- Le quatrième chapitre couvre les travaux pratiques qui ont été réalisés auprès de la ville de Sidi Aissa, consacré a partie pratique réalisée au laboratoire pour caractérisation géotechnique des sols traités, et par l'évaluation de l'influence des ajouts des ciments sur les propriétés d'argile ; dans le but de stabiliser le gonflement de ces sols.

# **CHAPITRE I**

## **Généralité sur les argiles gonflantes**

## I.1-INTRODUCTION

Le gonflement de certains sols ou roches sédimentaires est un phénomène très important en géotechnique car il est à l'origine de nombreux dommages aux structures de surface et souterraines. Ce phénomène, qui se produit dans les matériaux argileux, dépend des caractéristiques minéralogiques des minéraux argileux et se déclenche lorsque le matériau est mis en contact avec l'humidité ou avec une solution aqueuse. Lorsque l'eau pénètre dans le matériau argileux, elle entraîne un gonflement qui dépend de l'état de contrainte in situ. Différents types d'hydratation induisent le gonflement tels que la capillarité, l'osmose et l'adsorption. Ces phénomènes sont liés à la non-saturation initiale de la roche d'une part, et aux propriétés électrochimiques des couches argileuses d'autre part.

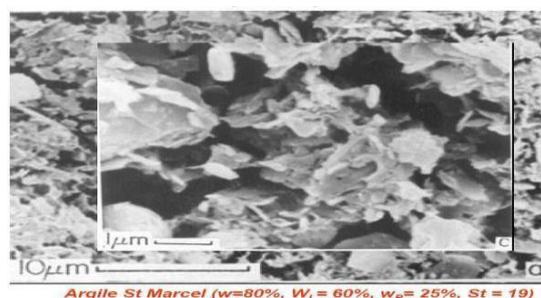
Les conséquences du gonflement sont nombreuses et dépendent principalement de chaque type de structure. Le gonflement s'accompagne généralement d'une modification des caractéristiques mécaniques et physiques de la roche qui peut avoir une influence sur la durée de vie de l'ouvrage.

L'intérêt de ce chapitre est de mettre en évidence les sols argileux et le phénomène de gonflement.

## I.2-LES ARGILES

**I.2.1-Définition** : Les argiles sont définies comme des sols dont le diamètre moyen est inférieur à  $2\mu\text{m}$ . Il s'agit donc d'un sous-groupe des sols fins. **(Figure I.1)**

Les argiles proviennent de l'altération chimique des roches et plus précisément des minéraux silicatés (feldspaths, mica).



**Figure I.1 : Argile naturelle (MEB)**

On distingue les argiles en fonction de leur origine:

**Les argiles d'altération** : formé principalement par l'altération des calcaires en climat tempéré ou l'altération des latérites en climat chaud et humide.

**Les argiles fluviatiles** : Ils sont principalement déposés dans le lit majeur des rivières lors des inondations.

**Les argiles lacustres** : déposées dans les lacs et les étangs

**Les argiles marines** : Ce sont des argiles d'origine continentale déposées en milieu marin, et généralement modifiées par diagenèse.

### I.2.2- Minéraux argileux

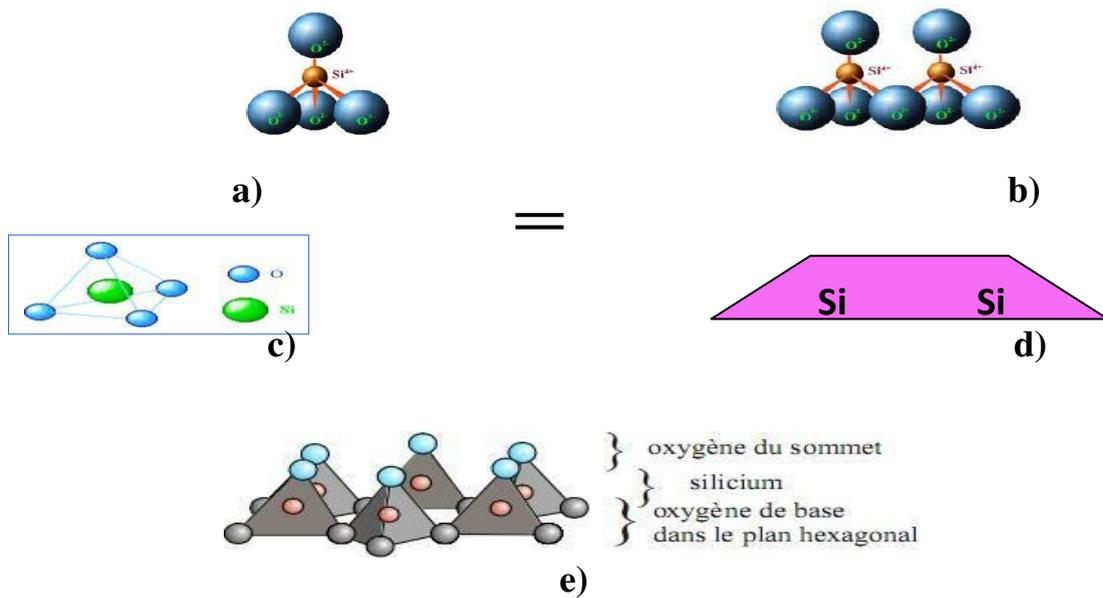
Les argiles sont constituées de fines particules de dimensions inférieures à 2 mm chargées négativement, leur présence rend l'argile fortement sensible aux molécules d'eau. Cette sensibilité se traduit par un gonflement, un rétrécissement et des modifications des paramètres mécaniques.

C'est la variation de la teneur en eau qui est le facteur déclenchant des variations de volume. Une augmentation de la teneur en eau entraîne le phénomène de gonflement tandis que sa diminution induit le phénomène de retrait. Ces minéraux sont composés de particules de formes aplaties et de très petites dimensions, les cristaux ressemblent à de fines plaques. Leur formule chimique est de la forme suivante citée par Hafsi (1993).



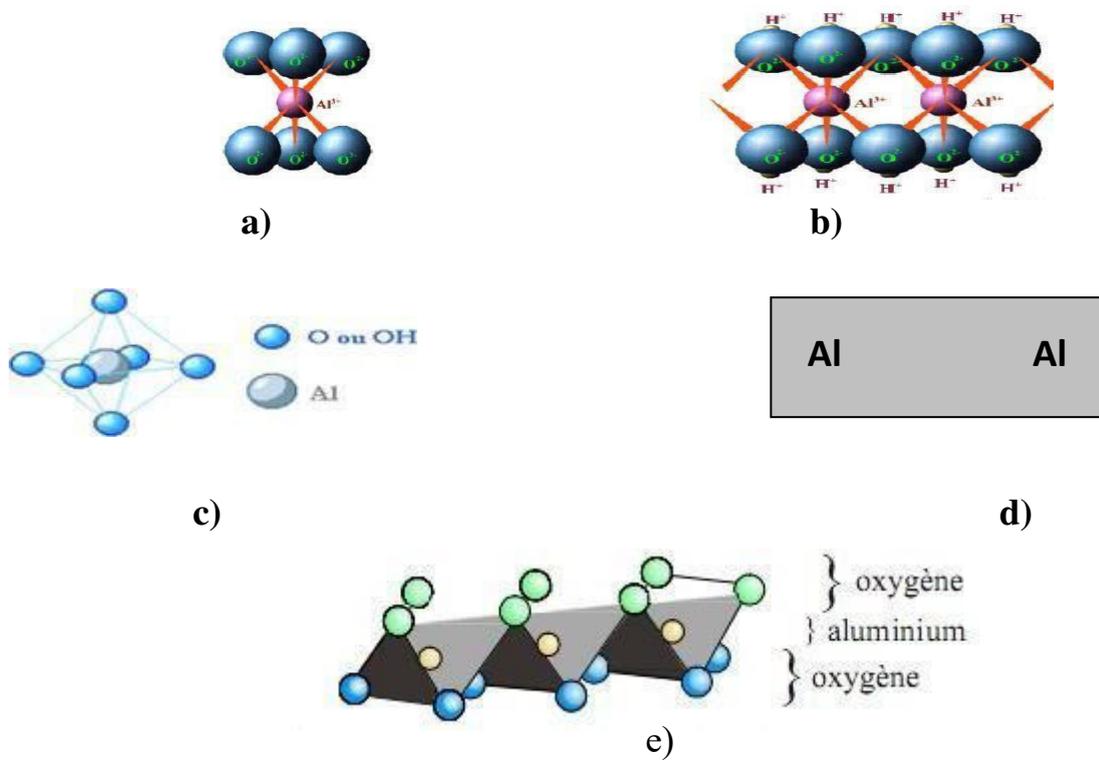
### I.2.3- Caractéristiques minéralogiques des argiles

Cette section passe brièvement en revue les principales caractéristiques minéralogiques des argiles car elles sont de première importance pour une bonne compréhension du phénomène de gonflement. Les minéraux argileux appartiennent au groupe des phyllosilicates qui contiennent une grande proportion d'eau piégée entre des feuillets de silice. Chimiquement, ce sont des aluminosilicates additionnés d'autres ions métalliques. Les figures I.2 et I.3 illustrent le bloc moléculaire de l'argile qui est constitué de silice tétraédrique ( $\text{SiO}_4$ ) et d'alumine octaédrique ( $\text{Al}(\text{OH})_6$ ).



- a) Tétraèdre de silice d'après Grim(1959).
- b) Vue isométrique d'un feuillet de silice en tétraèdre d'après Grim(1959).
- d) Schéma du feuillet de silice d'après Lambe (1953).
- e) Structure du tétraèdre  $\text{SiO}_4$  d'après cabane (2004)

**Figure I.2 : Feuillet en tétraèdre**



a- etc. Octaèdre d'aluminium d'après Grim(1959).

b-Vue isométrique d'un feuillet en octaèdre d'après Grim(1959).

d-Schéma du feuillet en octaèdre d'aluminium (d'après Lamb (1953).

e-Structure de l'octaèdre  $Al_2O_6$  d'après Cabane(2004)

### Figure I.2: Feuillet en octaèdre

Alors que la méthode la plus précise pour classer les minéraux argileux est celle de la diffraction de rayons X. Il existe deux autres méthodes simples d'approximation, la première consiste à calculer le coefficient d'activité(A) en utilisant la formule

$$\text{Suivante Holtz (1991): } A = \frac{I_p}{\% \text{ Argile}}$$

Où: A=Coefficient d'activité

$I_p$ =Indice de plasticité

Le tableau I.1 montre la corrélation entre le coefficient d'activité et le type de minéral argileux.

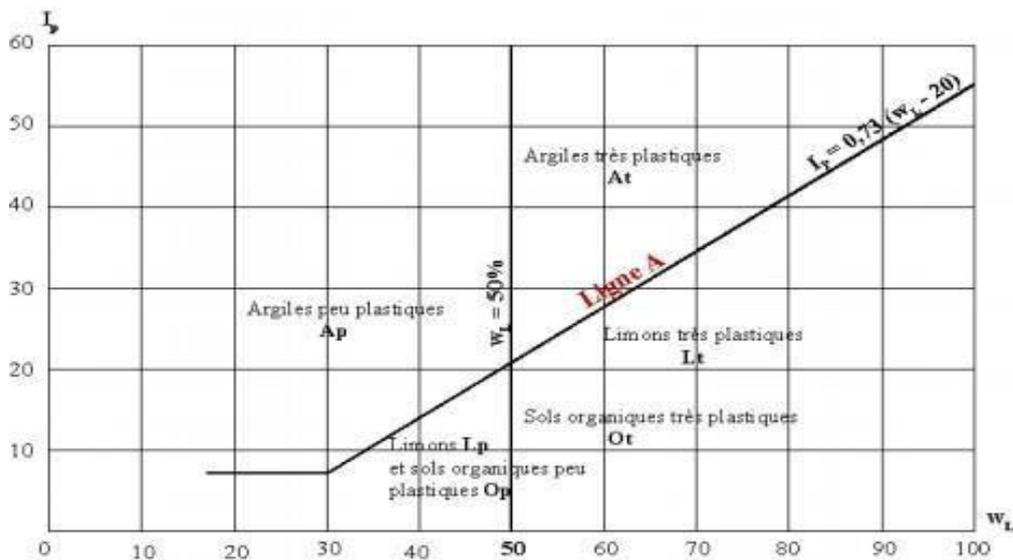
**Tableau.1:le coefficient d'activité de différents types de minéral argileux.**

(Holtz 1991; Mitchell1976)

type de minéral	Le coefficient d'activité
Montrnorillonite	1,0-7,0
illite	0,5 -1,3
Kaolinite	0,3-0,5
Chlorite	n.d.

Une deuxième méthode proposée par Casa grande Holtz (1991) suggère d'utiliser les limites d'Atterberg comme méthodes indirectes. En effet, la carte de plasticité de Casa grande (Figure1.4) peut donner autant d'informations pertinentes que n'importe quelle analyse de haute précision par diffraction ou différenciation hormique Holtz, (1991). Connaissant la limite de liquide (WL) et

l'indice de plasticité ( $I_p$ ), le minéral peut être déterminé en plaçant les points sur la figure 1.4.



**Figure 1.4 : Position des minéraux argileux les plus communs sur l'abaque de plasticité de Casa grande**

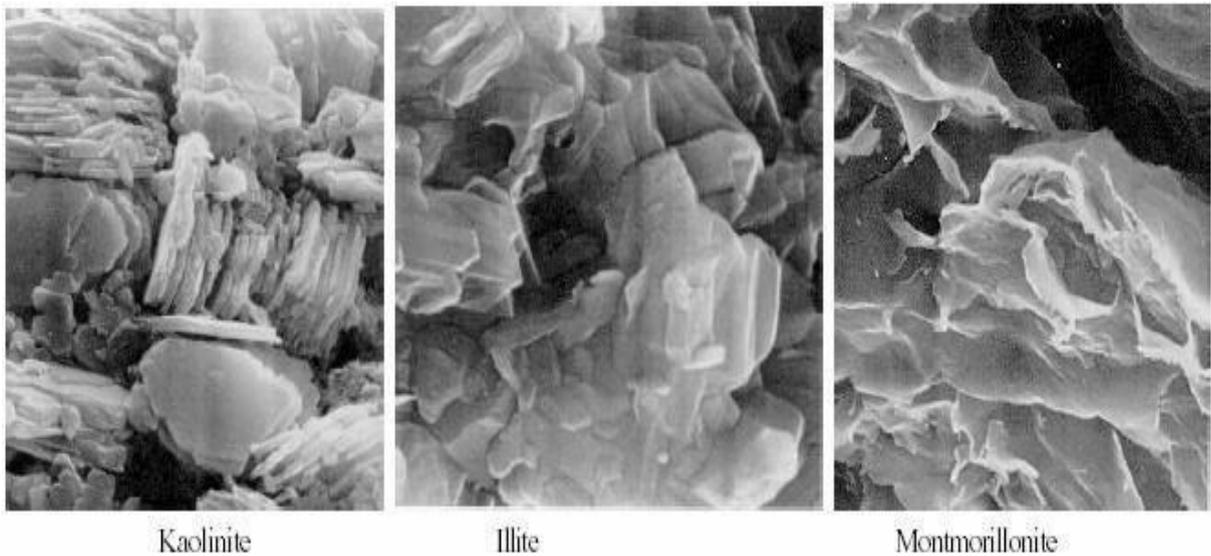
### I. 2.4 -Nature et différents types des sols argileux

Les particules d'argile sont un mélange de particules élémentaires de nature, de taille, de forme et de propriétés de surface différentes.

Le terme "particules élémentaires" désigne les produits de l'altération physique ou chimique des roches en minéraux ou fragments de minéraux isolés, monocristaux ou combinaisons amorphes.

Les particules élémentaires peuvent être subdivisées en différents minéraux : kaolinite, illite, montmorillonite, ... etc.

Les types d'argiles les plus fréquents sont : la kaolinite, la montmorillonite et l'illite (figure I.5). Ces différents types d'argiles se comportent différemment vis-à-vis de l'eau.



**Figure I.5 : Photographies au Microscope Electronique à Balayage des argiles Mitchell (1976) cité par Huidi et al (2006).**

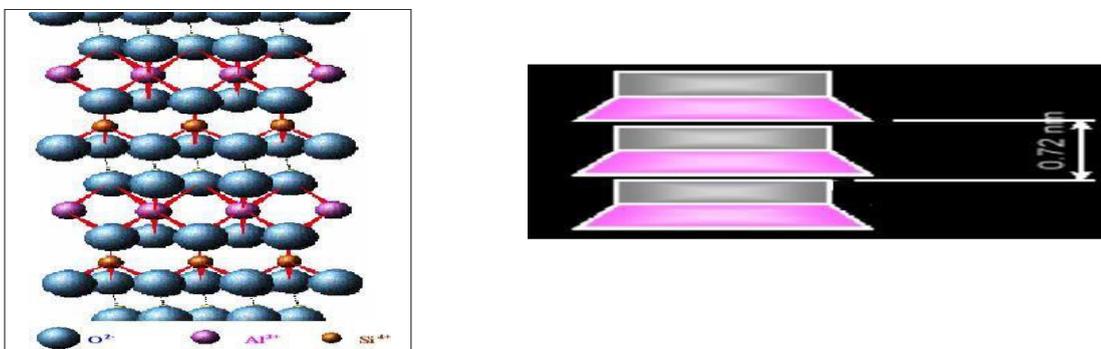
**I. 2.4.1- Kaolinite**

Chaque feuille de cette famille résulte de l'assemblage d'une feuille tétraédrique  $SiO_4$  avec une feuille octaédrique  $AlO_2(OH)_4$

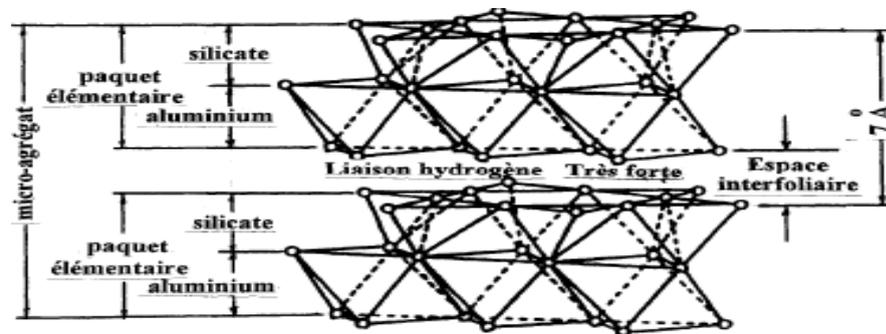


**Figure I.6 : Les argiles de cette famille sont appelées T-O**

**Schéma de la structure élémentaire de la kaolinite de Lambe (1953).**



### Vue isométrique de la structure atomique de la kaolinite



### Structure élémentaire du réseau cristallin de la kaolinite Parce vaux (1980), Philippon Nat (1979) et Tefal (1993)

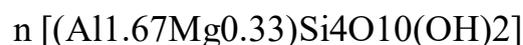
Figure I. 6 : Structure de kaolinite.

Les couches de base successives sont maintenues ensemble par les liaisons hydrogène entre les hydroxydes de la feuille octaédrique et les atomes d'oxygène de la feuille tétraédrique. Ces liaisons considérées comme très fortes, empêchent l'hydratation entre les couches élémentaires permettant un empilement relativement important des couches et la formation d'un cristal d'assez grande dimension. L'espace inter foliaire de cette famille est de 7.2Å. La kaolinite est une argile stable, non gonflante, dont la structure élémentaire n'est pas affectée par la présence d'eau et ne peut être détruite que par un chauffage à 450°C. La formule générale d'une feuille de kaolinite est donnée par la formule suivante, citée par Hafsi (1993).



#### 1.2.4.2-Montmorillonit

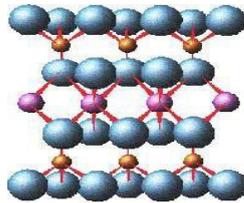
Ces minéraux sont également formés de feuillets ses trois couches et sont des argiles T-O-T L'épaisseur d'un feuillet est de 10Å°, il est constitué de l'association de deux couches tétraédriques de type TO<sub>4</sub>(OH)<sub>2</sub>. T qui peuvent être Al<sup>3+</sup>, Fe<sup>3+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, K<sup>+</sup>, ... (Figure I.7). (Figure I.7). La formule générale de la montmorillonite est la suivante, citée par Hafsi (1993)



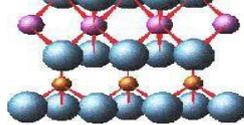
Les liaisons d'une couche à l'autre sont faibles et l'eau pénètre facilement entre les couches. C'est pourquoi les ions échangeables peuvent pénétrer dans la structure et séparer les couches. La faiblesse de ces liaisons leur confère de grandes surfaces spécifiques et des potentiels de gonflement élevés.

Les argiles contenant un pourcentage élevé de montmorillonite sont considérées comme des argiles gonflantes.

Couche tétraédrique



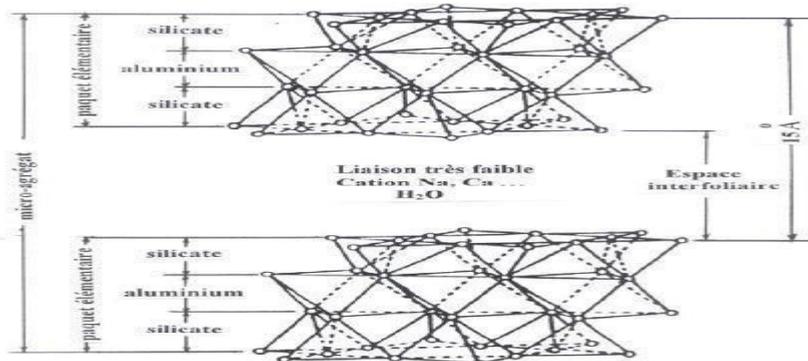
Couche octaédrique



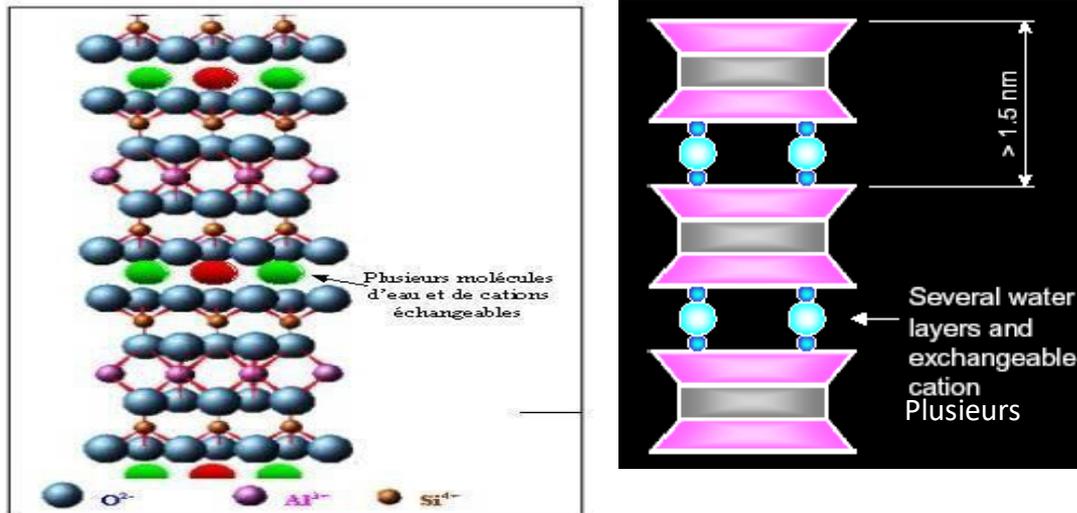
Couche tétraédrique

### A-Schéma de la structure élémentaire de la montmorillonite Lambe

### c-Structure élémentaire du réseau cristallin de la montmorillonite



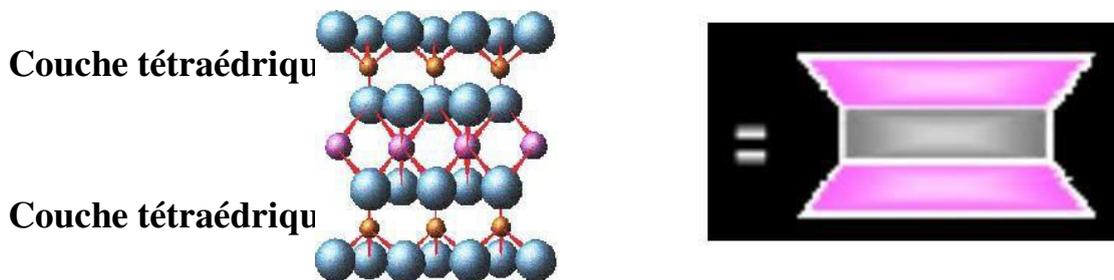
Löw,(1973) ; Chen (1975) ; Filliat et al. ( 1981); Katti (1988)Figure I.7  
:Structure de Famille de la montmorillonite.



