



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
People's Democratic republic of Algeria
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministry of Higher Education and Scientific Research
جامعة عبد الحميد بن باديس – مستغانم
University Abdelhamid Ibn Badis – Mostaganem
كلية العلوم والتكنولوجيا
Faculty of Sciences and Technology
قسم الهندسة المدنية والمعمارية
Civil engineering & architecture department



N° d'ordre : M/GCA/2020

MEMOIRE DE FIN D'ETUDE DE MASTER ACADEMIQUE

Filière : Génie Civil

Spécialité : Structure

Thème

**STABILISATION AVEC LA CHAUX D'UN SOL GONFLANT
RECONSTITUE AU LABORATOIRE**

Présenté par :

- MISSOUM Touatia
- SABER Ikram

Soutenu le .. / .. / 2020 devant le jury composé de :

Président : Mr MEBROUKI AbdelkaderProfesseur- Université de Mostaganem

Examineur: Mr BELHOUARI Fethi M.C.B -Université de Mostaganem

Encadrant : Melle MOSTEFA FouziaM.A.A -Université de Mostaganem

Année Universitaire : 2019 / 2020

Remerciement

Ce travail de mémoire a été effectué au sein du Laboratoire de l'Université de Mostaganem (LCTPE).

Nous adressons tout d'abord nos plus vifs remerciements à tous les membres du Jury de l'intérêt manifesté pour notre travail :

Monsieur MEBROUKI Abdelkader, Professeur à l'Université Abdelhamid Ibn Badis de Mostaganem de nous avoir fait l'honneur de présider ce mémoire ainsi que Monsieur BELHOUARIA Fethi , M.C.A d'avoir voulu examiner ce travail.

Nous remercions vivement à Mem MOSTEPHA Fouzia, M.A.A notre encadrante ; pour ses encouragements et son aide pour l'aboutissement de ce travail. Nos remerciements aussi pour ses conseils, lectures et remarques judicieuses qui nous ont aidé lors de la rédaction de ce mémoire.

Nous souhaitons également remercier Mr KHELIFA, Ingénieure de laboratoire à l'Université Abdelhamid Ibn Badis Mostaganem pour sa grande aide.

Nous remercions société BANTAL pour l'aide apportée pour la fourniture de 1 m³ argile BENTONITE

Aussi nos remerciements vont au laboratoire de transport public d'Oran(LTPO) ; spécialement le technicien du labo , pour nous avoir permis de réaliser quelques essais.

Nous n'oublions pas de présenter nos vifs remerciements à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail

A tous ceux qui m'ont aidé, encouragé et donné la volonté pour continuer à terme le présent travail. Je les porterai tous et pour toujours dans mon cœur, à mes très chers parents, mon père, qui m'a soutenu et encouragé toute au long de ma vie, je lui dis merci papa, ma mère, source de tendresse et d'amour, l'extrême exemple de ma vie, je lui dis merci maman,

à ma très chère sœur Fadila et mes chers frères,

je souhaite le bonheur, à toute la famille MISSOUM,

à toute la promotion de Master «Génie civil».

TOUATIA

Dédicaces

Avec une profonde gratitude, je dédie ce modeste travail de fin d'études à mes très chers parents pour les judicieux conseils et les sacrifices consentis.

Egalement, j'ai une pensée spéciale pour mes grands-parents paternels et maternels qui m'ont guidés grâce à leurs bienveillantes prières et leur écoute.

Je remercie sincèrement ma famille, mes chers frères et ma tendre sœur qui m'ont toujours épaulée.

Enfin, je n'oublie pas mes amis, les personnes qui m'ont aidée de près ou de loin. Leur soutien m'était précieux.