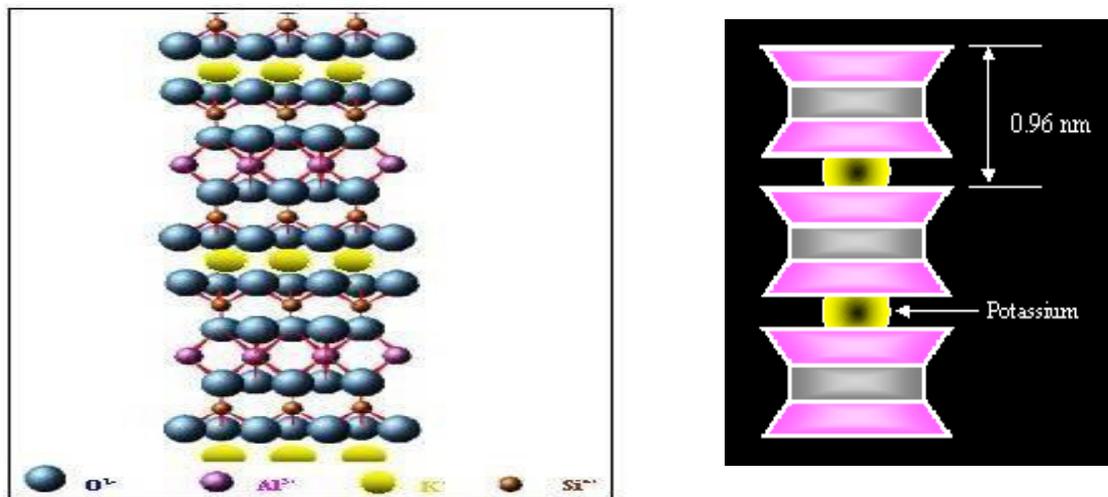
**b-Vue isométrique de la structure atomique de la montmorillonite. Grimm 1959**

I.8) rééquilibre et renforce la liaison entre les feuilles, rendant l'argile moins sensible aux phénomènes de retrait-gonflement.

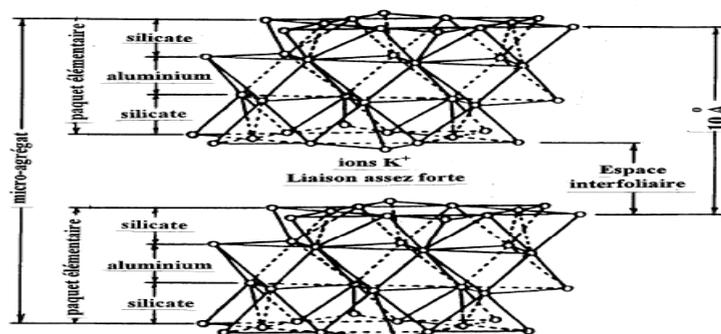
L'illite à comportement intermédiaire (les latérites font partie de cette famille d'argile).



**a-Schéma de la structure élémentaire de l'illite Lambe (1953)**



### b-Vue isométrique de la structure atomique et schématique de l'illite.



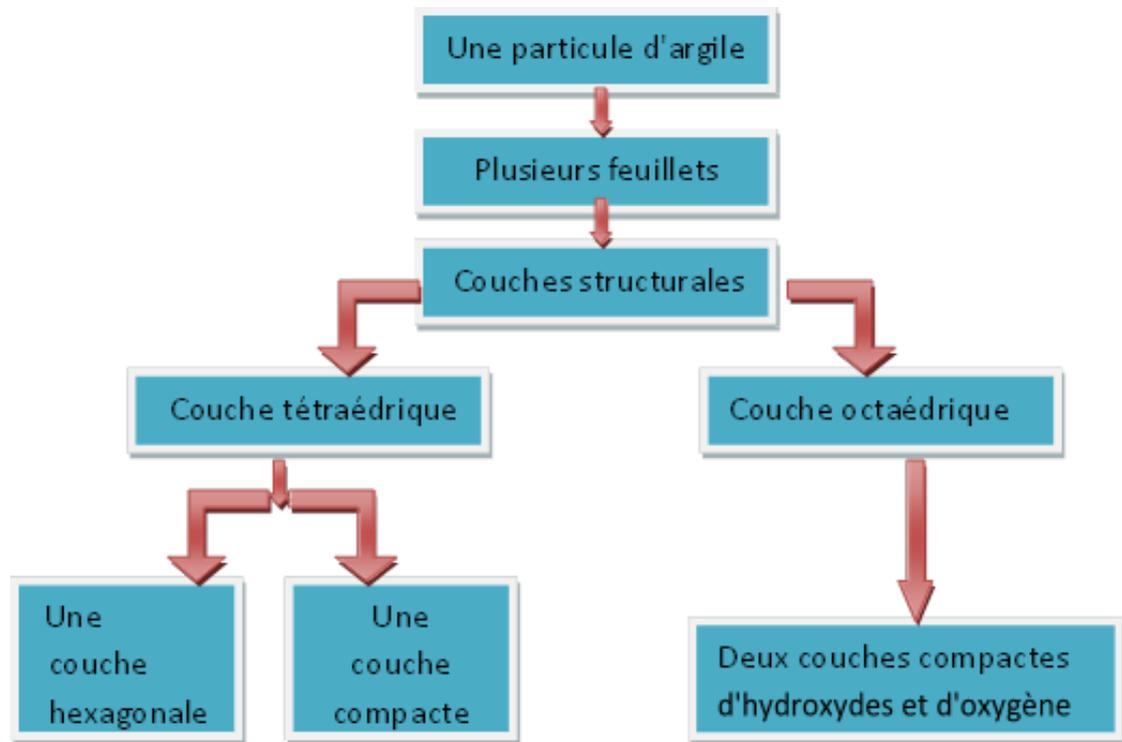
### c-Structure élémentaire du réseau cristallin de l'illite

Figure I.8: Structure de famille de l'illite.

#### I.2.5-Structure des sols argileux et liaisons structurelles

La structure initiale des sols argileux se forme, en général, lors de la sédimentation en milieu aqueux des produits de l'altération de masses rocheuses contenant des quantités importantes de petites particules de minéraux secondaires. Par la suite, des processus lents et variés de diagenèse peuvent modifier de manière significative la structure initiale de ces argiles. La combinaison de particules et d'agrégats isolés conduit à la formation d'un système structural, c'est-à-dire un arrangement ordonné de particules et d'agrégats dans le sol, indépendant de l'influence des parties gazeuses ou

liquides du sol, qui se forme dans les processus de sédimentation, de diagenèse et de post-genèse. Figure I.9.



**Figure I.9: Représentation de la structure minéralogique d'une particule d'argile**

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

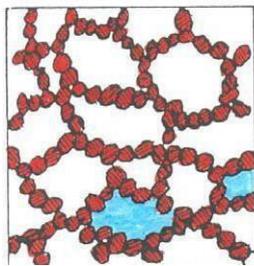
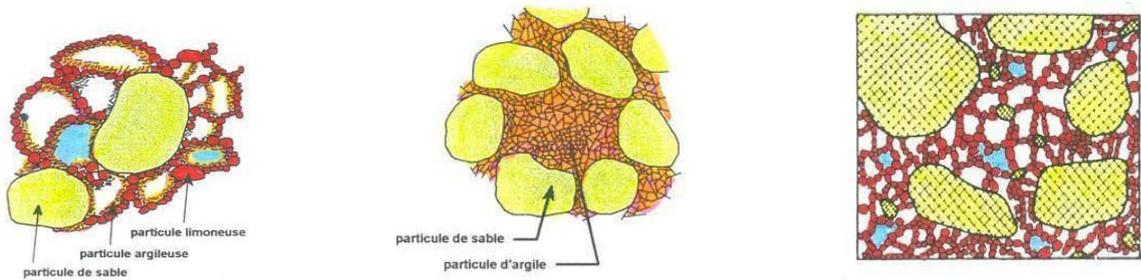
Sous l'influence d'une charge de compression (par exemple, sous le poids des couches de sol sus-jacentes), cette disposition chaotique peut se transformer en une structure plus organisée, dans laquelle la plupart des particules sont en position horizontale et la porosité est nettement plus faible Filliat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

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

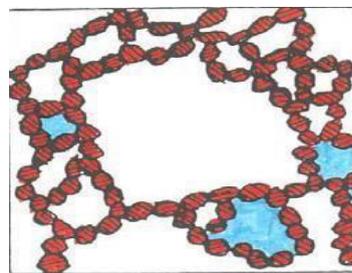
A-Structure en nid d'abeille

b-Structure floculée.

C-Structure dispersée



d- structure lâche



e- structure dense

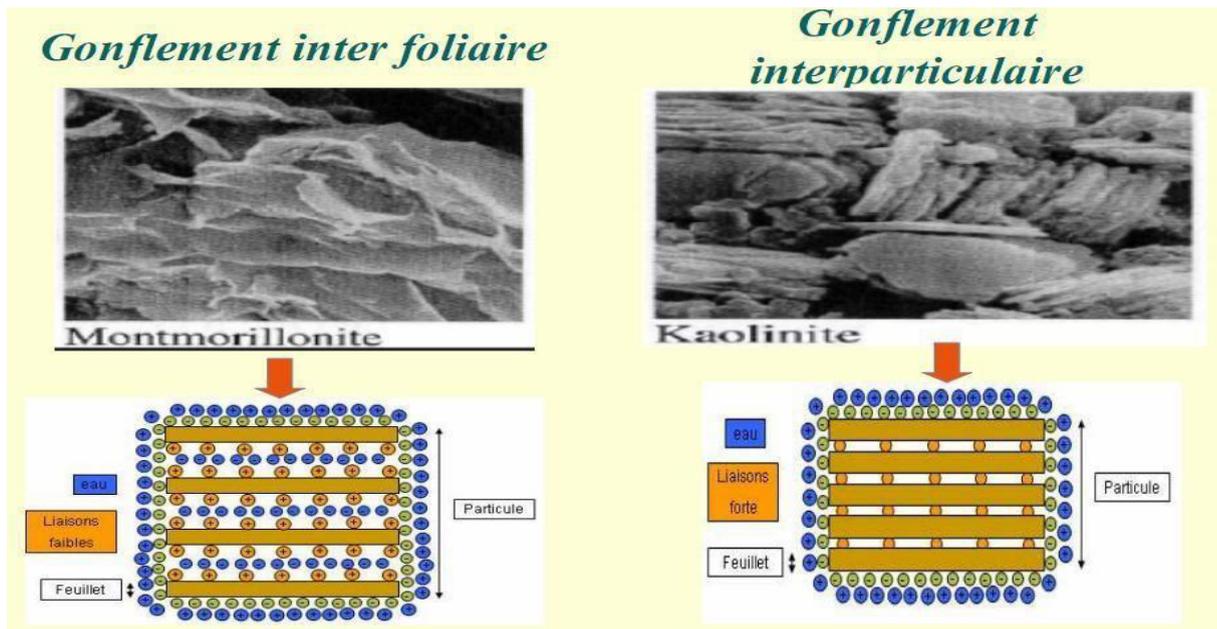
Figure I.10: Différentes structures des argiles, selon Terzaghi (1951) cité par Houssine EJJAOUANI (2008) Il se produit souvent, lors de la formation des sols sédimentaires, une sédimentation simultanée de particules argileuses, limoneuses et sableuses. Si ce processus se poursuit sans interruption pendant une période suffisamment longue, indépendamment des différences de vitesse

### I.3.2-Mécanisme de gonflement

Le processus de gonflement des sols argileux en contact avec l'eau et les sels dissous met en jeu, séparément ou de manière combinée, différents phénomènes physico-chimiques et mécaniques.

### I.3.3-Description du phénomène de gonflement

*Mouroux et al. (1988) ; Popescu (1986)* ont distingué deux types de gonflement, un gonflement intra-particulaire (inter-feuilles) et un gonflement inter-articulaire (figures I 12 et I 13).



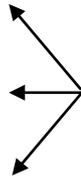
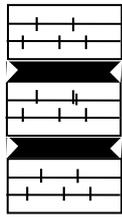
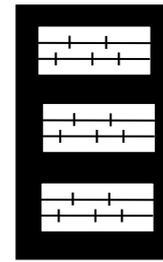
*Figure I.12: types de gonflements*

### **Le gonflement intra particulaire ou inter foliaire**

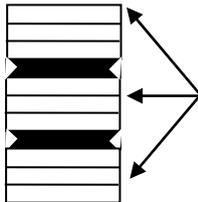
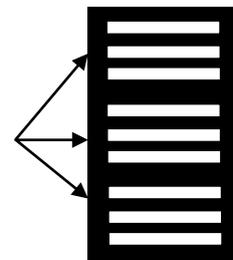
Il s'agit de l'adsorption de molécules d'eau sur la surface externe de la particule d'argile. Lors d'une hydratation interartriculaire, les changements de volume qui en découlent sont généralement faibles.

### **Le gonflement interartriculaire**

Pour les argiles dont la structure fait intervenir des cations compensateurs, il se produit au contact de l'eau une hydratation de ces cations. Le cation hydraté acquiert une taille plus importante par ce qu'il entoure de molécule d'eau. Il en résulte une augmentation de la distance inter foliaire et par conséquent un affaiblissement de la liaison entre les feuillets. Ce qui permet à d'autres molécules d'eau de passer entre les feuillets d'une même particule, c'est l'adsorption inter foliaire.

État secGonflement inter particulaireÉtat hydraté

*Minéraux ayant des liaisons inter  
foliaire fortes (illite, kaolinite)*

Gonflement inter foliaire

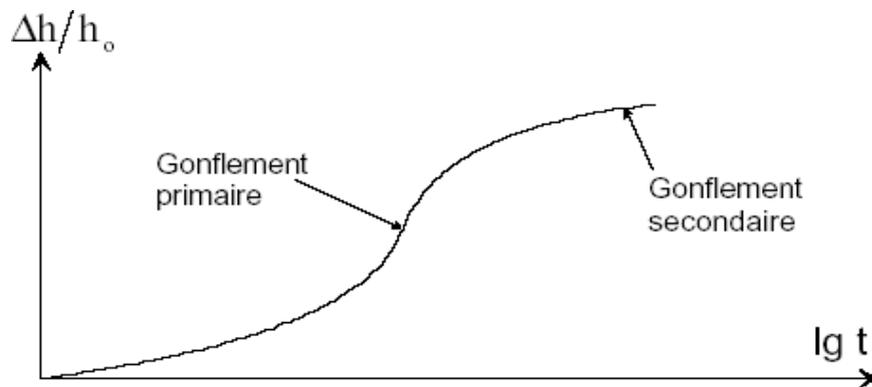
*Minéraux ayant des liaisons  
inter foliaire faibles (montmorillonite)*

**Figure.I.13: Mécanismes de gonflement des argiles par hydratation.** Bouzid. (1997) ; Bengraa(2004) et Gueddoudda(2005). *Holtz et Gibb (1956), Chen (1988)*

Le gonflement est divisé en un gonflement primaire et un gonflement secondaire, (figure I.14) représente la variation relative de la hauteur de l'échantillon en fonction du logarithme du temps, dans laquelle on distingue les deux phases de gonflement:

**Gonflement primaire:** qui a lieu très tôt, sa fin est caractérisée par un point d'inflexion permettant le changement de forme de la courbe.

**Gonflement secondaire:** qui est caractérisée par la partie linéaire de la courbe.



*Figure I.14: Courbe du gonflement en fonction du temps (Chen, 1988)*

### 1.3.4-Principales causes du gonflement

Quatre phénomènes principaux expliquent les causes du gonflement :

L'hydratation par adsorption.

Hydratation par osmose.

Hydratation par capillarité.

Transformations chimiques.

**I.4-Conclusion**

Cette partie a été consacrée à la description des argiles en général et particulièrement celles présentant un caractère gonflant. Nous avons présenté les différents types d'argiles et les liens structurels. Pendant ce temps, l'explication du phénomène de gonflement des argiles a permis de mettre en évidence plusieurs formes de gonflement. Cette synthèse, qui n'est pas exhaustive, montre le grand nombre de méthodes et d'approches développées pour estimer le potentiel de gonflement des sols de manière indirecte, c'est-à-dire sans réaliser d'essai de gonflement. D'un point de vue expérimental, il existe des tests œnométriques classiques qui permettent d'évaluer les paramètres de gonflement tels que le potentiel et la pression.

**CHAPITRE II**  
**Méthodes**  
**de stabilisation**  
**des sols gonflants**

**II.1-Introduction**

Le gonflement des sols argileux est un phénomène très complexe qui fait intervenir un grand nombre de paramètres intrinsèques et environnementaux. Un bon nombre de solutions ont été proposées pour résoudre ce problème, il existe plusieurs techniques de stabilisation, parmi elles, on peut citer deux méthodes principales:

Stabilisation mécanique (compactage, substitution, pré-mouillage, ajout d'adjuvants, etc...).

Stabilisation chimique (par l'ajout de matériaux tels que des sels, du ciment, de la chaux, des cendres volantes, etc...).

Cette partie de la bibliographie est consacrée à la présentation de quelques résultats obtenus par différents chercheurs dans le domaine de la stabilisation des sols gonflants.

**II.2- METHODE DE COMPACTAGE**

Le compactage est l'ensemble des mesures prises pour augmenter la densité apparente sèche du sol traité. Cela conduit à une réduction de son volume apparent (par diminution de l'indice des vides). Cette densification n'est pas un but en soi. Elle est recherchée par ce qu'elle implique d'autres conséquences:

**La première**, liée au concept de compacité, est l'élimination ou du moins la limitation du tassement. Cet objectif, qu'il soit ou non spécifiquement recherché, est toujours atteint ou au moins partiellement atteint par le compactage,

**La deuxième conséquence** est la réduction de la perméabilité de la couche traitée pour s'opposer à l'écoulement de l'eau,

**Une troisième conséquence** du compactage est l'amélioration des caractéristiques mécaniques qui en découlent généralement : portance et module de déformation, résistance à la compression et au poinçonnement, résistance au cisaillement....

Pour les sols fins, une réserve est nécessaire, car une augmentation de la compacité peut entraîner une diminution de la capacité portante et du motif de déformation à des teneurs en eau élevées.

*Dawson et Chen (1988) cité par Bengraa (2004)* recommander le compactage des argiles gonflantes à des densités minimales.

*Holtz et Gibbs (1956) cité par Gueddouda (2005)* montrent l'influence de la densité et de l'humidité sur le compactage de l'argile gonflante. Le gonflement sera faible lorsque le compactage se fait à faible densité et à forte teneur en humidité.

*Seed et al(1961) cité par Bengraa (2004 du côté)* notez que les argiles compactées du côté sec de l'optimum ont une plus grande tendance à gonfler que si elles sont compactées humide.

### **II.3-METHODE DE SUBSTITUTION**

Il s'agit de la suppression du gonflement du sol. **Mouroux (1969) cité par Bengraa (2004)**

Si la couche est mince, on peut l'enlever complètement. Si la couche est très épaisse, il n'est pas possible de l'enlever complètement, il est nécessaire d'excaver jusqu'à une certaine profondeur puis de remblayer avec du sable ou un autre matériau graveleux.

### **II.4-METHODE DE PREHUMIDIFICATION**

Il s'agit d'augmenter la teneur en eau du sol jusqu'à saturation. Pour cela, deux techniques sont utilisées:

- L'arrosage simple par jet.
- Création d'un bassin au-dessus du sol qui gonfle.

### **II.5-STABILISATION PAR AJOUT DE SABLE**

**Satyanarayana (1969), cité par Bengraa (2004)**, a étudié le comportement de l'argile Black Cotton dans le sud de l'Inde en tant que mélange avec du sable, et en tant que couche. Il a constaté que la pression de gonflement est réduite en ajoutant simplement de petits pourcentages de sable. Plus le pourcentage de sable augmente, plus la réduction de la pression diminue.

**Didier (1972), cité par Hachichi (2006)**, a étudié l'évolution du comportement d'une montmorillonite par ajout de sable. Il a montré qu'un ajout de 10% de sable était suffisant pour réduire la pression de gonflement d'environ 50% et que la relation entre le pourcentage de sable et la pression de gonflement était logarithmique..

**Mehmit et Ishibashi (1982) cités par Azouz, (2006)** ont mené une recherche expérimentale sur 8 mélanges argilo-sableux, en étudiant la variation du gonflement en fonction de la température (24°C, 38°C et 66°C). Ils ont constaté que plus le pourcentage de sable augmente, plus le gonflement diminue, en notant également qu'une réduction de 17% à 28% du gonflement lorsque la température diminue.

**Suratman (1985), cité par Azouz (2006)** a étudié la variation du gonflement d'un mélange de montmorillonite et de sable à différents pourcentages (10% à 50%) ; le sable étant de granulométrie moyenne ( $0,1\text{mm} < D < 0,5\text{mm}$ ). Il a trouvé une réduction du gonflement libre de 50% pour 30% de sable et une réduction de 70% pour 50% de sable.

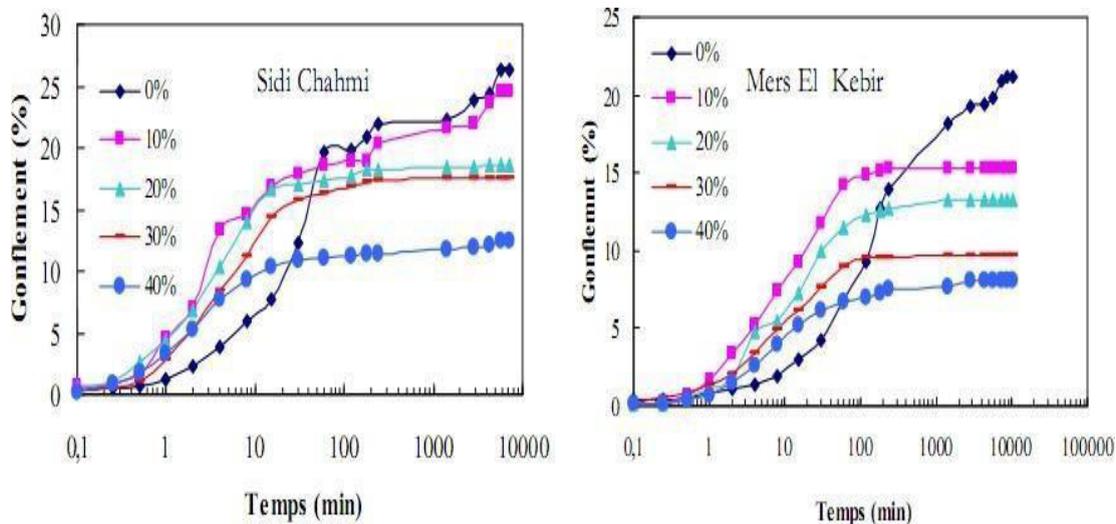
**Bengraa (2004)** a mené des recherches sur le gonflement des argiles dans la région d'Oran, en ajoutant trois types de sable (sable de carrière, sable de rivière et sable de plage) à différents pourcentages allant de 10% à 40%. Elle a montré que plus le pourcentage de sable est augmenté, plus la vitesse et la pression de gonflement diminuent.

**Gueddouda (2005)**, a travaillé sur le gonflement des argiles de la région de Laghouat en ajoutant du sable de dune à différents pourcentages (15%, 30% et 45%). Il est arrivé aux mêmes conclusions que Bengraa, à savoir que le sable de dune diminue également la vitesse et la pression de gonflement, augmentant ainsi la résistance mécanique pour les sols saturés et non saturés..

**Gueddouda et al, (2007)** ont étudié la stabilisation de trois argiles gonflantes : La bentonite de Maghnia, l'argile de Laghouat et l'argile d'Ain Amenas par l'ajout de sable de dune et par l'ajout de sel + sable. Ils sont arrivés à ce que certaines combinaisons montrent une réduction de 90% du potentiel de gonflement.**Hachichi et al (2009)** : ont étudié la stabilisation des deux argiles gonflantes (Sidi Chahmi et Mers El Kébir) de telle sorte que la tendance de la variation du gonflement dans le temps est la même pour tous les mélanges, car

selon les graphiques, plus le pourcentage de sable augmente, plus le potentiel de gonflement diminue. (Figure II.1) Il faut également noter qu'au début des essais, le gonflement de l'argile sans ajout est plus faible que celui avec ajout, mais avec le temps, ce gonflement augmente et devient plus important. Dans la première phase du gonflement, l'eau pénètre entre les particules et conduit à une relaxation de l'argile.

Les tensions dans les vides ; puisque l'argile seule est plus dense que mélangée avec du sable, alors l'eau prendra plus de temps pour relâcher les tensions. Au contraire, pour l'argile avec ajout, les vides apportés par le sable sont plus importants et donc, ils favorisent le gonflement des particules d'argile dans les mélanges. Par contre, dans la deuxième phase, le potentiel de gonflement est épuisé pour les mélanges avant de l'être pour l'argile seule ; en effet, dans l'argile seule, l'eau continue à pénétrer entre les particules qui sont plus nombreuses que dans les mélanges, les vides créés par le sable prennent une bonne part du gonflement.



**Figure II.1:** Variation du potentiel de gonflement dans le temps du mélange argile de Sidi Chahmi et Mers El Kébir+sable de rivière.

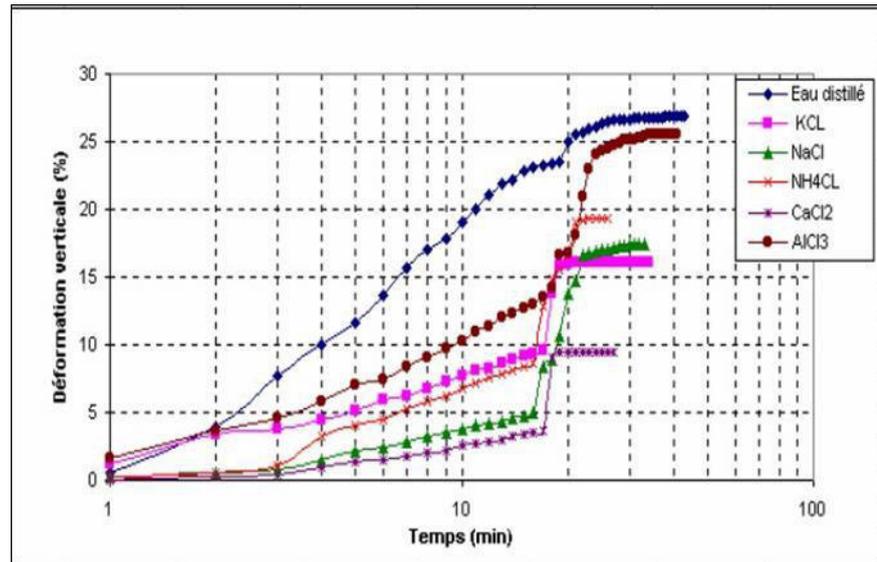
## II.6-STABILISATION PAR DES SOLUTIONS SALINES

Afin de vérifier l'efficacité des solutions salines en place, des échantillons intacts doivent être prélevés avant et après le traitement et leur gonflement mesuré en laboratoire. L'application de la technique de stabilisation des sols par gonflement des sels à des structures réelles doit être considérée avec prudence car il n'est pas impossible que les sels soient lessivés du sol et que leur effet finisse par

disparaître. Pour cela, une étude spécifique de lixiviation détaillée doit être réalisée, si possible dans les conditions du site, avant chaque cas de traitement, afin de définir la nature et la concentration des solutions salines à utiliser.

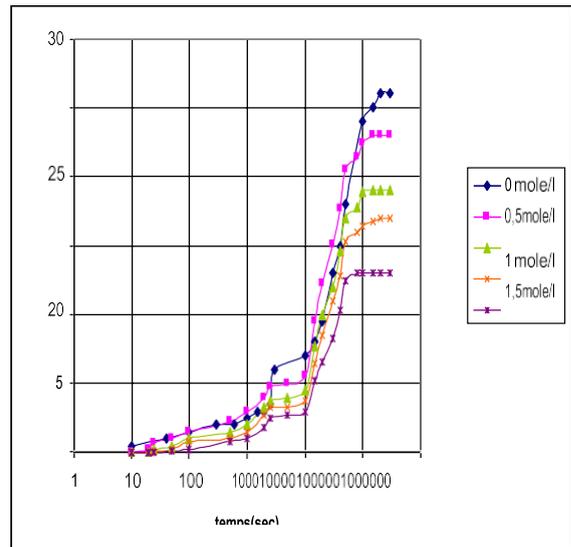
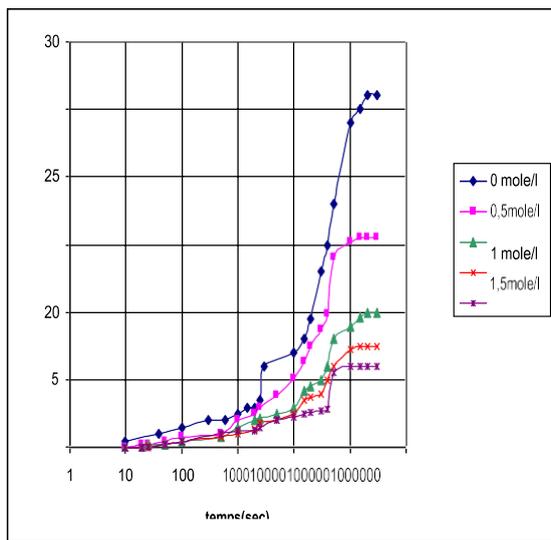
**Hachichi et Fleurreau(1999)**, cités par Azouz (2006) ont étudié la réduction du gonflement de plusieurs échantillons intacts d'Algérie par des sels. Dans cette étude, des réductions substantielles ont été obtenues avec des concentrations élevées de sels.**Hachichi et al (2000), Bouroukba (2003)**, ont étudié la réduction du gonflement des argiles de la région d'Oran par des sels de polymères. Des réductions importantes ont été observées par l'association d'un sel de chlorure d'ammonium et de polymères. **Aboubekretal (2003)** a étudié l'influence des sels sur le gonflement libre des argiles. L'étude a été réalisée sur des échantillons d'argile naturelle et artificielle en utilisant quatre sels différents (chlorure de potassium, chlorure de sodium, chlorure de calcium, sulfate d'ammonium. Des réductions significatives ont été observées par la combinaison d'un sel de chlorure de potassium mais pour le chlorure de calcium est moyennement faible. **Hachichi (2006)**, a étudié l'influence des sels sur le potentiel de gonflement et la pression de gonflement, en utilisant les sels, chlorure de potassium et chlorure de calcium et chlorure de sodium, les meilleurs résultats obtenus ont été avec le chlorure de potassium et le chlorure de calcium. En travaillant également sur l'effet sel+polymère sur le gonflement final et la pression de gonflement, il a été montré que son effet est plus important que celui de l'action du sel seul. Azouz (2006) a étudié l'effet des sels sur la stabilisation en utilisant les sels chlorure de calcium, chlorure de magnésium, chlorure de potassium, chlorure de sodium et chlorure d'ammonium (Figure II.2), les différentes actions des solutions salines ont conduit aux conclusions suivantes:

- Le chlorure de calcium et le chlorure de magnésium sont plus efficaces à des concentrations élevées.
- Le chlorure de potassium réduit le gonflement grâce à la fixation de ces cations entre les feuilles, le gonflement diminue et sa vitesse est rapide même à faible concentration.
- Le chlorure de sodium réduit également le gonflement mais à un faible taux.
- Le chlorure d'ammonium réduit modérément le gonflement à une concentration élevée.



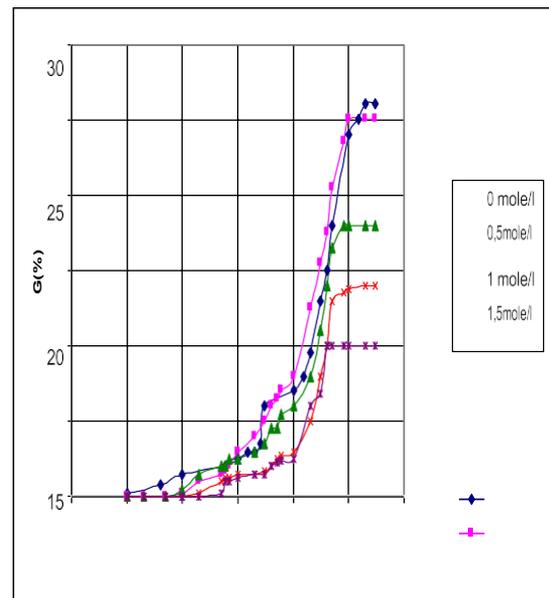
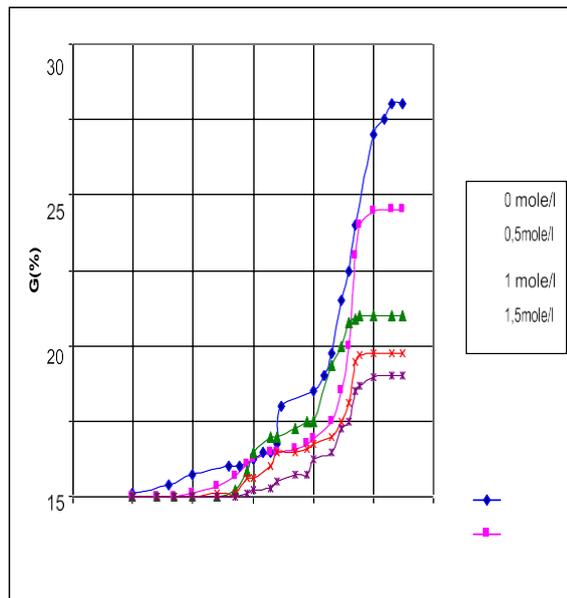
*Figure II.2 : Action des différents types de sels sur le taux de gonflement Azouz(2006).*

**La mara et al,(2006) cité par Smaida(2010)** a étudié deux sols, un de la région de Laghouat l'autre de la région d'in-Amenas par une solution saline à base de NaCl avec les concentrations : 0.1M;0.5M;1.5M, ils sont conclus que le potentiel et la pression de gonflement diminuent lorsque la concentration augmente. A 1.5M la réduction du gonflement du sol de Laghouat est de 51.26% et 81.25% pour la réduction de la pression de gonflement tan disque pour le sol de in-Amenas la réduction à 1.5M est de 44.74% du gonflement total pour le potentiel de gonflement et 86.49% pour la pression de gonflement. **Bengueneb (2009) Figure II.3 et II.4:** remarque que Le potentiel de gonflement diminue avec l'augmentation des concentrations salines. Exemple le KCl est un bon réducteur du potentiel de gonflement, pour une concentration de 0,5 mol/l en KCl a permis une réduction de près de 40 % pour la bentonite de M'zila et 46 %pour l'argile de Bourmadia. Pour la pression de gonflement constaté que une faible réduction par rapport au potentiel de gonflement avec tous les sels utilisés, il faut une forte concentration saline pour permettre de diminuer la pression de gonflement (**figure II.5**).



Action de chlorure de potassium

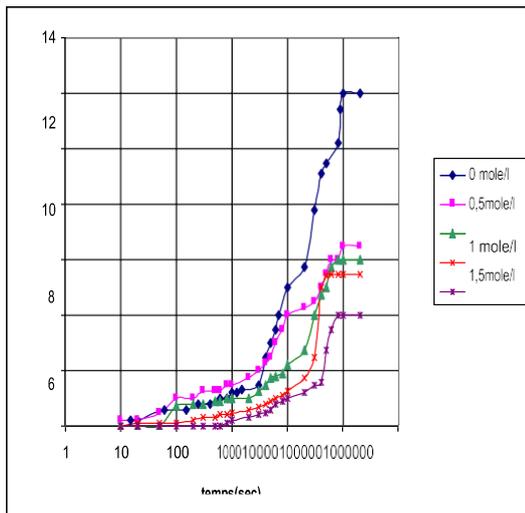
Action de chlorure de sodium



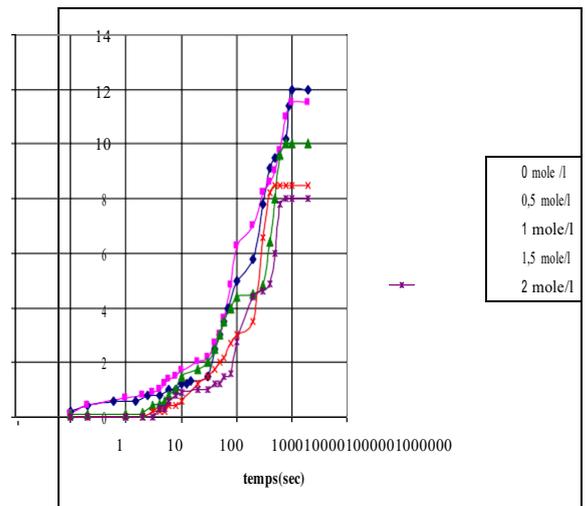
Action de chlorure de calcium

Action de chlorure d'aluminium

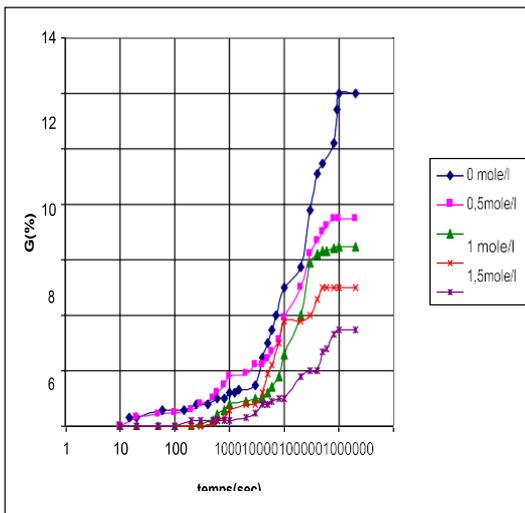
Figure II.3 : Évolution du potentiel de gonflement en fonction du temps en Présence de différentes concentrations salines la bentonite de M'sila



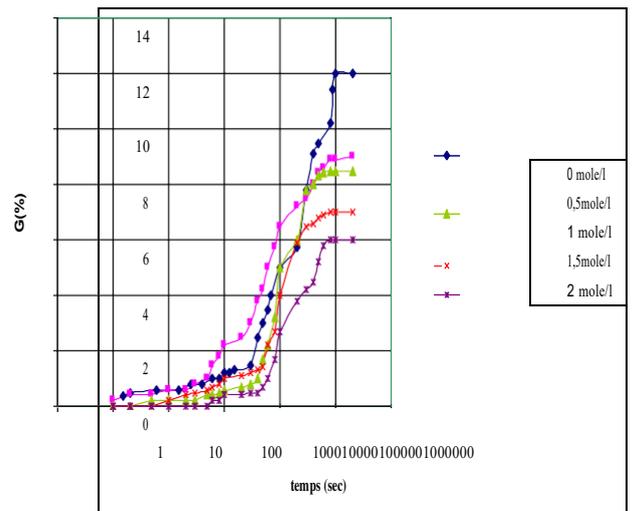
*Action de chlorure de potassium*



*Action de chlorure de sodium*

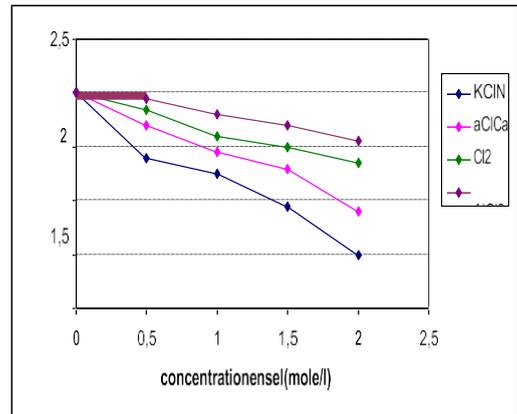
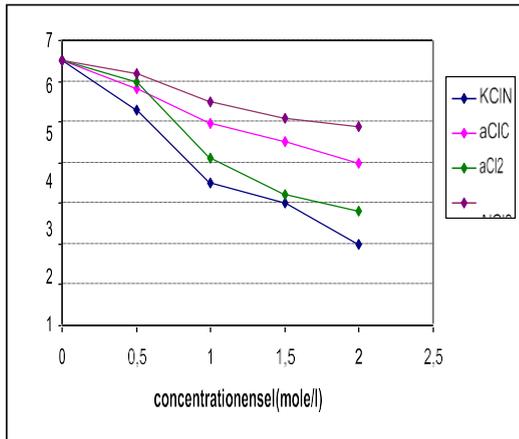


*Action de chlorure de calcium*



*Action de chlorure*

*d'aluminium Figure II.4:Évolution du potentiel de gonflement en fonction du temps en Présence Différentes concentrations salines de l'argile de Bourmadia*



a- bentonite de M'sila

b- l'argile de Bourmadia

Figure II.5 : Évolution finale de pression de gonflement en fonction de différentes concentrations

**Hachichi et al (2009)** : ont étudié la stabilisation de deux argiles gonflantes (Sidi Chahmi et Mers El Kebir) par des sels minéraux (figure II.6) : la présence de sels ayant donné le plus grand pourcentage de réduction est principalement observée pour de fortes concentrations de chlorure de potassium et de chlorure de calcium (66% et 52%) pour l'argile de Sidi Chahmi, (44% et 48%) pour celle de Mers El Kebir. Par contre, le chlorure d'ammonium est modérément efficace à forte concentration pour l'argile de Sidi Chahmi (29%) et pour l'argile de Mers El Kebir (38%). Le chlorure de sodium à forte concentration ne donne pas de bons résultats (22% et 28%) pour l'argile de Sidi Chahmi et pour celle de Mers El Kebir, respectivement, mais il a l'avantage d'être moins coûteux.

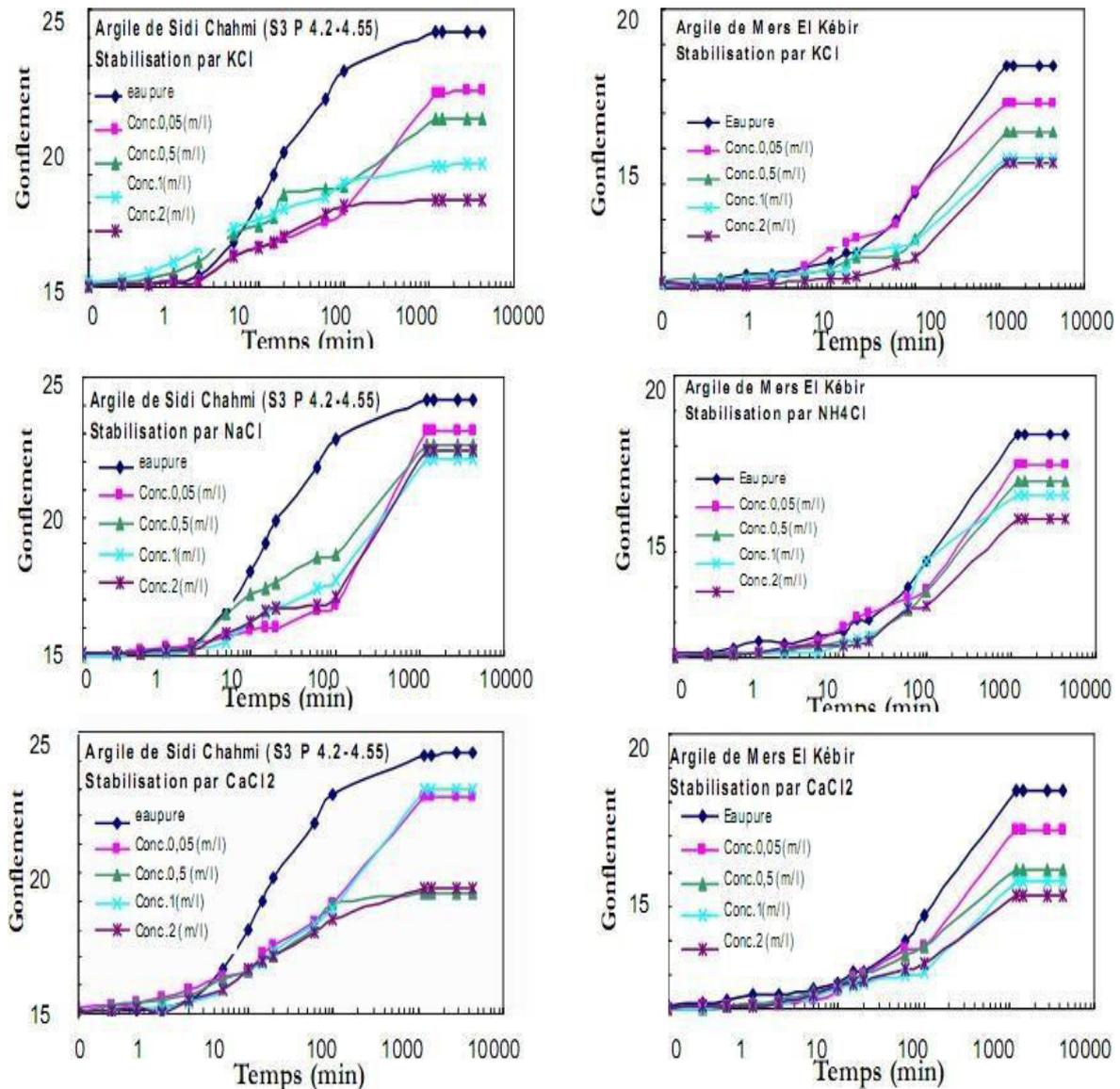


Figure II.6 : Courbes de gonflement des argiles de Sidi Chahmi et Mers El Kébir en présence de différents sels minéraux à différentes concentrations

### II.7-STABILISATION PAR LES LIANTS HYDRAULIQUES (CHAUX,CIMENT)

L'utilisation de la chaux comme liant est très ancienne : Grande Muraille de Chine localement en argile traitée à la chaux ; routes, maisons romaines (chaux + sable + terre argileuse).