IKRAM

ملخص :

تشكل التربة المتضخمة مشاكل كبيرة فيما يتعلق بسلامة البناء ، حيث تتداخل مع جميع أعمال الهندسة المدنية : الأساسات ، العميقة والسطحية ، للمباني والهيكل ، الهياكل الاستنادية ، السدود لاستخدامات الطرق أو السكك الحديدية. بالنسبة لهذه التربة ، ترتبط الاختلافات الحجم بوجود ما يسمى بجزيئات الطين التي تتضخم في وجود الماء. لقد حاولت الكثير من الأبحاث فهم الظاهرة وتطوير تقنيات الإصلاح لتنشيط التربة. يبدو أن تقنية معالجة بالجير هي الأكثر دراسة المستعملة، التي أعطت نتائج جيدة، ومع ذلك تظل هذه النتائج مختلفة للغاية بسبب طبيعة التربة الطينية المدروسة (نوع المعادن ، ونسبة العناصر الدقيقة ، وما إلى ذلك).

الهدف من عملنا هو الدراسة على نطاق المختبر لتربة معاد تشكيلها ، تفي بالمتطلبات المحددة في البداية: تربة بلاستيكية للغاية ، مؤشر اللدونة وإمكانية التضخم عليا النسب ، ونسبة عالية جدًا من العناصر الطينية الدقيقة . لهذا قمنا بإضافة 10٪ من البنتونيت إلى التربة الطبيعية المأخوذة من عينات التربة سيدي بلعطار. تمت معالجة التربة المعاد تكوينها بالجير (2 ، 4 و 6٪).

أظهرت النتائج التي تم الحصول عليها فعالية عملية المعالجة وأن 4٪ من الجير هو الأنسب لتنشيط التربة المعاد تكوينها.

الكلمات المفتاحية : تضخم التربة ، الاستقرار ، إمكانية التضخم ، الانضغاط ، الجير ، البنتونيت ، التربة المعاد تكوينها.

Abstract :

Swelling soils may be a source of major problems with regard to construction safeties, where it interferes with all civil engineering works: foundations, deep and shallow, of buildings and engineering structures, retaining structures, embankments for road or rail use. For these soils, the volume variations are linked to the presence of so-called expansive clay particles in the presence of water. Much research has tried to understand the phenomenon and develop treatment techniques to stabilize soils. The lime treatment technique seems to be the most studied, and has given good results, nevertheless these results remain very varied due to the nature of the clay soils studied (type of minerals, percentage of fine elements, ...etc.)

The aim of our work is to study at the laboratory scale a reconstituted soil meeting the requirements initially set: very plastic soil, plasticity index, swelling potential and very high fine element percentage. For this, we added 10% of bentonite to the natural soil taken from Sidi-Belattar; the reconstituted soil was treated with lime (2 , 4 and 6%).

The obtained results showed the effectiveness of the treatment process and 4% lime is better suited to stabilize the reconstituted soil.

Key words: Swelling soil, stabilization, swelling potential, compressibility, lime, bentonite, reconstituted soil.

Résumé :

Les sols gonflants posent des problèmes d'ordre majeur vis-à-vis des sécurités des constructions, où il interfère avec tous les ouvrages du génie civil: les fondations, profondes et superficielles, des bâtiments et ouvrages d'art, les ouvrages de soutènement, les remblais à usage routier ou ferroviaire. Pour ces sols, les variations de volume sont liées à la présence de particules argileuses dites expansives en présence d'eau. Beaucoup de recherches ont essayé de comprendre le phénomène et développer des techniques de traitement en vue de stabiliser les sols. La technique de traitement par la chaux semble la plus étudiée, et a donné de bon résultats, néanmoins ces résultats restent très variés en raison de la nature des sols argileux étudiés (type de minéraux, pourcentage d'éléments fin ..).

Le but de notre travail est étudié à l'échelle de laboratoire un sol reconstitué répondant à des exigences posées au départ : sol très plastique, indice de plasticité, potentiel de gonflement et pourcentage en éléments fin très élevés. Pour cela, nous avons additionné 10 % de bentonite au sol naturel prélevé Sidi-Belattar ; le sol reconstitué a été traité avec de la chaux (2,4 et 6 %).

Les résultats obtenus, ont montré l'efficacité du procédé de traitement et 4% chaux est mieux adapté pour stabiliser le sol reconstitué.