L'utilisation du ciment date du début du siècle : en Allemagne, un grand nombre de sols d'aérodromes ont été stabilisés au ciment pendant la Seconde Guerre

mondiale. Mais depuis une vingtaine d'années, l'utilisation de ces liants s'est développée dans la construction des routes. Elle concerne principalement les sols fins (argileux, limoneux, etc...).

La chaux et le ciment réagissent avec la fraction argileuse et modifient son environnement chimique et sa structure minéralogique. Parmi les stabilisations les plus couramment utilisées:

### **II.7.1-Stabilisation par ajout de la chaux**

La chaux aérienne est utilisée sous forme de chaux éteinte ou de chaux vive, qui produit une plus grande réduction de la teneur en eau mais est plus délicate à manipuler (la chaux vive à 3% a le même effet que la chaux éteinte à 4%), citée par le Haras National (2004)

La chaux provoque deux actions différentes dans le sol:

Action immédiate : se produit directement après le mélange de la chaux dans le sol.

Action à long terme : peut durer de plusieurs mois à plusieurs années après l'application.

#### **Action immédiate**

##### **La chaux vive**

La chaux vive diminue la teneur en eau du sol par les phénomènes suivants

L'hydratation de la chaux vive : une partie de l'eau disparaît à cause de la réaction exothermique avec la chaux vive.



Chaux vive + eau = Chaux éteinte + Chaleur.

L'évaporation d'une partie de l'eau, provoquée par la chaleur dégagée par l'hydratation de la chaux vive (15,5 Kcal/mol), *citée par Azouz (2006)*.

L'apport de matière sèche qui diminue le rapport de la masse d'eau sur la masse de solide (teneur en eau). La diminution de la teneur en eau est de l'ordre de 1% de la teneur en eau par pourcentage de chaux vive introduite.

L'ajout de chaux au sol provoque une modification de la qualité des argiles par échange des cations alcalins ( $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ...) par les cations  $\text{Ca}^{++}$  apportés par la chaux, cette action développe des forces électriques conduisant à une agglomération des fines particules d'argile en particules grossières et friables. *Cité par les Haras nationaux (2004).*

**Action à long terme**

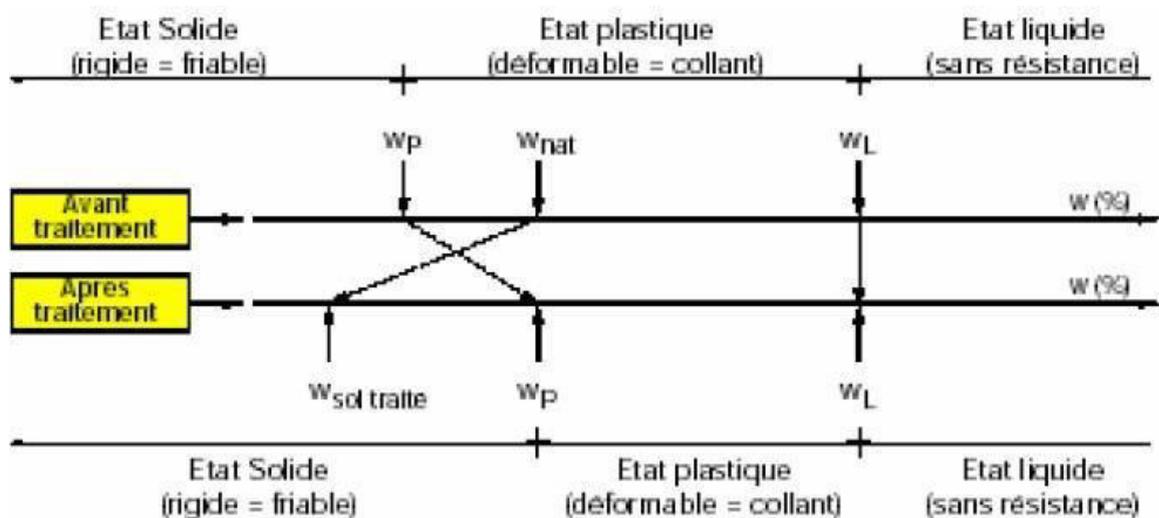
**La chaux éteinte**

La chaux éteinte diminue également la teneur en eau, mais uniquement en ajoutant de la matière sèche au sol. La diminution de la teneur en eau est limitée à 0,3% de chaux hydratée introduite.

La chaux influence les charges électriques autour des particules d'argile et modifie ainsi les champs électriques entre ces particules, ce qui conduit à leur floculation.

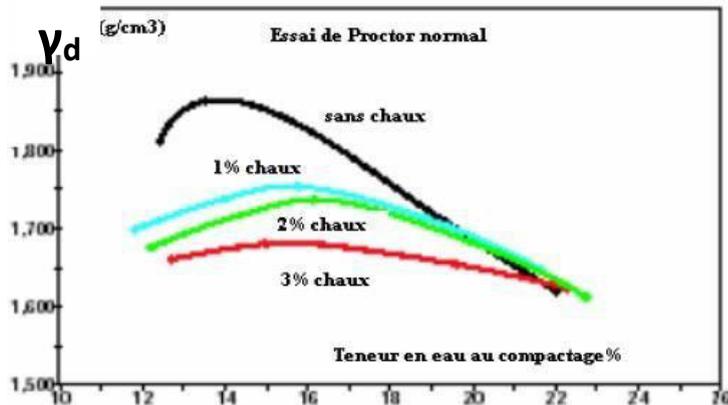
L'effet de la chaux hydratée est une augmentation de la limite de plasticité  $W_P$  et une diminution de l'indice de plasticité. ( $I_P = W_L - W_P$ ). *Azouz(2006).*

La figure II.7 montre que la diminution de la teneur en eau naturelle du sol traité et la diminution de l'indice de plasticité peuvent faire passer un sol d'un état plastique (déformable, collant - difficile à compacter) à un état sec rigide.



**Figure II.7: Variation de l'indice de plasticité avec l'ajout de la chaux.**  
Azouz(2006).

La figure II.8 montre que la courbe Proctor d'un sol traité à la chaux est déplacée vers la droite et vers le bas par rapport à la courbe du sol naturel non traité, ce déplacement prouve que le sol réagit bien à la chaux.



**Figure II.8: Influence de la chaux sur les caractéristiques de compactage,**  
Azouz, (2006)

**Galloway et Buchanan (1951) cité par Azouz (2006).** Ont montré que la relation entre la chaux et l'argile est le résultat de deux processus :

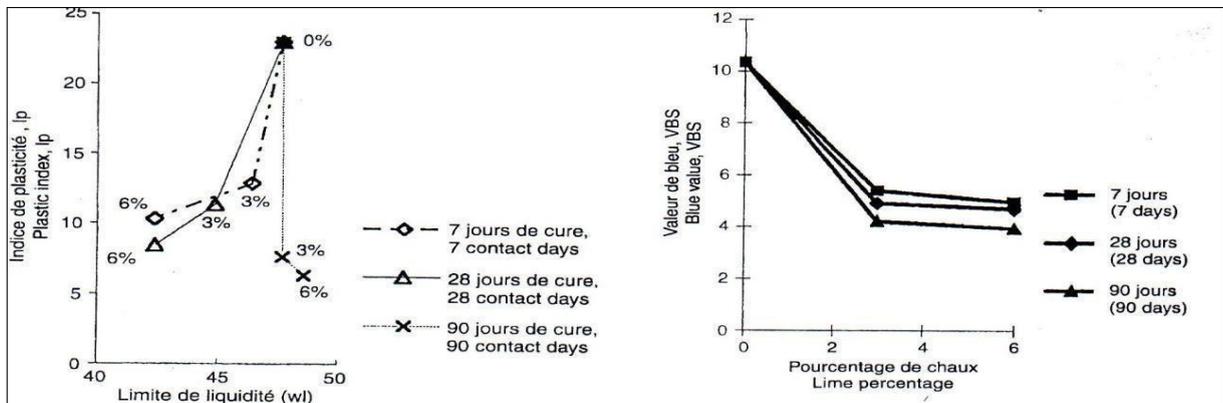
- Une réaction d'échange ainsi qu'une adsorption d'ions calcium non échangés, le résultat est une diminution de la capacité d'échange.
- Un agent cimentant se forme, il lie les particules entre elles, la chaux peut en effet réduire le potentiel de gonflement des argiles gonflantes.

**Goblet et al (1969)** a montré que l'ajout d'un petit pourcentage de chaux de 2 à 6 % au sol entraîne une réduction significative du gonflement et augmente sa résistance.

**Afès et Didier (2000) cités par smaida (2010)** ont réalisé un traitement de l'argile de Mila par 3% et 6% de chaux pour des temps de cure de 7, 28, et 90 jours, l'étude du gonflement de cette argile a été réalisée selon deux mode de conservation du mélange chaux-argile : (1) en vrac à l'état expansé sans perte de teneur en eau ; et (2) : compacté en anneaux immédiatement après traitement et

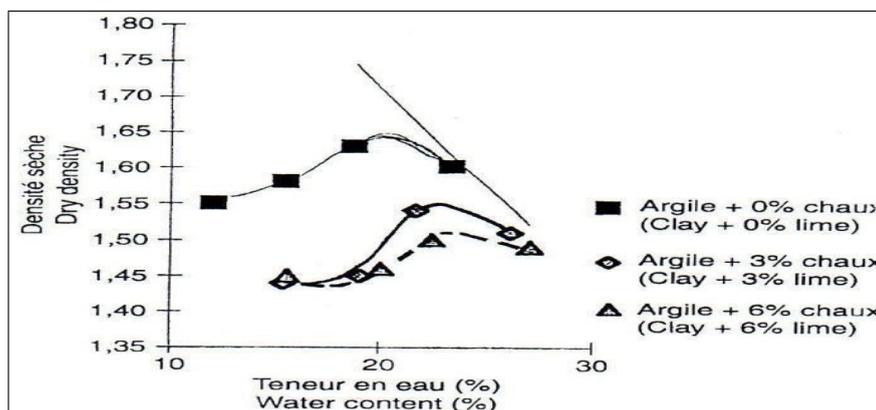
conservé avec la teneur en eau du mélange..Les constatations tirées de cette étude sont les suivantes:

L'évolution des limites de consistance : la figure II.9 montre que l'argile de plasticité moyenne a évolué vers un limon de faible plasticité, cette évolution est liée au pourcentage de chaux et à la durée du temps. Une diminution de la valeur du bleu (surface spécifique) est proportionnelle au pourcentage de chaux et à la durée de la cure, figure II.10).



**Figure II.9 : Variation des limites de consistance en fonction temps** **Figure II.10 : Évolution de la valeur au bleu en fonction de Pourcentage de chaux.**

Une diminution de la densité sèche maximale et une augmentation de la teneur



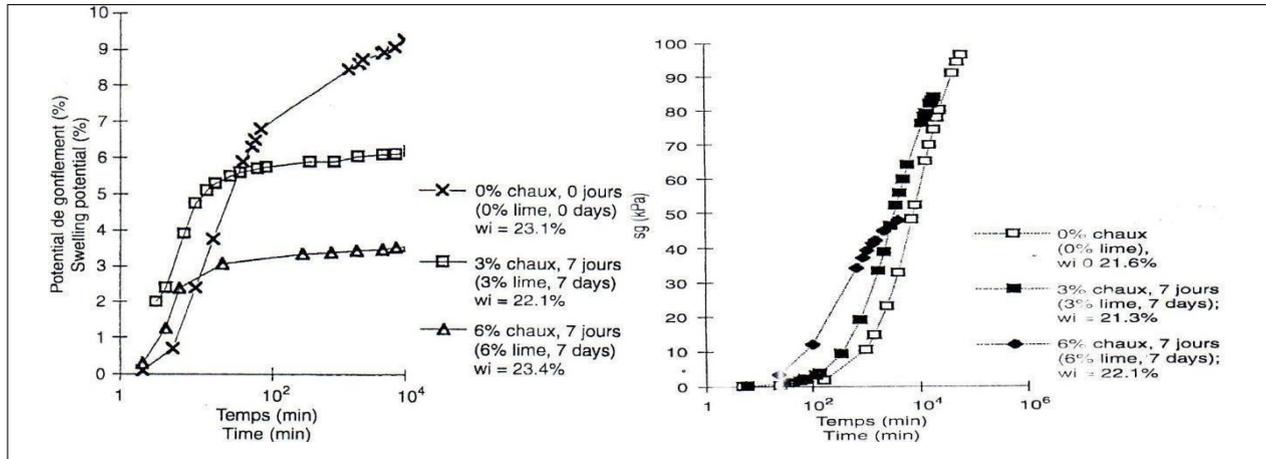
en eau. Optimale. Figure II.11.

**Figure II.11: Courbe Proctor de l'argile traitée à la chaux et non traitée**

Le potentiel de gonflement final et la pression de gonflement finale diminuent avec l'augmentation de la température de l'eau. Pourcentage de chaux et du temps de cure. Figures II.12 et II.13.

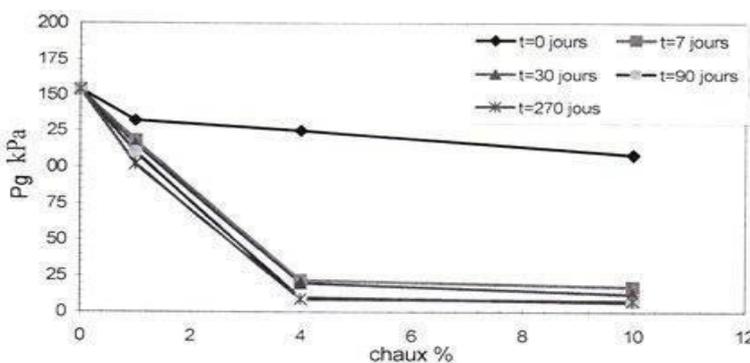
Figure II.12: Evolution du potentiel de gonflement

Figure II.13: Évolution



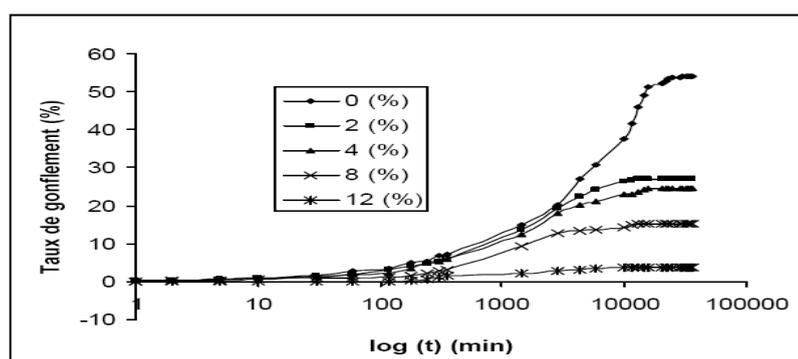
de pression des éprouvettes traitées à 3et6% de chaux conservées gonflement suivant le premier

**Khattab (2002), cité par Hachichi (2006)**, a réalisé des essais de pression de gonflement sur des échantillons d'une argile gonflante (argile de la région parisienne, France, nommée Fo Ca), compactés selon le Proctor optimum à différentes teneurs en chaux et pour des temps de cure de 0, 7, 30, 90 et 270 jours, et a conclu que les résultats montrent que la pression de gonflement a été pratiquement éliminée après 7 jours en utilisant de la chaux à 4%, et qu'une quantité de chaux supérieure à 4% contribue très peu à la réduction de la pression de gonflement (Figure II.14).



**Figure II.14 : Effet de la chaux sur la pression de gonflement des échantillons traités compactés à l'OPN Khattab (2002) ; cité par Hachichi(2006)**

*Djedid et al, (2005)* (figure II.15), Les résultats des essais de gonflement libre effectués sur des échantillons reconstitués d'argile de Tlemcen et dosés avec différents taux de chaux et de ciment ont permis de conclure que : le gonflement diminue lorsque le dosage augmente. La chaux et le ciment ont des effets presque similaires sur les paramètres de gonflement. Pour un taux de dosage identique, le gonflement produit est presque identique. Le gonflement est pratiquement nul pour le dosage de 12%.

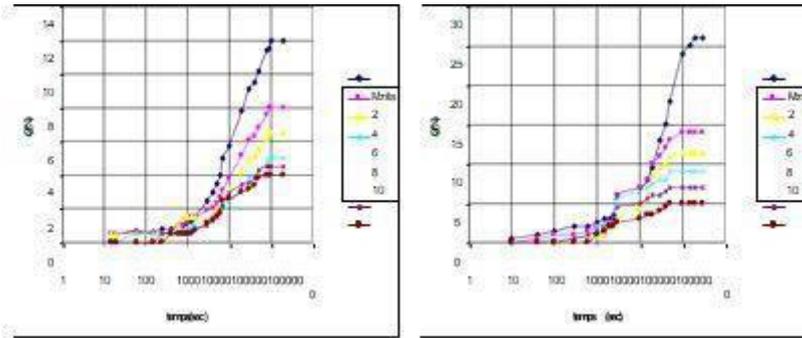


**Figure II.15: Effet du dosage à la chaux sur le gonflement de la Bentonite de Meghnia.**

*A.Djedid et al (2005).*

*Menad (2008)* : est conclu à partir des résultats des tests audiométriques effectués sur des échantillons reconstitués d'argile de Bourmadia et de bentonite de M'zila et dosés avec différents taux de chaux (2%,4%,6%,8%,10%) :

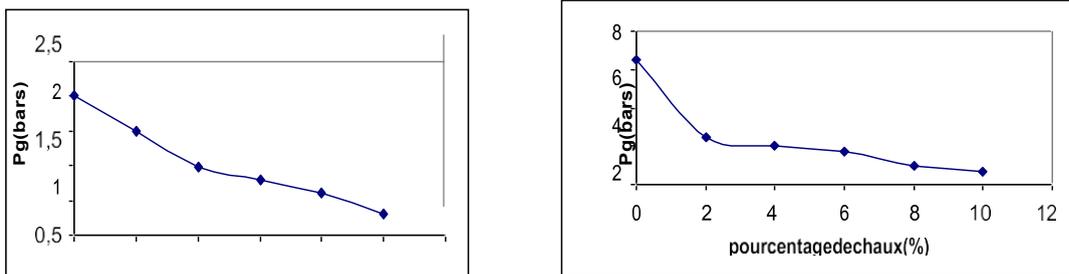
La tendance de la variation du gonflement dans le temps est la même pour tous les mélanges (pour les deux sols) et lorsque le pourcentage de chaux augmente, le potentiel de gonflement diminue. Figure II.16



**a- argile de Bourmadiab- bentonite de M'zila Figure II.16: Variation du potentiel de gonflement dans le temps en Fonction du pourcentage de chaux utilisé**

La pression de gonflement diminue avec l'augmentation du pourcentage de chaux et ceci pour les deux sols. Figure II.17 La variation la plus remarquable est l'addition de 2% de chaux à la bentonite de M'zila où une diminution de 61% de la pression de gonflement a été enregistrée.

Pour les autres pourcentages de chaux, les variations sont presque identiques pour les deux matériaux.



**A- Argile de Bourmadia b-bentonite de M'zila Figure II.17: Variation de la pression de gonflement en fonction du pourcentage de chaux utilisé**

Aissiou, Nechnech (2009), ont réalisé des essais géotechniques sur deux échantillons de sol [Chéraga (ech1), Ouled Fayet (ech2)], la chaux utilisée pour l'amélioration est une chaux éteinte produite dans la ville de Hassasna, Unité Erco, wilaya de Saida. Les résultats de cette étude sont les suivants:

L'ajout de 4 % de chaux double la résistance à la compression des sols argileux.

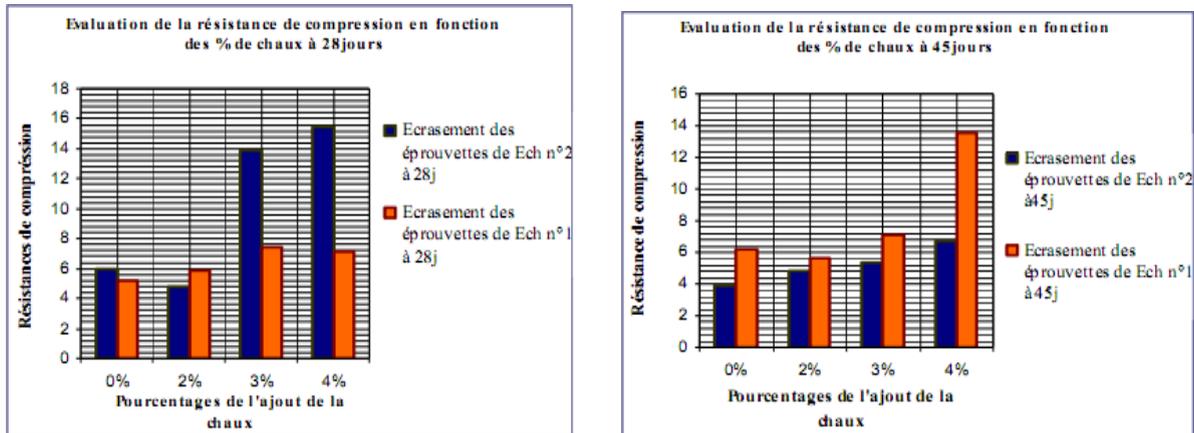
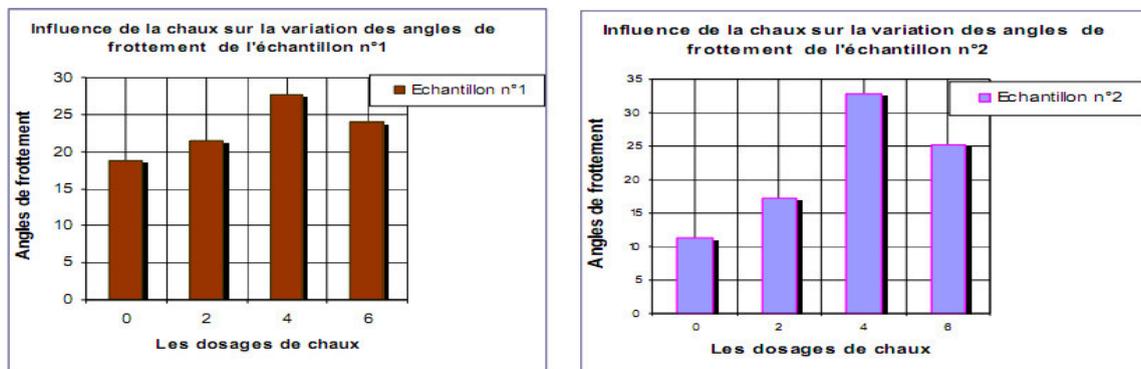


Figure II.18.

**Figure II.18: Histogramme de résistances de compression des sols en fonction des dosages en chaux à 28 jours et 45 jours**

La même teneur a donné des résultats satisfaisants en ce qui concerne la résistance au cisaillement qui a été améliorée et pratiquement doublée avec 4% de chaux, l'angle de friction a connu des augmentations de valeurs à différents dosages, la cohésion qui était initialement faible a connu une légère amélioration à 2% de dosage pour l'échantillon n°2 et une amélioration remarquable à 4%, l'amélioration de la cohésion pour le 1er échantillon a été révélée à 6%. Ceci est dû à la réaction qui a lieu lorsque le sol est compacté et qui est de nature



pouzzolanique. Figure II.19

**Figure II.19: Histogramme de variation de l'angle de frottement des deux échantillons**

**II.10- CONCLUSION**

Suite aux conséquences des sols expansifs sur les structures géotechniques de surface et souterraines, plusieurs chercheurs se sont intéressés à leur stabilisation. Les différentes recherches ont été orientées sur les ajouts qui minimisent le potentiel et la pression de gonflement.

Un grand nombre de méthodes et d'appareils ont été développés, pour connaître l'influence de l'efficacité d'une solution ou d'un produit sur la stabilisation d'un sol argileux. Ce chapitre a été consacré à l'étude bibliographique présentant l'état d'avancement des recherches 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, la durée de l'opération, la disponibilité des matériaux à utiliser ainsi que les conditions environnementales.

# **CHAPITRE III**

## **Stabilisation des sols gonflants**

### Chapitre 3 : Identification et caractérisation des argiles gonflantes de la région de Sidi Aïssa

#### INTRODUCTION

La ville de Sidi-Aïssa est une commune située en Algérie dans la région de M'Sila. Elle est touchée par le phénomène de retrait-gonflement où plusieurs structures construites sur des sols argileux se sont fissurées suite à ce phénomène, après les nombreux dégâts survenus durant la période de sécheresse, ce constat amène à s'interroger sur les causes, notamment climatiques, de ce risque géologique coûteux pour la collectivité alors qu'il pourrait être facilement prévenu....

#### GÉOGRAPHIE

La ville de Sidi Aïssa est située sur les Hauts Plateaux, à une altitude de 640 m, à 30 km au sud de Sour El Ghozlane. Carrefour entre plusieurs wilayas, M'Sila, Bouira et Médéa, elle est une importante voie de communication entre le Nord et le Sud de l'Algérie et une plaque tournante du commerce dans la région (fig.III.1).

Son climat est continental, froid en hiver et très chaud en été.



Figure III.1: Localisation du site de Sidi Aïssa dans la wilaya de M'sila

#### CLIMATOLOGIE

Températures et Précipitation

Sidi Aïssa bénéficie d'un climat de steppe. Tout au long de l'année, les précipitations sont faibles à Sidi Aïssa. La carte climatique de Köppen-Geiger classe le climat dans la catégorie BSk. Sur l'année (fig. III.2), il tombe en moyenne 339 mm de pluie par an (voir annexes A-21 à A-23).

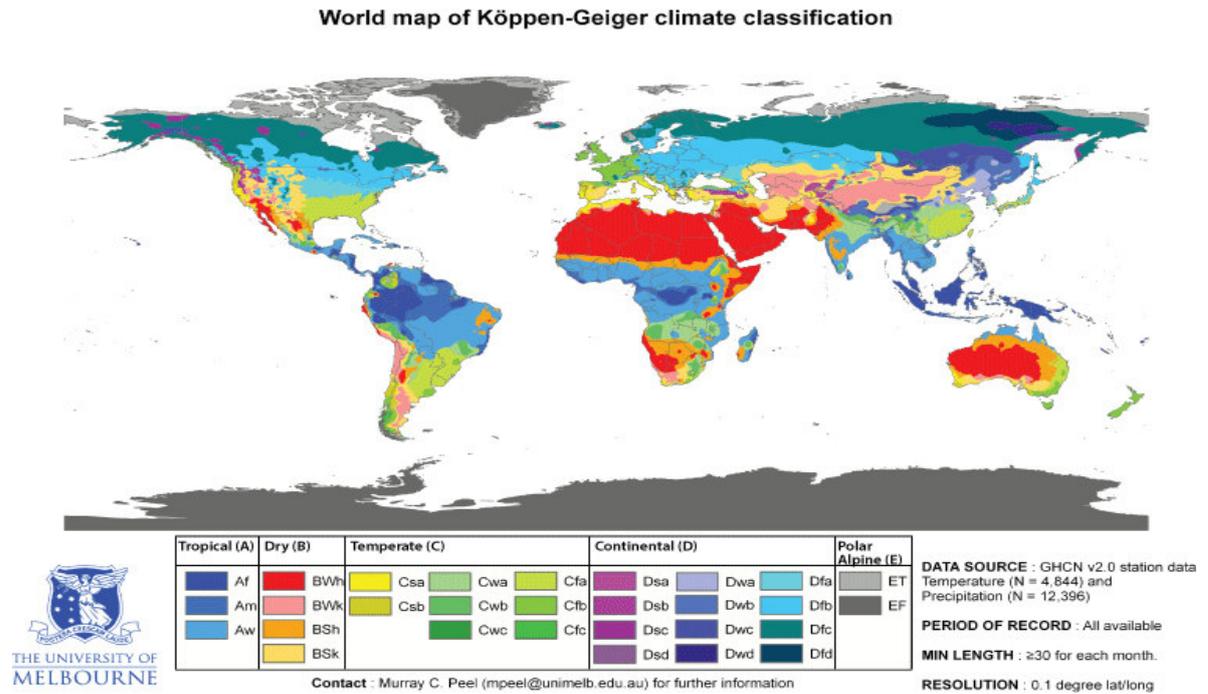
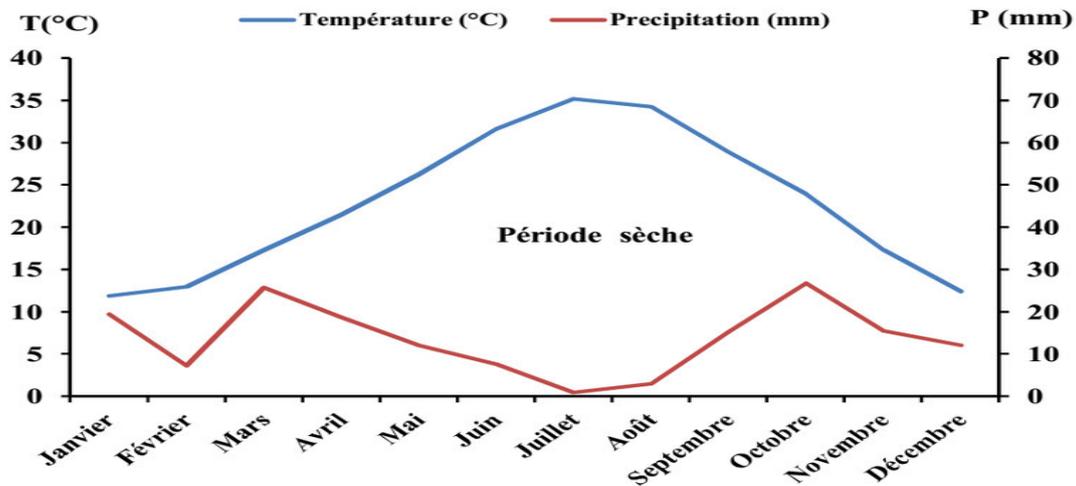


Figure III.2: Carte climatique de Koppen-Geiger.



**Figure III.3: Diagramme ombrothermique de BAGNOULS et GAUSSEN (2015-2021) de la région de M'Sila**

Le mois le plus sec est juillet avec seulement 7 mm. Le record de précipitations est enregistré en janvier. Elles sont de 41 mm en moyenne.

La température moyenne est de 26° entre janvier et juillet. En hiver, les gelées sont assez rares, mais la température dépasse fréquemment 40° pendant les mois de juillet et août. Certaines années sont marquées par un régime franchement saharien avec de faibles précipitations, de longues périodes de chaleur et de fréquents sirocos qui, en quelques heures, dessèchent la surface du sol et toute la végétation .

### GÉOLOGIE RÉGIONALE

La carte géologique au 1:500.000 que nous avons consultée (Fig. III.4), indique que la zone de Sidi Aissa est constituée de formations qui appartiennent à une structure complexe, formant une stratification comme suit :

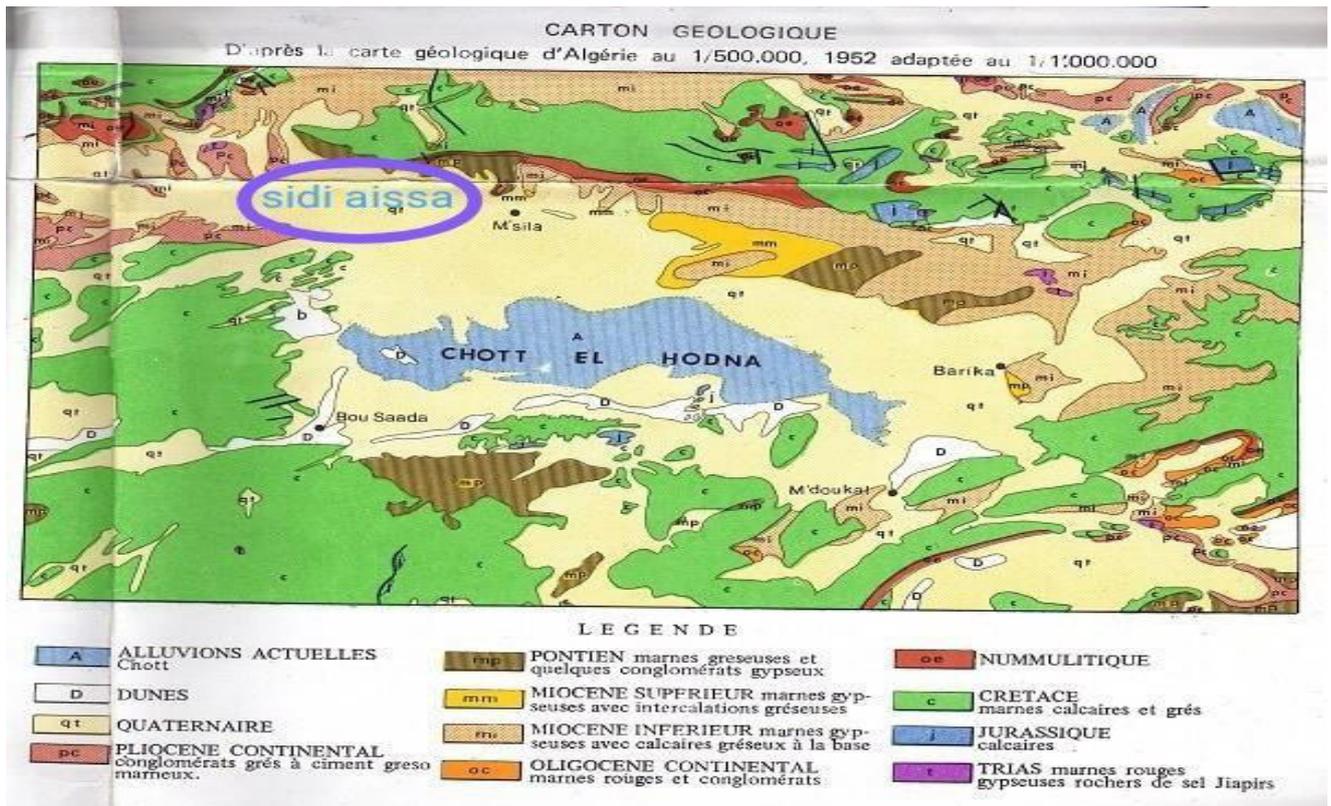


Figure III.4: Carte géologique de M'sila [Direction générale des fores Antenne M'sila]

-**Quaternaire** : Constitué essentiellement d'alluvions récentes occupant la plaine et caractériser par des sols de type : limon, argile et gravier. Ces sols présentent parfois un faciès de croûte, ce qui donne alors des terrains d'aspect compact.

-**Miocène inférieur** : Il s'agit de marnes grises riches en microfaune, et de grès fins jaunâtres ou beiges, formant des bancs de forme arrondie alternant avec des marnes.

- **Oligocène** : constituée d'argiles verdâtres, de grès, de quartzites et de conglomérats brisés.

-**Lutétien supérieur** : Constitué de marnes brunes légèrement gypseuses, contiennent une riche microfaune, avec des intercalations de lumachelles d'*ostreamulticosta*.

La présence d'argiles et de marnes est très remarquable dans la constitution de la zone étudiée.

**CARACTÉRISTIQUES GÉOTECHNIQUES DU SITE**

- Dans le cadre d'une reconnaissance géotechnique du site préalable à la réalisation d'un projet à Sidi Aissa, les essais ont été réalisés au niveau de :
- Laboratoire des Travaux Publics du Centre (LTPC, Antenne de M'sila),
- Laboratoire des Travaux Publics d'Est (LTPE, Antenne de Sétif- Bordj),
- Laboratoire de génie civil à l'université de B.B.A,
- Laboratoire Mécanique de Sol et Géotechnique Bouziane (LMSG Bouziane) à B.BA.
- Le prélèvement des échantillons est effectué sur deux sites différents touchés

Par le phénomène de gonflement comme suit :

- quatre sondages réalisés sur le premier site,
- un sondage réalisé sur le deuxième site noté n° 5.

Et nous ont permis de cumuler les résultats suivants :

**lithologie du terrain**

Les échantillons prélevés dans le cadre de cette étude ont été collectés par le [LMSG, B] à partir de quatre forages réalisés à l'aide d'un carottier, et un cinquième forage a été réalisé. Ces sondages montrent un sol constitué d'une formation géologique meuble, représentée principalement par de l'argile sur une grande épaisseur; cette formation de base est recouverte de croûtes sableuses et de limons sableux dont l'épaisseur ne dépasse pas le seuil de 2 m.

Sondages n°1 :



**Figure III.5: Texture de l'argilite de Sidi Aissa**

**Caractéristiques physico-mécaniques**

Après avoir reçu les échantillons en laboratoire, nous avons effectué des tests et des analyses pour la détermination des caractéristiques physico-mécaniques, dont les résultats sont présentés dans le tableau ci-dessous :

**Tableau III.1- La détermination des caractéristiques physico-mécanique.**

Sondage		Identification						
N°ECH	Prof(m)	W(%)	Yh(t/m <sup>3</sup> )	Yd(t/m <sup>3</sup> )	Sr(%)	80μ(%)	WL(ù)	Ip(%)
1	4.0/4.5	24	1.9	1.7	56	93	67	36
2	3.0/3.5	21	1.85	1.6	51	88	66	34
3	2.5/3.0	18	1.8	1.6	60	91	64	32
4	3.5/4.0	23	1.9	1.65	55	95	62	33
5	3.0/3.5	/	/	/	/	85	59.34	35.58

**a. Densité humide et sèche (yh) et (yd)**

La densité sèche mesurée sur les mêmes échantillons est de l'ordre de 1,6 et 1,7t/m<sup>3</sup>, ce qui donne au sol une densité apparente humide de l'ordre de 1,8 à 1,9t/m<sup>3</sup>.

Selon la norme géotechnique, les sols se situent dans les familles de sols semi-denses à denses.

**b. Granulométrie**

Effectuée sur l'échantillon n° 5 (fig III.6).

Les annexes (A-1 à A-4) présentent les résultats détaillés de l'analyse granulométrique.

**- Par tamisage (NF P 94-056)**

Son but est de déterminer la répartition des particules qui forment le squelette des sols afin de les classer.

L'essai consiste à séparer les grains agglomérés d'une masse connue de matière par agitation sous l'eau, à fractionner cette terre, une fois séchée, au moyen d'une série de tamis et à peser successivement le refus cumulé sur chaque tamis. La masse de refus cumulée sur chaque tamis est rapportée à la masse sèche totale de l'échantillon soumis à l'analyse.

- Par sédimentométrie (NF P 94-057)

Les particules inférieures à 80 µm séparées du reste du sol par tamisage sont mises en suspension dans de l'eau additionnée d'un défloculateur. Les particules sédimentent à des vitesses différentes selon leur taille. Au moyen d'un densimètre est

mesurée l'évolution dans le temps de la densité de la solution et de la profondeur d'immersion du dispositif. La distribution pondérale de la taille des particules est calculée à partir de ces données.

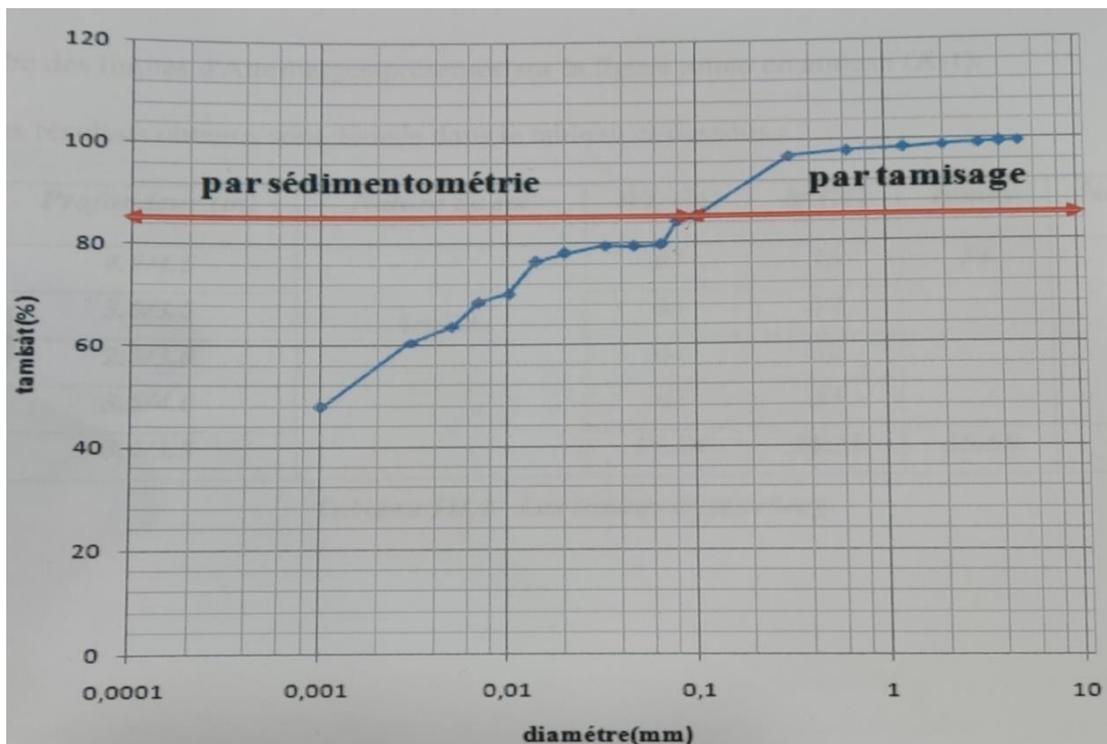


Figure III.6: Courbe granulométrique par tamisage et sédimentation.

Les tests granulométriques effectués sur les argiles du second site ont montré que cette formation est de texture fine, où le pourcentage de passage au tamis de 80µm est de 85%, et le pourcentage de particules inférieures à 2 µm est de 56%.

c. Limites d'Atterberg (NF P94-051)

Les limites d'Atterberg ont été réalisées pour distinguer la plasticité par la connaissance des limites de Liquidité (WL), de Plasticité (Wp) et de l'Indice de Plasticité ( $I_p=WL-Wp$ ) :

Les essais de plasticité réalisés avec la coupe Casa grande, ont donné des valeurs de limite de liquidité entre 62 et 67% pour les échantillons du premier site et des indices de plasticité entre 32 et 36%.

La limite de liquidité pour le second site est proche de 60% avec un indice de plasticité de 35,58%.

Les résultats des limites d'Atterberg sont regroupés dans les tableaux ci-joints (A-5, A-6).

La courbe de la limite d'Atterberg est présentée dans la figure ci-jointe (A-1).

Les résultats obtenus sont donnés dans le tableau ci-dessous :

**Tableau III.2- Les limites d'Atterberg**

<b>ECH N°</b>	<b>Profondeur(m)</b>	<b>Nature de sol</b>	<b>WL(%)</b>	<b>Ip(%)</b>	<b>Ipmoy</b>	<b>% moy &lt; 2µm</b>
<b>01</b>	<b>4./4.5</b>	<b>Argilite</b>	<b>67</b>	<b>36</b>	<b>34</b>	<b>85</b>
<b>02</b>	<b>3.0/3.5</b>		<b>66</b>	<b>34</b>		
<b>03</b>	<b>2.5/4.0</b>		<b>64</b>	<b>32</b>		
<b>04</b>	<b>3.5/4.0</b>		<b>62</b>	<b>33</b>		
<b>05</b>	<b>3.0/3.5</b>		<b>59.34</b>	<b>35.58</b>		

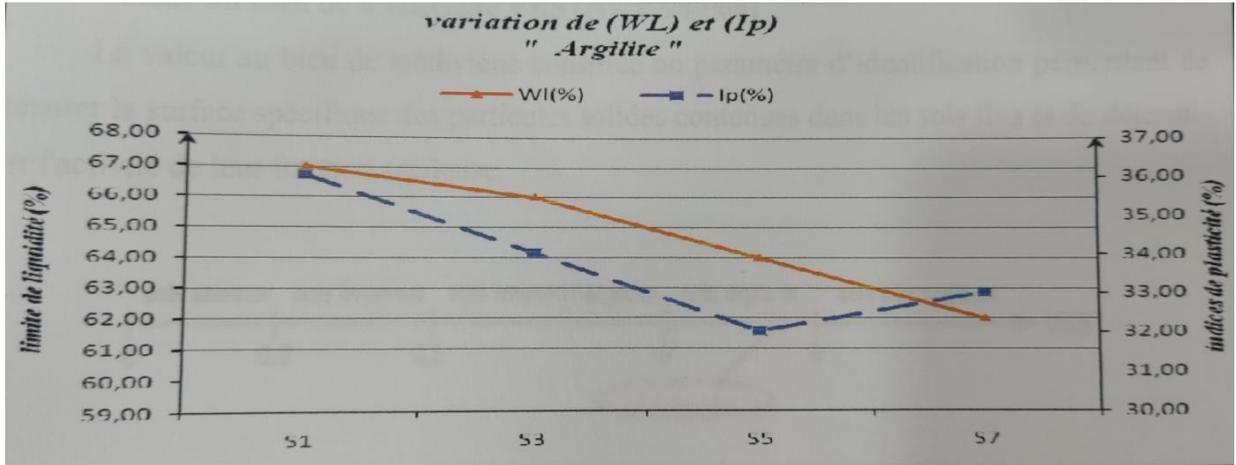
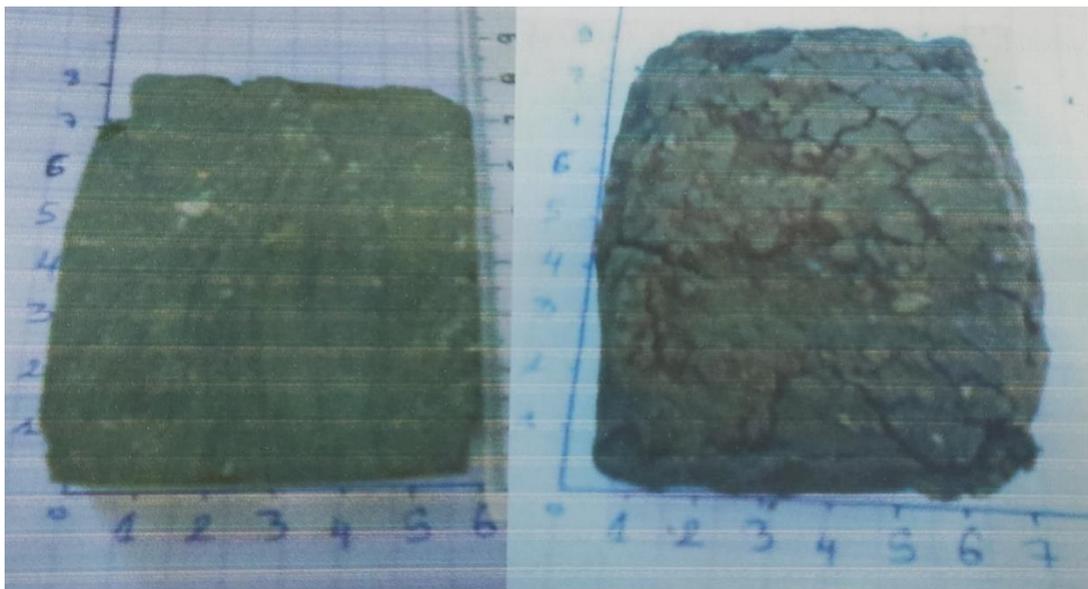


Figure III.7: Indice de plasticité et limite de liquidité en fonction de profondeur du 1er site.