Mots clés : Sol gonflant, stabilisation, potentiel de gonflement, compressibilité, chaux, bentonite , sol reconstitué

SOMMAIRE

Résumé	V
Sommaire	VIII
Liste Des Figures	XI
Liste Des Tableaux ...	XIV
Liste Des Notations	XV
Introduction	16
CHAPITRE I : Caractérisation des argiles	
I.1 Définition des sols argileux.....	19
I.2 Structure minéralogique des argiles.....	20
I.3 Classification des minéraux argileux.....	20
I.4 Les différents types argiles	21
I.4.1 Kaolinite.....	22
I.4.2 Montmorillonite.....	23
I.4.3 L'illite.....	24
I.4.4 Bentonites.....	25
I.5 Principales caractéristiques des minéraux argileux.....	25
I.5.1 La densité de la charge spécifique.....	25
I.5.2 La forme des particules argileuses.....	26
I.5.3 La surface spécifique des particules argileuses.....	27
I.5.4 Les propriétés colloïdales.....	27
I.5.5 La capacité d'échange cationique (CEC).....	28
I.5.6 Cations échangeables.....	28
I.6 Interactions physico-chimiques entre l'eau et l'argile.....	28
I.6.1 Les liaisons d'hydrogènes.....	29
I.6.2 Les forces d'attraction de Van der Waals.....	29
I.7 Gonflement des sols argileux.....	30
I.7.1 L'hydratation des cations échangeables.....	32
I.8 La double couche diffuse (DDL).....	32
I.9 Conclusion.....	33
CHAPITRE II : Causes et conséquences du gonflement	
II.1 Introduction.....	34

II.2 Conséquence du gonflement.....	34
II.2.1 Cas des bâtiments.....	34
II.2.2 Cas des chaussées.....	36
II.2.3 Cas des travaux souterrains.....	37
II.2.4 Cas des voiries et réseaux divers.....	37
II.3 Causes du gonflement.....	38
II.4 Mécanisme de gonflement.....	39
II.4.1 Le Gonflement au sens physico-chimique.....	39
II.4.1.1 Hydratation des espaces interfoliaires.....	40
II.4.1.2 Répulsion entre les particules.....	41
II.4.2 Le Gonflement au sens mécanique.....	41
II.5 Conclusion.....	43
CHAPITRE III : Méthodes d'amélioration des caractérisations des argiles	
III.1 Introduction.....	44
III.2. Stabilisation mécanique.....	44
III.2.1 Méthode de compactage.....	44
III.2.2 Méthode de substitution.....	45
III.2.3 Stabilisation par ajout de sable.....	45
III.3. Stabilisations chimiques.....	47
III.3.1 Stabilisation par des solutions salines.....	48
III.3.2 Stabilisation par les liants hydrauliques (chaux, ciment).....	52
III.3.2.1 Stabilisation par ajout de la chaux.....	53
III.3.2.2 Stabilisation par ajout du ciment.....	55
III.4. Technique d'injection.....	56
III.5. Avantages et inconvénients des techniques de stabilisation couramment utilisées.....	57
III.6. Méthode d'utilisation de la chaux dans le traitement du sol.....	59
III.6.1 Malaxage sur place.....	59
III.7 Conclusion.....	61
CHAPITRE IV : Identification du sol et protocoles d'essai	
IV.1. Introduction	62
IV.2. Identification et localisation du site.....	62
IV.3. Caractéristiques physiques.....	65