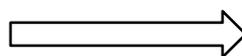
d. La variation de la teneur en eau

L'ajout d'eau a donné une première idée du comportement de gonflement du sol (Fig. III.7).

Figure III.8: Échantillon d'argile gonflant : (a) avant de mouillage; (b) après le mouillage (photographies prises à l'Université de Bourdj Bou Arreridj, Laboratoire de Génie Civil, échelle en cm)



a) avant



b) après

## e. Valeur au bleu de méthylène VBS (NF P 94-068)

La valeur du bleu de méthylène est un paramètre d'identification permettant de mesurer la surface spécifique des particules solides contenues dans les sols fins et de déterminer l'activité de leur fraction argileuse.

$V_{bs} = \frac{v_{bm}}{m_0} + \frac{230}{30} = 7.67 \text{ ml/g (ou cm}^3/\text{g)}$ , Ou:  $V_{BM}$  est la quantité de bleu méthylé absorbé par les neutres (ml) par rapport à la masse de sols secs de l'échantillon d'essai (g),

En transposant ces valeurs dans ce diagramme et selon la nomenclature 11 300), le sol testé apparaît comme une classe A3 (sol argileux) très plastique.



**Figure III.8: photo de largeur millimétrique des injections des taches de l'échantillon**

Les surfaces spécifiques des particules d'argile peuvent être calculées à partir des mesures du bleu selon l'équation suivante (Santamarina et al., 2002).

$$S_s = \frac{1}{319.87} \frac{10 * (V_{TOTAL})}{1000} A_V A_{MB} \frac{1}{m_s}$$

avec :

Ss : surface spécifique (m<sup>2</sup>/g)

V<sub>total</sub> : volume total (ml) de la solution de bleu (10g/l) ajouté pour saturé le sol,

m<sub>s</sub>: masse sèche de l'échantillon du sol (grammes),

A<sub>v</sub>: nombre d'Avogadro (6.02 \* 10<sup>23</sup> /mol),

A<sub>MB</sub> : surface couverte par une molécule de bleu, égale à 130 A° ou 130 \* 10<sup>-20</sup> m<sup>2</sup>.

Le coefficient de 319,87 est la valeur de la masse moléculaire (g/mol) du bleu de méthylène, C<sub>16</sub>H<sub>18</sub>CIN<sub>3</sub>S. D'après ces calculs, notre sol a une surface spécifique

$$Ss = 187.574m^2/g$$

**Tableau III.3- Propriete des argiles minérales(données compilées à partir de Mitchell 1993, Santamarina et al.,2002 et magnan et al.,1989)**

	Montmorillonite	Illite	Kaolinite
Ss	400-800	80-100	10-20
W <sub>L</sub> (%)	100-950	60-120	30-110
W <sub>p</sub> (%)	50-100	35-60	25-40
V <sub>B</sub>	>30	2-4	<1
Activity	0.9-7.0	0.5-1.0	0.3-0.5

Comme la surface spécifique des kaolinites est très faible (10 - 20 m<sup>2</sup>/g) et que la valeur trouvée dépasse celle de l'illite, la valeur de la surface spécifique obtenue confirme la présence importante de smectite, peut-être de l'ordre de 30 - 40 % de la fraction argileuse [41].

**f. L'activité de bleu de la fraction argileuse**

L'activité argileuse A<sub>cest</sub> est le rapport entre la valeur du bleu de méthylène V<sub>BS</sub> déterminée selon la norme NF P 94-068 et la teneur C<sub>2</sub> en particules de dimensions inférieures à 2 μm estimer selon la norme NF P 94-057.

**Table III.4-L'activité des argiles selon la norme NF P 94-068**

Activité de la fraction argileuse du sol	Qualificatif
$0 \leq A_{CB} \leq 3$	inactive
$3 \leq A_{CB} \leq 5$	peu active
$5 \leq A_{CB} \leq 13$	moyenne
$13 \leq A_{CB} \leq 18$	active
$18 < A_{CB}$	très active

En transposant ces valeurs dans ce tableau III.3, le sol testé s'avère être un sol actif.

**g. Analyse chimique**

Elle a pour but de détecter d'éventuels éléments agressifs (sulfates, chlorures, etc.) dans les semelles et de prendre les précautions nécessaires, le cas échéant, mais aucune donnée n'est disponible pour le site étudié.

**IDENTIFICATION DES PARAMÈTRES DE GONFLEMENT**

Les paramètres d'identification des sols gonflants sont nombreux et dépendent principalement de leur minéralogie. Cependant, l'analyse minéralogique seule ne renseigne pas sur les paramètres quantitatifs caractérisant le phénomène de gonflement. En revanche, il est possible de définir dès la phase de reconnaissance préliminaire un certain nombre de paramètres géotechniques simples qui sont en relation avec le caractère expansif des sols. Ainsi, Le caractère expansif d'un sol peut être déterminé par sa granulométrie, ses limites d'Atterberg et son activité. Ces méthodes indirectes, qui relient le gonflement aux paramètres géotechniques, permettent d'identifier les sols gonflants ; alors que les méthodes directes incluant des essais de gonflement en caractérisant plus précisément le comportement du gonflement.

**Identification qualitative (ou méthodes indirectes estimatives)**

L'identification des sols gonflants peut être réalisée à l'échelle microscopique (les assemblages structuraux de ces matériaux sont très particuliers. (Ces méthodes indirectes, qui relient le gonflement des sols à leurs paramètres géotechniques, sont décrites ci-dessous :

1)- limites d'Atterberg et L'activité de Skempton

Macroscopiquement, le phénomène de gonflement est lié à la notion d'indice de plasticité  $I_p$ , plus le sol possède des minéraux actifs dans leur intercalation avec l'eau, plus il sera nécessaire d'ajouter de l'eau pour le rendre liquide. Ceci rejoint la définition de l'activité de Skempton  $A_c$  (définie par le rapport entre l'indice de plasticité et le pourcentage d'éléments inférieurs à  $2\mu\text{m}$ ):  $A_c = I_p / C_2$  ( $C_2$  teneur en particules de dimension inférieure à  $2\mu\text{m}$ ).

$$A_c = \frac{\text{Indice de plasticité } (I_p)}{\% \text{ éléments inférieurs à } 2\mu\text{m}}$$

Dans notre cas les argilites ont une valeur d' $I_p = 35.58\%$  et  $C_2 = 56\%$

$$A_c = \frac{35.58\%}{56\%} = 0.635$$

Le sol en place est représenté essentiellement par des argiles qui sont caractérisées par :

- pour le premier site : un indice de plasticité moyen de 34% et un pourcentage des éléments inférieurs à  $2\mu\text{m}$  de l'ordre de 85% ce qui donne une activité  $A_c$  de l'ordre de 0,4. L'estimation du taux de gonflement sur la teneur en argile est à l'activité corrigée du matériau  $A_{co} = I_p / C_2 = 0,45$ .
- pour le second site : un indice de plasticité de 35,58% et un pourcentage d'éléments inférieurs à  $2\mu\text{m}$  de l'ordre de 56% ce qui donne une activité  $A_c$  de l'ordre de 0,635. L'estimation du taux de gonflement sur la teneur en argile est à l'activité corrigée du matériau  $A_{Corr} = I_p / C_2 = 0,77$ .

Le taux de gonflement sur le diagramme de (Seed et al) ci-dessous est classé comme "élevé" ou  $5 < G < 25\%$ , pour les deux sites.

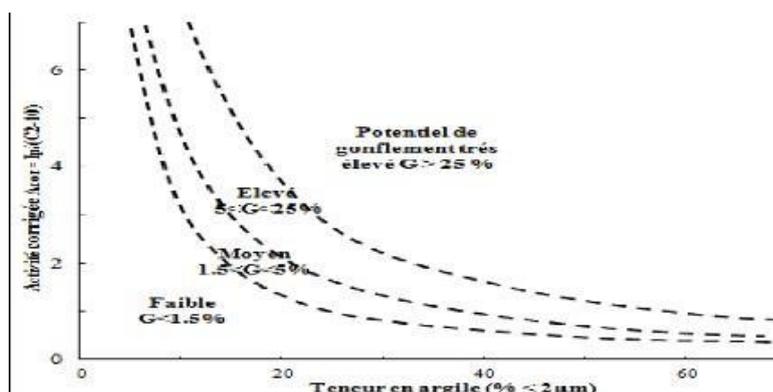


Figure III.10: Daigramme de classification du potentiel de gonflement (seed et al,1962)

2)- Limite de liquidité :

Dakshanamurthy et Raman (1973), cités par , ont également utilisé le diagramme de plasticité proposé par Casagrande pour fournir une classification du niveau de gonflement, le diagramme, qui comprend la ligne de séparation Ade des sols gonflants, est divisé en 6 zones le long de l'axe x comme indiqué dans le tableau (III.4) ci-dessous qui montre que:

-Le premier site : qui a les caractéristiques de WL-65%et un pourcentage de passants de 2µm-85% a un potentiel de gonflement élevé.

-Le deuxième site : qui présente les caractéristiques de WL-59,34% et un pourcentage de passeurs de 2 µm =56% ont un potentiel de gonflement élevé.

Table III.5- Classification du niveau de gonflement

Limite de liquidité	Classification de gonflement
0-20	Non-gonflement
20-35	Faible
35-50	Moyenne
50-70	Élevé
70-90	TresElevé
>90	Critique

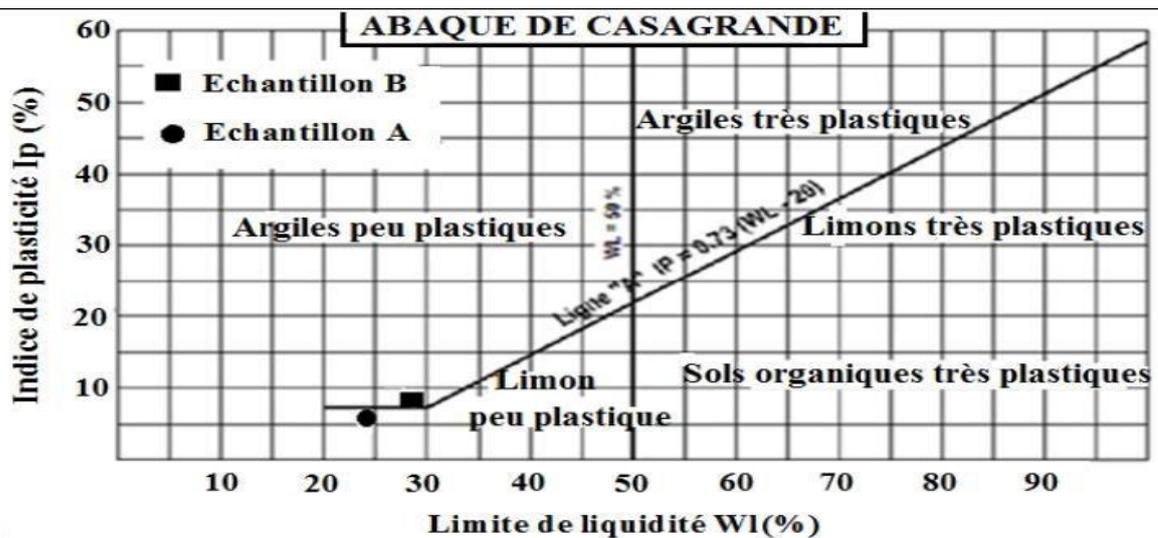


Figure III.11 : Abaque de Casagrande

D'après la carte de Casagrande, les deux zones testées sont des argiles très plastiques. Situées dans la zone de gonflement des sols.

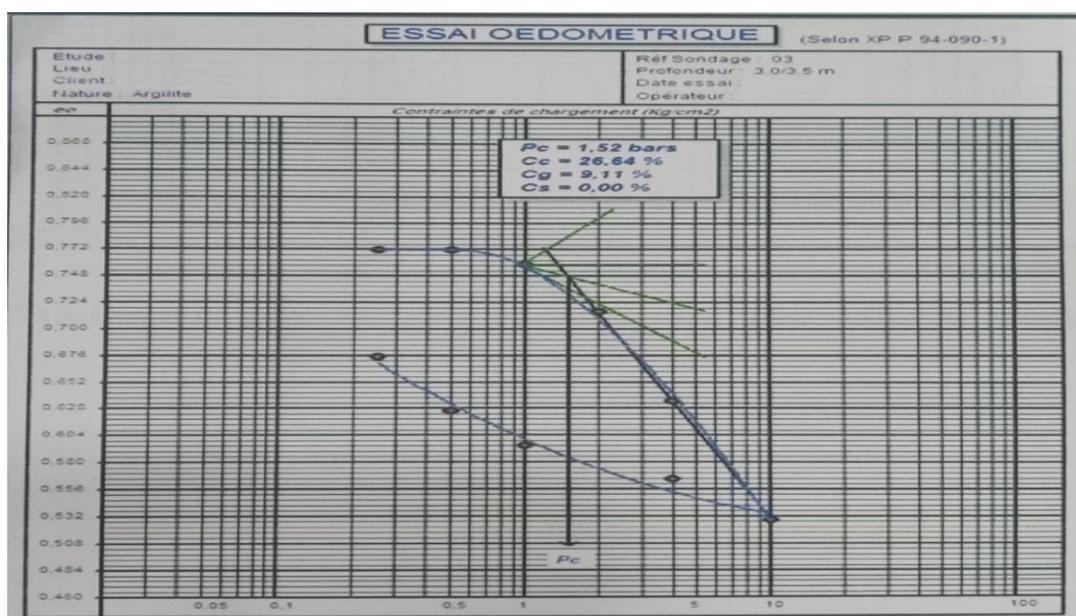
#### Méthodes quantitatives (ou méthodes directes) :

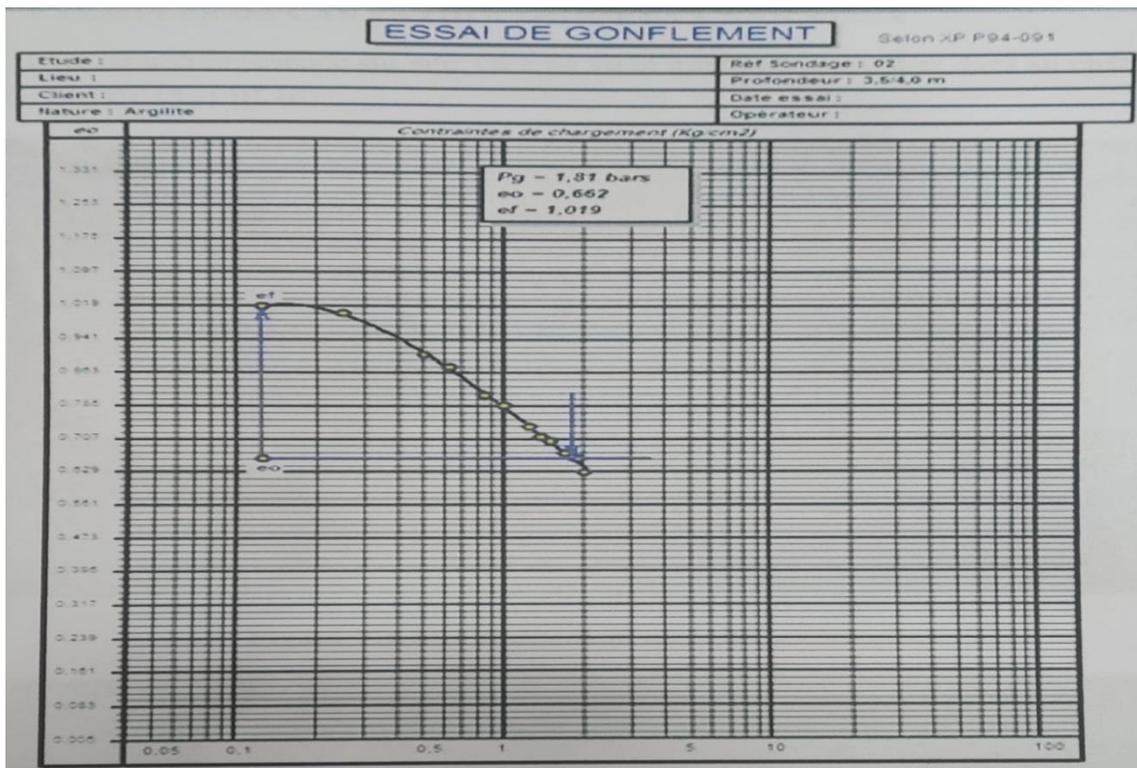
Cette étude est un travail réalisé par le (LMSG,B), basé sur l'essai de gonflement libre, ce dernier est directement dérivé des procédures traditionnelles de l'essai oedométrique, l'éprouvette est soumise à l'imbibition sous le poids du piston, une fois le phénomène de gonflement stabilisé, le chargement approprié jusqu'à la stabilisation des déformations sous chaque étape. La pression de gonflement correspond à la charge qu'il faut appliquer pour ramener l'éprouvette à sa hauteur initiale..

D'après les résultats des essais de gonflement libre effectués sur l'argile marneuse, nous pouvons faire la synthèse suivante:

- Les tassements ne commencent à apparaître qu'après un certain nombre d'incrément de charge dépassant le poids du sol, pendant lesquels le sol continue à gonfler et à identifier la pression qui doit être appliquée au sol pour l'empêcher de gonfler [42];
- la courbe de déchargement-rechargement est caractérisée par une très forte pente à laquelle correspondent des valeurs élevées de l'indice de gonflement ( $C_s=0,09$ ), mettant ainsi en évidence le caractère expansif du sol ; avec une pression  $P_g$  d'environ 1,8 bar.

Figure III.12 : Essais œdométriques sur sol de sidi aissa"profondeur de sondage 3 M "





**III.8. CONCLUSION**

Selon l'étude géologique et stratigraphique, les sols argileux de la région de Sidi Aissa, situés en zone semi-aride sont soumis au phénomène de retrait-gonflement dont l'effet a été de grande ampleur sur le bâti provoquant des désordres de catastrophe naturelle. Dans ce chapitre il a été montré qu'à partir d'essais simples réalisés pratiquement dans toutes les campagnes de reconnaissance préliminaire, il est possible d'identifier qualitativement les sols expansifs et d'obtenir à partir de corrélations, des estimations approximatives de la pression et de l'amplitude du gonflement.

# **CHAPITRE IV**

## **Stabilisation des sols gonflants**

**1. INTRODUCTION**

Après la présentation de l'essai de gonflement libre et la procédure de cette essai (matériaux étudiés, matériels utilisés avec le mode opératoire). Nous abordons dans ce chapitre les résultats des essais principaux, et on présente les courbes d'essai Proctor, les limites d'Atterberg et la pression de gonflement de tous les échantillon traiter au ciment a 2, 4 et 6% .

**1.1.ESSAI PROCTOR**

Pour l'essai Proctor on va traiter le sol au ciment avec les pourcentages suivant : 2% - 4% - 6%. On refait ca trois fois pour trouver le nouveau optimum Proctor Après en fait l'autre essai seulement avec l'optimum Proctor

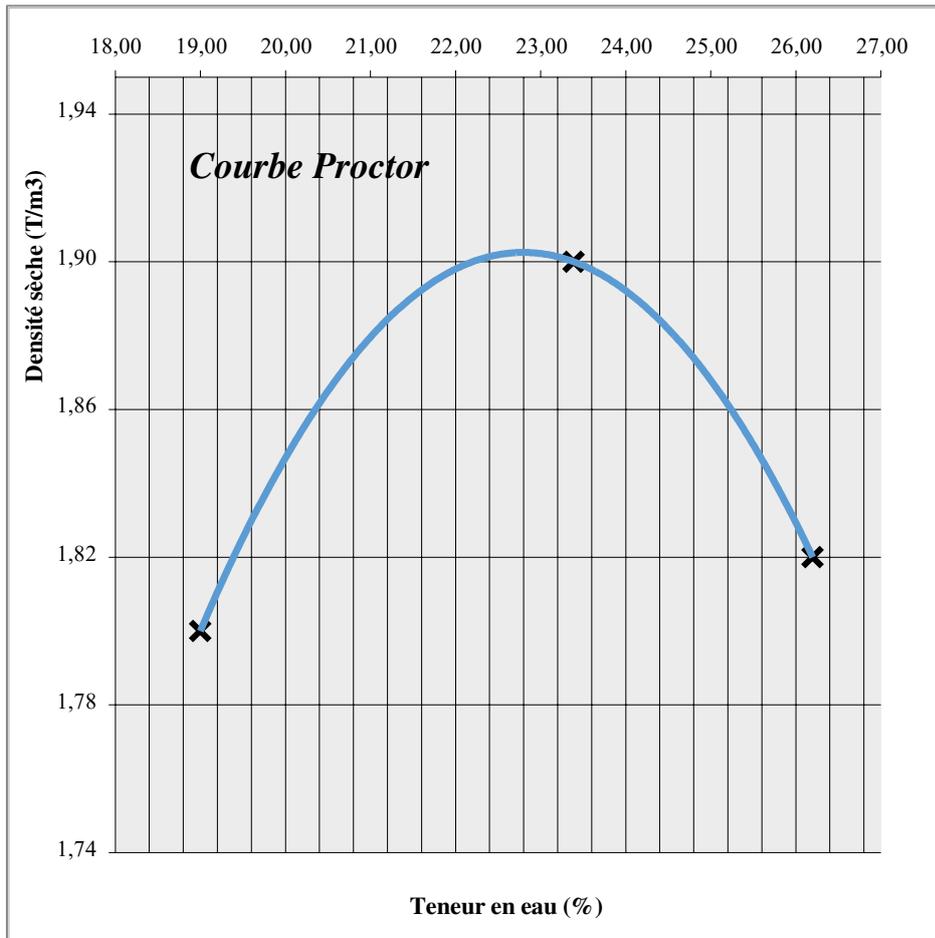
TABLEAUX IV.1 : Masse volumique sèche mélange 2 %

<b>masse volumique sèche</b>			
	point 1	point 2	point 3
eau ajoutée	22%	24%	26%
masse totale humide	<b>4620</b>	<b>4740</b>	<b>4640</b>
masse du moule vide	<b>2920</b>	<b>2920</b>	<b>2920</b>
masse du sol humide	1700	1820	1720
masse volumique humide	1,8	1,932	1,826
volume du moule	<b>942</b>	<b>942</b>	<b>942</b>
masse volumique sèche	1,513	1,566	1,447

TABLEAUX IV.2 : Teneur en Eau du mélange 2 %

<b>teneurs en eau</b>						
TARE	M	H	Z	G	N	X
masse totale humide	410,02	432,1	380,64	383,1	440,66	435,75
masse totale sèche	391,12	409,3	359,3	362,42	409,75	401,5
tare	290,05	291,2	271,72	270,13	280,5	281,25
masse de l'eau	18,9	22,8	21,34	20,68	30,91	34,25
masse du sol sec	101,07	118,1	87,58	92,29	129,25	120,25
teneur en eau	18,70	19,31	24,37	22,41	23,91	28,48
Moyenne	19,00		23,39		26,20	

<p><u>Matériau</u> : ARGILE+CEMENT 2%</p> <p><u>Provenance</u> : SIDI AISSA</p> <p>-</p> <p>-</p>		
<p>Masse volumique sèche <math>\gamma_{d\ OPM}</math> (T/m<sup>3</sup>)</p>	<p><b>1,90</b></p>	<p>Teneur en eau optimale <math>W_{OPM}(\%)</math> :</p> <p style="text-align: right;"><b>23,4</b></p>



<i>Tableau des résultats des mesures</i>			
W%	19,00	23,39	26,20
$\gamma_d$ (T/m <sup>3</sup> )	1,8000	1,9000	1,8200

**FIGURE IV.1** : courbe Proctor du mélange avec ciment 2 %

**TABLEAUX IV.3 : Masse volumique sèche mélange 4 %**

<b>masse volumique sèche</b>			
	point 1	point 2	point 3
eau ajoutée	24%	26%	28%
masse totale humide	<b>4720</b>	<b>4840</b>	<b>4740</b>
masse du moule vide	<b>2920</b>	<b>2920</b>	<b>2920</b>
masse du sol humide	1800	1920	1820
masse volumique humide	1,9	2,038	1,932
volume du moule	<b>942</b>	<b>942</b>	<b>942</b>
masse volumique sèche	1,572	1,622	1,510

**TABLEAUX IV.4 : Teneur en eau mélange 4 %**

<b>teneurs en eau</b>						
TARE	M	H	Z	G	N	X
masse totale humide	383,5	380,1	446,1	425,75	389,71	401,08
masse totale sèche	361,5	360,4	410,75	396,5	366,21	377,27
tare	270,3	269,1	280,5	275,3	280,51	293,7
masse de l'eau	22	19,7	35,35	29,25	23,5	23,81
masse du sol sec	91,2	91,3	130,25	121,2	85,7	83,57
teneur en eau	24,12	21,58	27,14	24,13	27,42	28,49
Moyenne	22,85		25,64		27,96	

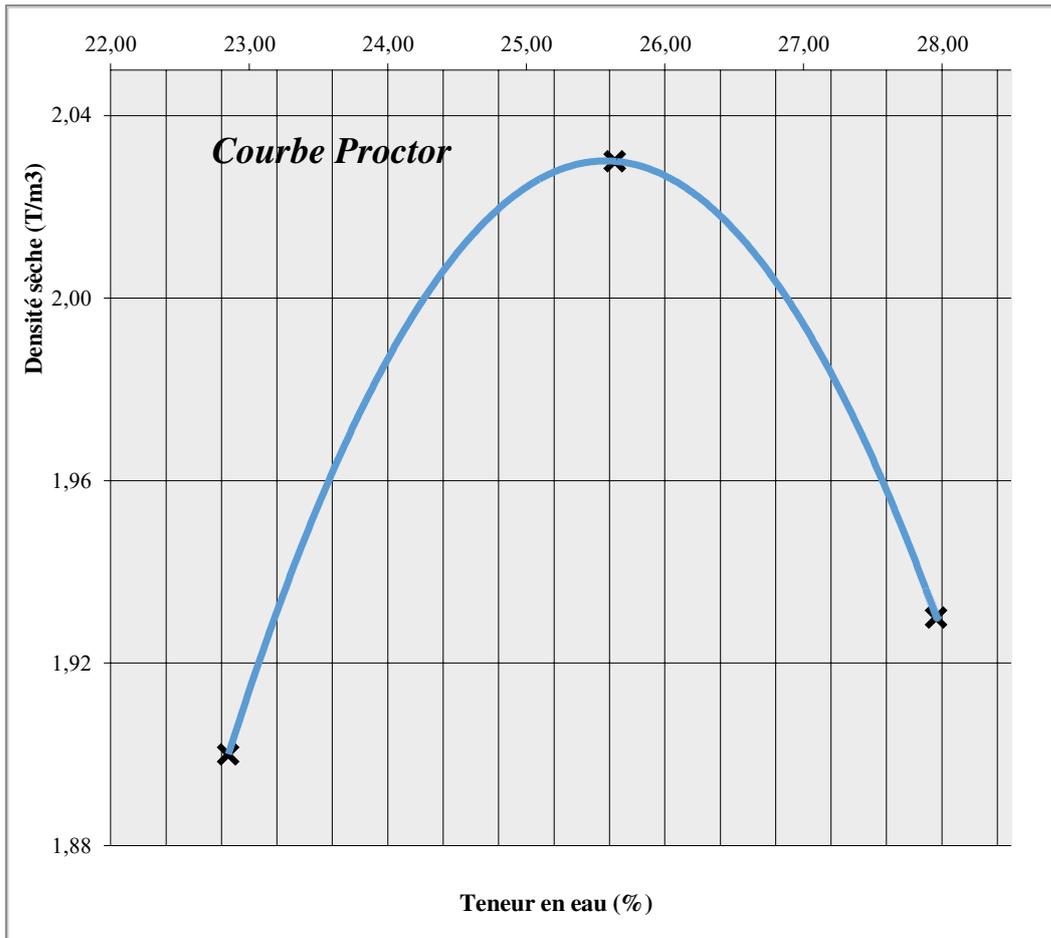
**PROCES VERBAL D'ESSAI      Essai Proctor NF P 94-093**

Matériau : ARGILE+CEMENT 4%

Provenance : SIDI AISSA

-

Masse volumique sèche $\gamma_{d\text{OPM}}$ (T/m <sup>3</sup> ) :	<b>2,03</b>	Teneur en eau optimale $W_{\text{OPM}}(\%)$	<b>25,6</b>
--	-------------	---	-------------



<i>Tableau des résultats des mesures</i>			
W%	22,85	25,64	27,96
$\gamma_d$ (T/m <sup>3</sup> )	1,9000	2,0300	1,9300

**TABLEAUX IV.5** : Masse volumique sèche mélange 6 %

masse du moule vide	<b>2920</b>	<b>2920</b>	<b>2920</b>
masse du sol humide	1880	2000	1860
masse volumique humide	2,0	2,123	1,975
volume du moule	<b>942</b>	<b>942</b>	<b>942</b>
masse volumique sèche	1,562	1,690	1,543

**TABLEAUX IV.6 : Teneur en eau mélange 6 %**

<b>teneurs en eau</b>						
	tares N°					
	M	H	Z	G	N	X
masse totale humide	441,1	435,12	436,7	433,1	398,39	393,59
masse totale sèche	410,65	401,65	404,8	400,12	372,3	367,3
tare	281,02	280,95	286,3	283,9	283,4	279,5
masse de l'eau	30,45	33,47	31,9	32,98	26,09	26,29
masse du sol sec	129,63	120,7	118,5	116,22	88,9	87,8
teneur en eau	23,49	27,73	26,92	28,38	29,35	29,94
Moyenne	25,61		25,64		27,96	

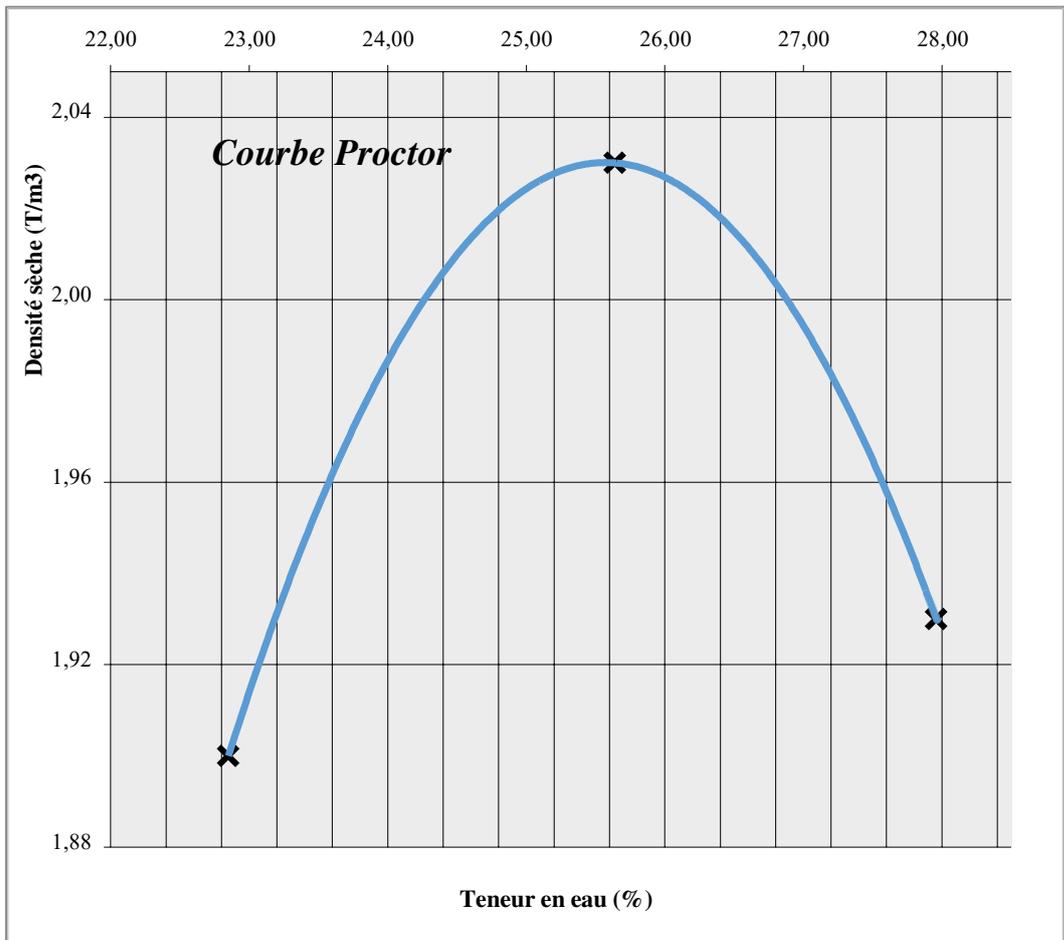
**PROCES VERBAL D'ESSAI      Essai Proctor NF P 94-093**

**masse volumique sèche**

Matériau : ARGILE+CEMENT 4%

Provenance : SIDI AISSA

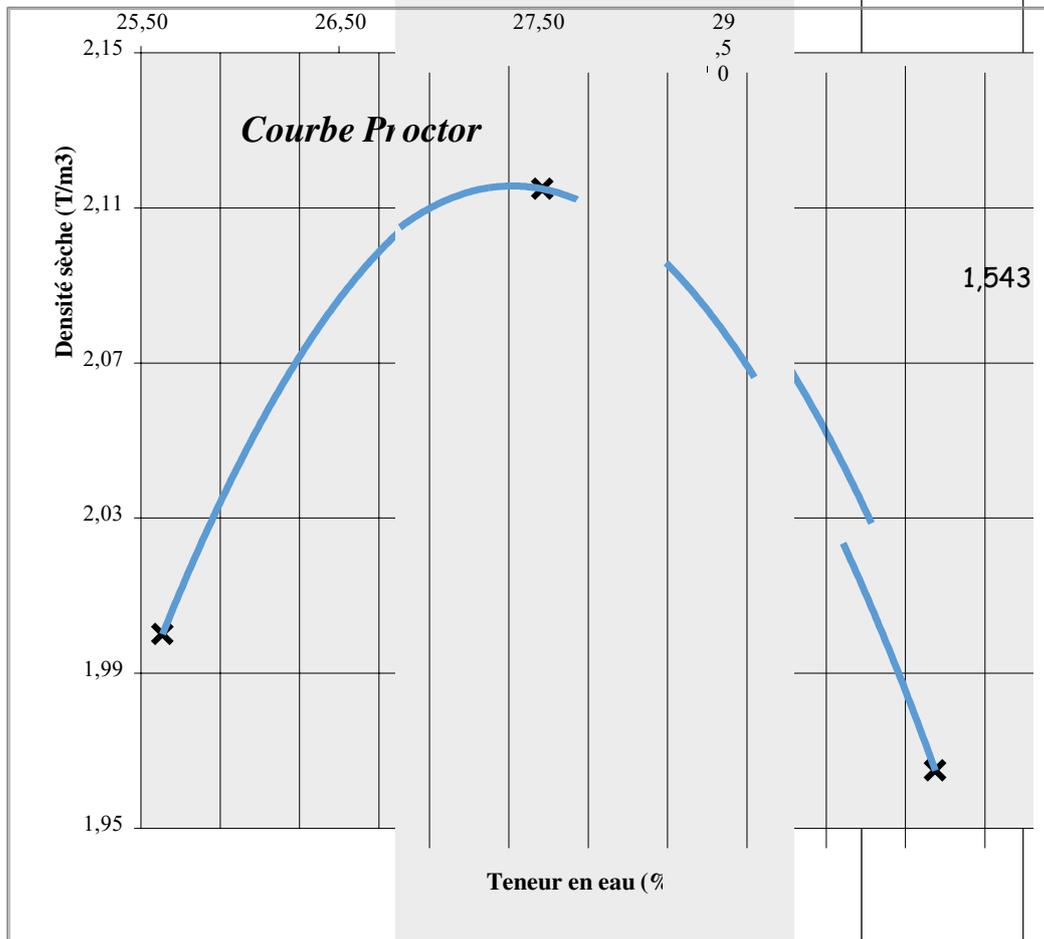
Masse volumique sèche $\gamma_{d\ OPM}$ (T/m <sup>3</sup> ) :	<b>2,03</b>	Teneur en eau optimale $W_{OPM}(\%)$	<b>25,6</b>
---	-------------	--------------------------------------	-------------



<i>Tableau des résultats des mesures</i>			
W%	22,85	25,64	27,96
$\gamma_d$ (T/m <sup>3</sup> )	1,9000	2,0300	1,9300

**TABLEAUX IV.5** : Masse volumique sèche mélange 6 %

	point 1	point 2	point 3
eau ajoutée	26%	28%	30%
masse totale humide	4800	4920	4780
masse du moule vide	2920	2920	2920
masse du sol humide	1880	2000	1860
masse volumique humide	2,0	2,123	1,975
volume du moule	942	942	942
<b>PROCES VERBAL D'ESSAI Essai</b> <b>Proctor NF P 94-093</b>			
<u>Matériau</u> : ARGILE+CEMENT 6%			
<u>Provenance</u> : SIDI AISSA			
-			
Masse volumique sèche $\gamma_d$ OPM (T/m <sup>3</sup> ) :	<b>2,12</b>	Teneur en eau optimale <b>W<sub>OPM</sub>(%)</b>	<b>27,7</b>



<i>Tableau des résultats des mesures</i>							
W%	25,6 1	27,6 7	29,65				
$\gamma_d$ (T/m <sup>3</sup> )	2,00 00	2,12 00	1,9700				
masse volumique sèche							

**TABLEAUX IV.6 :** Teneur en eau mélange 6 %

<b>teneurs en eau</b>						
	tares N°					
	M	H	Z	G	N	X
masse totale humide	441,1	435,12	436,7	433,1	398,39	393,59
masse totale sèche	410,65	401,65	404,8	400,12	372,3	367,3
tare	281,02	280,95	286,3	283,9	283,4	279,5
masse de l'eau	30,45	33,47	31,9	32,98	26,09	26,29
masse du sol sec	129,63	120,7	118,5	116,22	88,9	87,8
teneur en eau	23,49	27,73	26,92	28,38	29,35	29,94
Moyenne	25,61		25,64		27,96	

**FIGURE IV.3 :** Courbe Proctor mélange avec ciment 6 %

**IV.2 : ESSAI CBR**

Les modalités d'exécution du poinçonnement diffèrent selon que l'on détermine l'indice CBR immédiat ou l'indice CBR immersion. L'objet de l'essai est la détermination de l'indice CBR immédiat, est d'interposer deux surcharges dans le volume libéré par le disque d'espacement. s'il prévu que la contrainte apportée par la chaussée sur le sol soit supérieure aux 4,6 kg des surcharges ainsi constituées, il y a lieu d'ajouter autant de surcharges que nécessaire. L'ensemble moule plaque de base et surcharges est alors posé sur la presse. Exécuter ensuite le poinçonnement comme indiqué précédemment.

L'objet de l'essai est la détermination de l'indice CBR immersion est de :

- positionner le disque de gonflement sur l'éprouvette avant de mettre en place les surcharges comme indiqué précédemment.
- mettre en place et initialiser le dispositif de mesure de gonflement.
- immerger l'ensemble de sorte que l'éprouvette soit recouverte par une hauteur d'eau d'au moins 20 mm et qu'une lame d'eau d'au moins 10 mm de hauteur soit présente totale atteinte.

Après quatre jours d'immersion ( $\pm 2h$ ), relever la valeur de gonflement total atteint.

Retirer le moule et l'éprouvette du bac à immersion et après égouttage, exécuter le poinçonnement comme indiqué précédemment

**TABLEAU IV.7 :** Essai CBR avec l'optimum 2% 4% 6 %

<i>RAPPORT D'ESSAI</i>	<i>ESSAI C B R</i>
Indice CBR Immédiat	Norme: NF P94-078

Projet:	ESSAI CBR
---------	-----------

Essai N°		1	2	3
Energie de compactage		OPM 56 c/c	OPM 56 c/c	OPM 56 c/c
Teneur en eau ajoutée		W=19%	W=23%	W=26%
Masse volumique sèche de l'éprouvette	T/m <sup>3</sup>	1,791	1,613	1,631
	% OPM	94	85	86
Teneur en eau de confection (%)		19,0	22,9	25,6

Effort de poinçonnement à 2.5 mm (KN)	0,02	0,29	0,31
I. CBR 2,5	0,18	2,16	2,30
Effort de poinçonnement à 5 mm (KN)	0,03	0,32	0,37
I. CBR 5	0,15	1,58	1,85

<b>I. CBR Immédiat</b>	<b>0,18</b>	<b>2,16</b>	<b>2,30</b>
------------------------	-------------	-------------	-------------

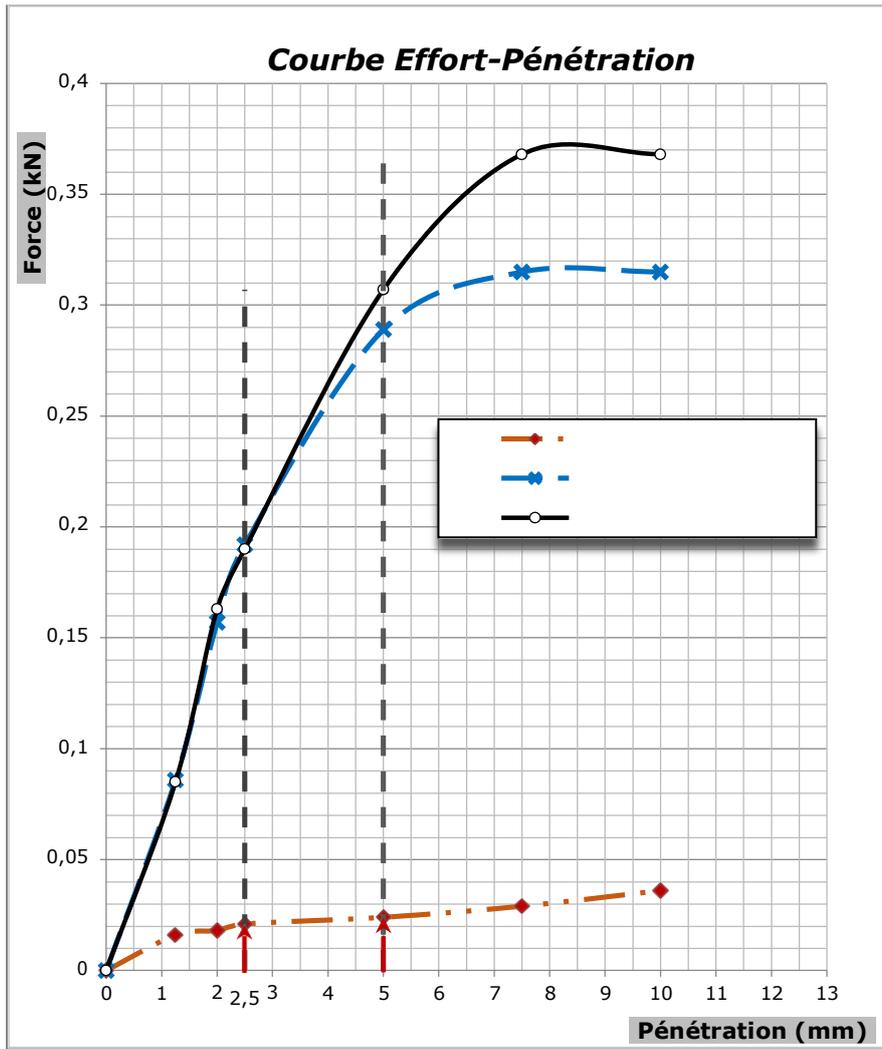


FIGURE IV.4 : COURBE CBR

**: ESSAI DE LIMITE D'ATERBERG**

Après traitement au ciment nous avons les résultats suivant :

**a- SOLS+CIMENT 2%****TABLEAUX IV.8 : Limite de plasticité**

	<b>1 ère essai</b>	<b>2 eme essai</b>	<b>3 eme essai</b>	<b>4 eme essai</b>
<b>Nm de la tare</b>	<b>T11</b>	<b>T4</b>	<b>B31</b>	<b>B25</b>
<b>Masse de l'ensemble</b>	<b>5.65</b>	<b>5.77</b>	<b>7.56</b>	<b>7.44</b>
<b>Tare ml</b>	<b>5.50</b>	<b>5.60</b>	<b>7.27</b>	<b>7.15</b>
<b>Masse l'échantillon humide</b>	<b>5.05</b>	<b>5.17</b>	<b>6.95</b>	<b>6.70</b>