IV.3.1 Calcul des Poids volumiques.....	65
IV.3.2 Teneur en eau W%.....	66
IV.3.3 Degré de saturation S_r	66
IV.3.4 Analyse granulométrique (NF P94-057).....	67
IV.3.5 Analyse par sédimentométrie (NF P94-057).....	67
IV.3.6 Limites d'Atterberg (NF P94-051).....	69
IV.4 Caractéristique chimique.....	73
IV.4.1 Dosage des carbonates CaCO_3 (NF ISO 10693).....	73
IV.4.2 Valeur en bleu du sol (VBS) et surface spécifique (NF P94-0.....	74
IV.4.3 La teneur en matière organique (NF EN 12879-2000).....	75
IV.5 Caractéristique mécaniques.....	76
IV.5.1 Essai Proctor (NF P 94-093).....	76
IV.5.2 Essai de compressibilité à l'œdomètre (NF P 94-090-1).....	77
IV.6 Conclusion.....	82
CHAPITRE V: Résultat et analyse de stabilisation du sol par l'ajout chaux	
V.1 Introduction	83
V.2 Bentonite.....	83
V.3 La chaux.....	83
V.4 Propriétés physiques du sol reconstitué.....	85
V.5 Résultats des limites d'Atterbergue.....	86
V.5.1 Effet de la Bentonite sur les limites d'Atterbergue.....	86
V.6 Analyse granulométrique	88
V.7 Effet de la chaux sur les limites d'Atterbergue.....	89
V.7.1 Les processus physico-chimiques provoqué par l'ajout de chaux	89
V.7.2 Effet sur l'indice de plasticité	90
V.7.3 Effet sur les limites de plasticité et liquidité.....	91
V.8 Influence des teneurs en chaux sur les paramètres de compactage.....	92
V.9 Essai œdométrique.....	95
V.10 Conclusion	98
-Conclusion générale.....	99
-Références Bibliographiques.....	101
-ANNEXES.....	107

Liste des figures

Chapitre I		Page
Figure I.1	définition d'une argile raide et une argile tendre (Lancellotta, 1995) cité par (Coll C, 2005).....	19
Figure I.2	Elément tétraédrique (Luckham et al, 1999)	20
Figure I.3	Elément octaédrique (Luckham et al, 1999)	21
Figure I.4	Photographies au Microscope Electronique à Balayage des argiles Mitchell (1976) cité par Huidi et al (2006)	22
Figure I.5	Réseau cristallin de la kaolinite (Parcevaux,1980 ; Tefal (1993)	23
Figure I.6	Structure de Famille de la montmorillonite.....	24
Figure I.7	Structure de famille de l'illite.....	24
Figure I.8	Structure de la bentonite	25
Figure I.9	Les différentes formes des particules argileuses (Velde, 2013)	26
Figure I.10	Les différents types d'eau dans le sol (Lefèvre, 2015)	29
Figure I.11	Types de gonflements.....	30
Figure I.12	Mécanismes de gonflement des argiles par hydratation Bouzid ; (1997) ; Bengraa (2004) et Gueddoudda (2005)	31
Figure I.13	Courbe du gonflement en fonction du temps (Chen, 1988)	31
Figure I.14	Les liaisons possibles de l'eau inter-foliaire (Morel, 1996)	32
Figure I.15	a)Structure de la double couche électrique diffuse (DDL) adjacente à une surface d'argile	32
	b) répartition potentielle des cations et des anions à partir de la surface de l'argile (Alshawabkeh, 2001)	32
Figure I.16	Modèle de la double couche de Gouy- Stern (1910-1924)	33
Chapitre II		
Figure II.1	Formes de Dégâts Sur des Bâtiments Reposant Sur des Terrains gonflants, (Mouroux et al, 1988)	35
Figure II.2	Formes et Directions de Fissuration, (Mouroux et al, 1988)	35
Figure II.3	Désordres due au gonflement (Photo prise à Tizi-Ouzou)	36
Figure II.4	Fissure sur les murs (Zenk, 2010)	36
Figure II.5	Fissure longitudinales sur routes.....	36
Figure II.6	Soulèvement puis dislocation du radier d'un tunnel.....	37
Figure II.7	Mécanismes des causes de gonflement (Gens et Alonso, 1992)	40