**TABLEAUX IV.9 : Limite de liquidité**

	<b>1<sup>er</sup> essai</b>		<b>2eme essai</b>		<b>3eme essai</b>	
	<b>15</b>		<b>25</b>		<b>35</b>	
<b>N de la tare</b>	<b>C5</b>	<b>C14</b>	<b>A9</b>	<b>C4</b>	<b>A2</b>	<b>B2</b>
<b>Poids total humide</b>	<b>26.27</b>	<b>25.86</b>	<b>24.19</b>	<b>24.14</b>	<b>14.08</b>	<b>12.48</b>
<b>Poids total sec</b>	<b>23.24</b>	<b>22.76</b>	<b>21.85</b>	<b>21.87</b>	<b>11.66</b>	<b>10.67</b>
<b>Poids de la tare</b>	<b>17.84</b>	<b>17.55</b>	<b>17.71</b>	<b>17.83</b>	<b>7.35</b>	<b>7.36</b>
<b>Poids de l'eau</b>	<b>3.03</b>	<b>3.11</b>	<b>2.34</b>	<b>2.27</b>	<b>2.42</b>	<b>1.81</b>
<b>Poids du sol sec</b>	<b>5.4</b>	<b>5.20</b>	<b>4.14</b>	<b>4.04</b>	<b>4.31</b>	<b>3.31</b>

<b>Teneur en eau %</b>	<b>56.11</b>	<b>59.80</b>	<b>56.52</b>	<b>56.18</b>	<b>56.14</b>	<b>54.68</b>
<b>moyenne</b>	<b>57.95</b>	<b>57.95</b>	<b>56.35</b>	<b>56.18</b>	<b>55.41</b>	<b>54.68</b>

b-

**SOLS+CIMENT 4%**

**TABLEAUX IV.10 : Limite de plasticité**

	<b>1 ère essai</b>	<b>2 eme essai</b>	<b>3 eme essai</b>	<b>4 eme essai</b>
<b>Nm de la tare</b>	<b>T11</b>	<b>T4</b>	<b>B31</b>	<b>B25</b>
<b>Masse de l'ensemble</b>	<b>5.67</b>	<b>5.81</b>	<b>7.59</b>	<b>7.47</b>
<b>Tare m1</b>	<b>5.54</b>	<b>5.62</b>	<b>7.31</b>	<b>7.21</b>
<b>Masse l'échantillon humide</b>	<b>5.11</b>	<b>5.19</b>	<b>7.05</b>	<b>7.01</b>

**TABLEAUX IV.11 : Limite de liquidité**

	<b>1<sup>er</sup> essai</b>		<b>2eme essai</b>		<b>3eme essai</b>	
	<b>15</b>	<b>25</b>	<b>25</b>	<b>35</b>	<b>35</b>	<b>35</b>
<b>N de la tare</b>	<b>C5</b>	<b>C14</b>	<b>A9</b>	<b>C4</b>	<b>A2</b>	<b>B2</b>
<b>Poids total humide</b>	<b>14.15</b>	<b>12.55</b>	<b>26.34</b>	<b>25.94</b>	<b>24.23</b>	<b>24.32</b>
<b>Poids total sec</b>	<b>11.85</b>	<b>10.88</b>	<b>23.29</b>	<b>22.89</b>	<b>22.01</b>	<b>22.05</b>
<b>Poids de la tare</b>	<b>7.83</b>	<b>7.84</b>	<b>17.95</b>	<b>17.84</b>	<b>17.93</b>	<b>17.84</b>
<b>Poids de l'eau</b>	<b>2.30</b>	<b>1.67</b>	<b>3.05</b>	<b>3.05</b>	<b>2.22</b>	<b>2.27</b>
<b>Poids du</b>	<b>4.02</b>	<b>3.04</b>	<b>5.34</b>	<b>5.05</b>	<b>4.08</b>	<b>4.21</b>

sol sec						
Teneur en eau %	57.21	54.93	57.11	60.39	54.41	53.91
moyenne	65.07	65.07	58.11	58.75	54.16	54.16

**c- SOLS+CIMENT 6 %**

**TABLEAUX IV.12 : Limite de plasticité**

	1 ère essai	2 eme essai	3 eme essai	4 eme essai
Nm de la tare	T11	T4	B31	B25
Masse de l'ensemble	5.72	5.81	7.63	7.52
Tare m1	5.60	5.66	7.33	7.24
Masse l'échantillon humide	5.12	5.21	7.11	7.09

**TABLEAUX IV.13 : Limite de liquidité**

	1 <sup>er</sup> essai		2eme essai		3eme essai	
	15		25		35	
N de la tare	C5	C14	A9	C4	A2	B2
Poids total humide	24.63	24.72	26.92	26.02	14.28	12.79
Poids total sec	22.04	22.10	23.59	22.96	12.01	11.02
Poids de la tare	18.12	18.22	18.03	18.08	7.95	7.99
Poids de l'eau	2.59	2.62	3.33	3.06	2.27	1.77

<b>Poids du sol sec</b>	<b>3.92</b>	<b>3.88</b>	<b>5.56</b>	<b>4.88</b>	<b>4.06</b>	<b>3.03</b>
<b>Teneur en eau %</b>	<b>66.07</b>	<b>67.52</b>	<b>63.30</b>	<b>62.70</b>	<b>55.91</b>	<b>58.41</b>
<b>moyenne</b>	<b>66.79</b>	<b>66.79</b>	<b>63.00</b>	<b>63.00</b>	<b>57.16</b>	<b>57.16</b>

**Gonflement libre à l'œdomètre (XP P 94-091)**

L'essai est effectué sur plusieurs éprouvettes d'un même échantillon et prises à peu près au même niveau. Chaque échantillon de sol est placé dans un enceinte cylindrique rigide et un dispositif applique une force axiale sur cette éprouvette verticale maintenue constante. L'essai consiste à appliquer une contrainte verticale différente à chaque éprouvette et mesurer sa variation de hauteur lorsqu'il est placé en présence d'eau

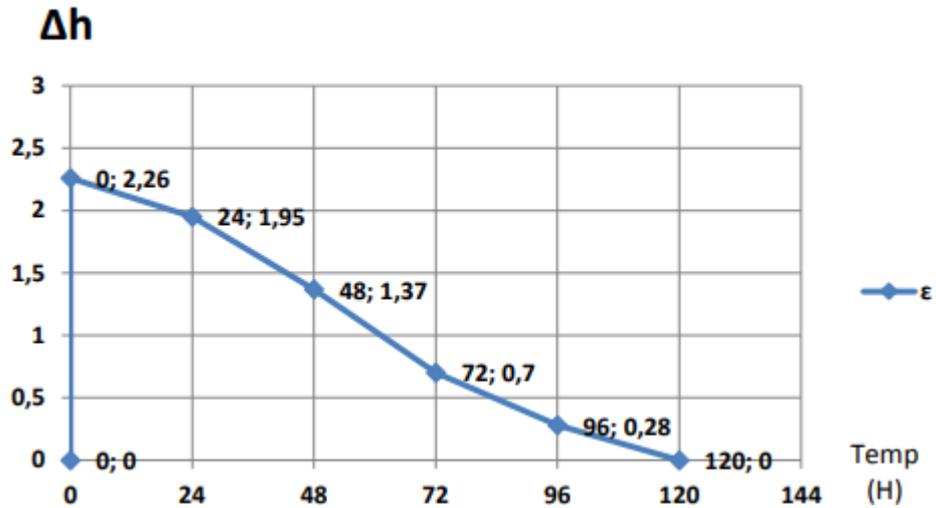


**Figure IV.4:** Composants de la cellule œdométrique

**Tableau 14:** Résultat de gonflement libre à l'œdomètre.

PARAMETRE	Pg kPa	$\epsilon_g$ (%)
VALEUR	200	11.75

Figure IV 5: Evolution du taux de gonflement sous chargement en fonction du temps.



Pour la préparation des échantillons, les mêmes procédures effectuées pour mesurer la pression précédemment (sans traitement) sont considérés pour mesurer la pression de argiles traitées au ciment, gardant les mêmes caractéristiques (hauteur, diamètre et teneur en eau), sauf que, cette fois, le ciment est ajouté aux argiles et bien mélanger les deux avant de les mettre dans la cellule.

#### IV. 6: RESULTATS ET DISCUSSIONS

La stabilisation a été effectuée avec 3 dosages différents. On a commencé avec 2% de ciment, 4% pour le 2EME et 6% pour le 3EME essai.

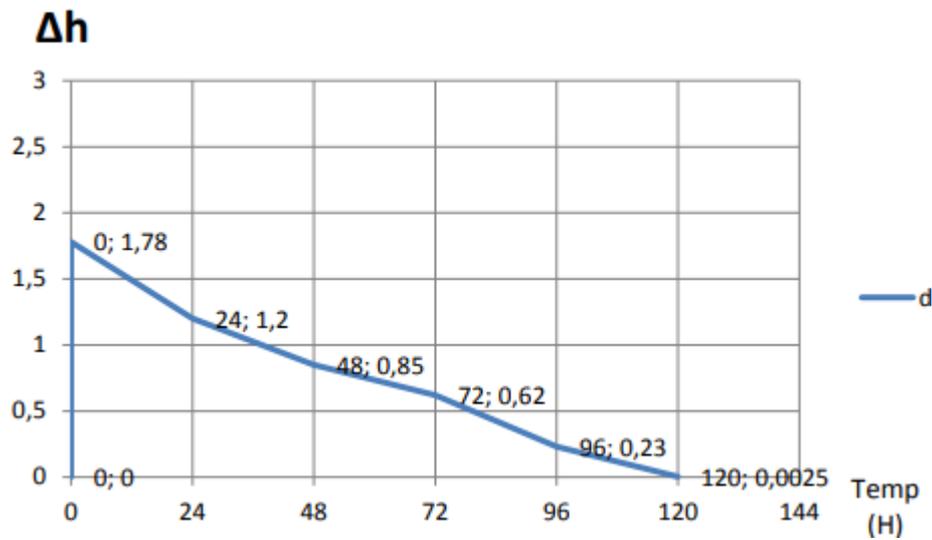
##### a. Stabilisation avec 2 % de ciment

**Tableau 15:** Résultat de stabilisation de gonflement avec 2 % de ciment

PARAMETRE	Pg(kPa)	$\epsilon_g(\%)$
VALEUR	<b>260</b>	<b>8.42</b>

Le taux de gonflement 3.4%

**Figure IV.6:** Evolution du taux de gonflement après ajout de 2 % de ciment



**b. Stabilisation avec 4% de ciment**

**Tableau 16:** résultat de stabilisation de gonflement avec 4 % de ciment

PARAMETRE	Pg(kPa)	$\epsilon_g(\%)$
VALEUR	<b>450</b>	<b>7.36</b>

Le taux de gonflement 4.47 %

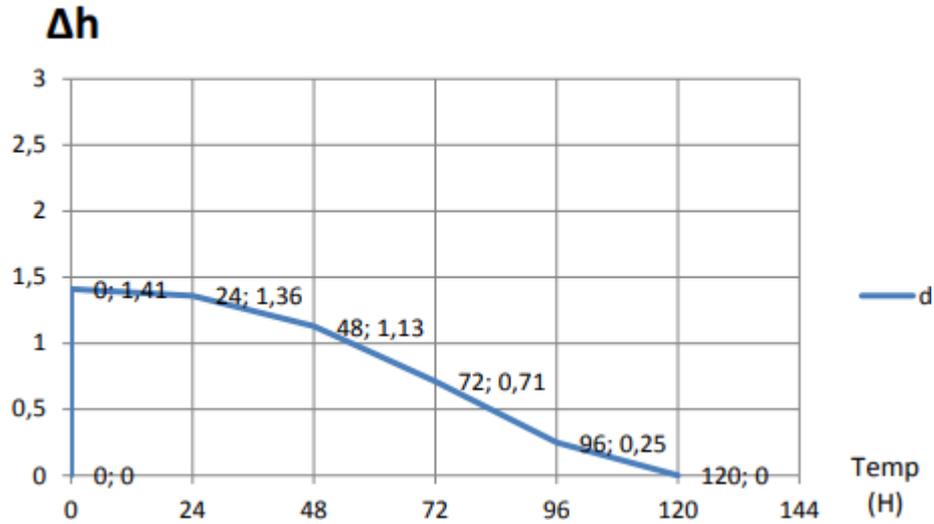


Figure IV.7: Evolution du taux de gonflement après ajout de 4 % de ciment

c. Stabilisation avec 6 % de ciment

Tableau 17: Résultat de stabilisation de gonflement avec 6 % de ciment

PARAMETRE	Pg(kPa)	εg(%)
VALEUR	260	2.60

Le taux de gonflement 9.21 %

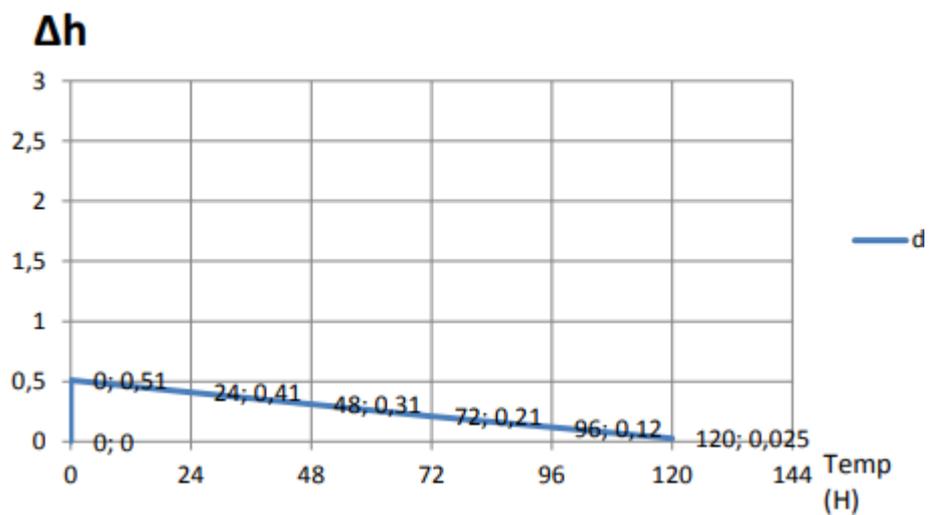


Figure IV.8 Evolution du taux de gonflement après ajout de 6 % de ciment

d. Evolution la pression de gonflement

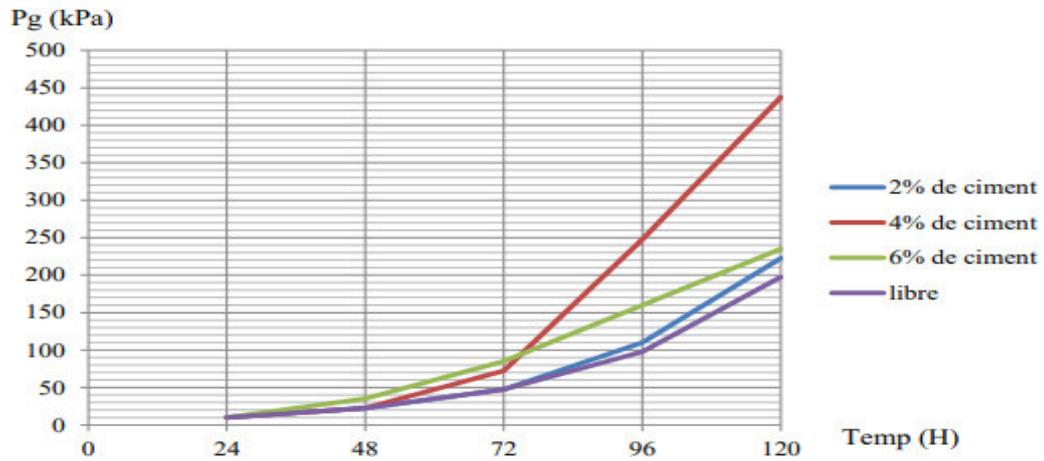


Figure IV.9 : Comparaison de l'évolution de la pression de gonflement.

**CONCLUSION  
GENERALE  
Résumé**

## Conclusion Générale Résumé

---

### Conclusion générale

Nous terminons notre travail par cette analyse des résultats du traitement du sol gonflant étudié, à l'influence du ciment que nous avons utilisé sur les paramètres moteurs de la gonflement, et sur ses propriétés physico-mécaniques, qui se reflètent dans le cadre de processus de stabilisation que nous avons entrepris par la méthode expérimentale directe, en réduisant la tendance au gonflement du produit et en améliorant d'autres paramètres géotechniques résultants.

Notre avis, si humble soit-il, sera également donné sur la préférence d'un dosage de ciment à l'autre, basée sur les résultats que nous allons présenter.

Les deux paramètres qui décrivent le phénomène de gonflement sont le taux de gonflement et la pression de gonflement  $P_g$ .

Variation du taux de gonflement selon le dosage de ciment :

Ciment 2% : Taux de gonflement diminué de 3,4%

4% ciment : Le taux de gonflement a diminué de 4,47%

6% ciment : Le taux de gonflement a diminué de 9,21%

Variation de la pression de gonflement en fonction du dosage de ciment :

- en utilisant 2% de ciment, on constate une augmentation de 32,5% de la pression de gonflement dû à la prise du ciment.
- Avec 4 % de ciment, la pression de gonflement augmente de 125 % avec le durcissement du sol
- Avec 6% de ciment la pression de gonflement augmente de 30% avec le durcissement du sol
- Selon les résultats obtenus :
- En observation d'une augmentation significative de la pression de gonflement lors de l'utilisation de ciment.
- L'augmentation de la pression de gonflement est due au durcissement rapide du matériau.
- Le durcissement des matériaux est le résultat de la prise rapide du ciment due à manque d'eau dans le sol.

## Conclusion Générale Résumé

### Résumé

La sécheresse qui a touché l'Algérie ces vingt dernières années Les années ont été exposés à des bâtiments érigés sur le terrain gros dégâts. Nous On s'inquiète du comportement de ce sol dans Réduire l'enflure. Il existe un certain type d'installation Utilisateur : ciment, installation par Le ciment provoque des changements important dans le comportement du sol. Bénéficier à Elle se concentre actuellement sur l'étude des limites d'Atterberg et Paramètres de cisaillement Du sol avant et après la stabilité. Cette étude est sans aucun doute une contribution importante Comprendre le phénomène de gonflement et de contraction Mots-clés : sol expansé, ciment, gonflement, stabilisation.

### ملخص :

تعرضت السنوات لمباني أقيمت على الأرض الجفاف الذي أصاب الجزائر خلال العشرين سنة الماضية ; تعرضت السنوات لمباني أقيمت على الأرض ضررا كبيرا.

نحن قلقون بشأن سلوك هذه التربة في تقليل التورم ; هناك نوع معين من التثبيت المستخدم:

الاسمنت: التثبيت بواسطة الاسمنت يسبب تغيرات مهمة في سلوك التربة ; الاستفادة من Atterbeg

تركز حاليا على دراسة حدود معالمات قص التربة قبل وبعد استقرار هذه الدراسة هي بلا شك مساهمة مهمة لفهم ظاهرة التورم والانكماش .

الكلمات المفتاحية : تربة موسعة . اسمنت . تورم . استقرار.

### Summary

- The drought that has affected Algeria in the last twenty years The years have been exposed to buildings erected on the ground big damage. We are concerned about the behavior of this soil in Reduce the swelling. There is a certain type of installation User: cement, installation by The cement causes significant changes in the behavior of the soil. Benefit to It currently focuses on the study of the limits of Atterberg and shear parameters of the soil before and after stability. This study is undoubtedly an important contribution Understanding the phenomenon of swelling and contraction Keywords: expanded soil, cement, swelling, stabilization.

# **Bibliographiques**

### Bibliographiques

1. AFNOR, Norme française sol: reconnaissance et essais :
2. NFP 94-041 : Analyse granulométrique, méthode de tamisage
3. NFP 94- 051: Détermination des limites d'atterbeg – limite de plasticité au rouleau.
4. NFP 94-093: Essai Proctor.
5. NFP 94-057 : Analyse granulométrique des sols par sédimentométrie.
6. NFP 94- 068: Détermination de la valeur de bleu de méthylène d'un sol.
7. NFP94-090: Essai oedométrique
8. NF P 94-078 : L'ESSAI DE CBR.
9. AL MUKHTAR. M, BELANTEUR. N, TESSIER. D, ET VANAPALLI. S.K, (1996) The fabric of a clay soil under controlled mechanical and hydraulic stress states Applied Clay Science, vol. 11, 99-115.
10. ALONSO. E, GENS. A. ET HIGHT, D. W, (1987) Special problems soils (session 5) General Report. 9<sup>th</sup> European Conference. Soil, mech. And Fond. Eng. Dublin
11. AZZOUZ F.Z (2006) Contribution à l'étude de la stabilisation chimique de quelques argiles gonflantes de la région de Tlemcen. Mémoire de magister Université de Tlemcen 179p
12. BENGRAA.L (2004). Contribution à l'étude de la stabilisation du gonflement par ajout de sable, application aux sols d'Oran. Mémoire de magister U.S.T. Oran, soutenue le 21.06.2004.102p
13. BENGUENEB Ahmed thèse de magister en génie civil (2009), Etude du gonflement des sols actifs sous différentes conditions de salinité
14. BENKADDOUR. M, KAZI AOUAL. F., SEMCHA. A : Durabilité des mortiers à base de pouzzolane naturelle et de pouzzolane artificielle Revue Nature et Technologie. n 01/Juin 2009. Pages 63 à 73
15. BOUZID.F (1997). Étude de l'aspect physico-chimique des caractéristiques mécaniques d'une argile gonflante : Bentonite Thèse de Magister Université des Sciences et de la technologie Houari Boumediene Alger.1997
16. GUEDDOUDA.K. (2005). « Stabilisation des argiles gonflantes par ajout de sable de dunes ;Cas : Région de Laghouat ». Thèse Magister soutenu le 14/06/2005. 136 pages.

## Bibliographique

---

19. GUEDDOUDA.K ET AL (2007). Caractérisation et stabilisation des sols expansifs. Colloque. Tunisie pp 27-34
20. HACHICHI.A. (2006). Étude du comportement hydromécanique et de la stabilisation des sols gonflants de la région d'Oran. Thèse Doctorat d'état 129 p.
21. HACHICHI A et FLEUREAU. J.M, (1999) : Caractérisation et stabilisation de quelques sols gonflants d'Algérie, Revue Française de géotechniques.
22. HAFSI. A (1993). Théories de la double couche et gonflement des argiles non saturées Euromech colloquium N°209: Mechanics of swelling, Rhodos, Greece, August 23- 27 .1993.
23. SURATMAN.I. (1985) Contribution à l'étude de la cinétique et de la stabilisation du gonflement des argiles. Diplôme de Docteur -Ingénieur. Institut National des Sciences Appliquées de Lyon
24. TEFAL.M (1993). Évaluation de la pression de gonflement de l'argile de Berrechid à l'appareil triaxial. Travail de Fin d'Études à l'École Hassania des Travaux Publics, Casablanca.