Chapitre III		
Figure III.1	Variation du potentiel de gonflement dans le temps du mélange argile de Sidi Chahmi et Mers El Kébir + sable de rivière.....	47
Figure III.2	Action des différents types de sels sur le taux de gonflement Azouz (2006)	48
Figure III.3	Évolution du potentiel de gonflement en fonction du temps en présence de différentes concentrations salines la bentonite de M'zila	49
Figure III.4	Évolution du potentiel de gonflement en fonction du temps en présence de différentes concentrations salines de l'argile de Bourmadia (Bengueneb, 2009)	50
Figure III.5	Évolution finale de pression de gonflement en fonction de différentes concentrations salines de la bentonite de M'zila et l'argile de Bourmadia.....	51
Figure III.6	Courbes de gonflement des argiles de Sidi Chahmi et Mers El Kébir en présence de différents sels minéraux à différentes concentrations.	52
Figure III.7	Variation de l'indice de plasticité avec l'ajout de la chaux. Azouz (2006)	54
Figure III.8	Influence de la chaux sur les caractéristiques de compactage, Azouz, (2006)	55
Figure III.9	Effet du dosage au ciment sur le gonflement de la Bentonite de Meghnia. (Djedid, 2005)	56
Figure III.10	Technique d'injection	57
Figure III.11	A Technique de Malaxage (fediex section Kalk sectie)	60
	B Technique de Malaxage (fediex section Kalk sectie)	61
Chapitre IV		
Figure IV.1	(a), (b) et (c) localisation géographique du lieu d'étude (image googleearth)	63
Figure IV.2	Coupes de niveau du terrain d'étude	64
Figure IV.3	Prélèvement de sol.....	65
Figure IV.4	Essai d'étuvage du sol.....	66
Figure IV.5	Essai sédimentométrie.....	68
Figure IV.6	Courbe granulométrique du sol naturel prélevé.....	68
Figure IV.7	Classification du sol en fonction du triangle de texture.....	69
Figure IV.8	Essai de limite atterberg (appareil de casagrande).....	70

Figure IV.9	Essai de limite de plasticité.....	70
Figure IV.10	Classification des sols fins, diagramme de plasticité (abaque de casagrande)	71
Figure IV.11	Position des minéraux argileux les plus communs sur l'abaque de plasticité de Casagrande.....	72
Figure IV.12	Essai de bleu méthylène.....	75
Figure IV.13	Essai de détermination de la matière organique.....	75
Figure IV.14	Essai Proctor.....	77
Figure IV.15	Essai de compactage du sol naturel.....	77
Figure IV.16	Appareil Oedomètre.....	78
Figure IV.17	Schéma de la courbe de compressibilité (LCPC).....	80
Figure IV.18	Courbe de compressibilité du sol naturel.....	81
Chapitre V		
Figure V.1	Organigramme des essais.	84
Figure V.2	Variation des priorités physiques des sols reconstitués.....	85
Figure V.3	limite de liquidité en fonction du pourcentage de bentonite.....	86
Figure V.4	histogramme de variation des limites en fonction pourcentage de Bentonite.	87
Figure V.5	Classification des sols fins, diagramme de plasticité.....	87
Figure V.6	Influence de la Bentonite sur la granulométrie du sol.....	88
Figure V.7	Préparation des sols pour essai de limite.....	90
Figure V.8	Relation entre les limites et la teneur en chaux.....	90
Figure V.9	Classement des échantillons vis-vis du potentiel de gonflement.	92
Figure V.10	Influence de l'addition de chaux sur les courbes de compactage.	93
Figure V.11	Préparation des sols pour essai de compactage (Proctor).....	93
Figure V.12	Histogramme relation entre la densité sèche et le pourcentage en chaux.	94
Figure V.13	Histogramme relation entre W_{opt} (%) et pourcentage en chaux.	95
Figure V.14	Courbes graphiques d'essai de compressibilité des sols.	96
Figure V.15	Evolution des indices de compressibilité et gonflement.	98

Liste des tableaux

Chapitre I		Page
Tableau I.1	La surface spécifique des particules argileuses (Eslinger et Peaver, 1988).	27
Tableau I.2	Capacité d'échange cationique des particules argileuses (Hafsi, 1993).	28
Chapitre III		
Tableau III.1	Les principaux avantages et inconvénients de chaque technique.	58
Chapitre IV		
Tableau IV.1	Les propriétés physiques du sol.	67
Tableau IV.2	Résultats des limites d'atterberg.	71
Tableau IV.3	Détermination du type d'argile.	72
Tableau IV.4	Teneur en CaCO ₃ de quelques sols.	73
Tableau IV.5	Essai de bleu méthylène et surface spécifique.	74
Tableau IV.6	Classement des sols en fonction du VBS.	74
Tableau IV.7	Les différents types de sols en fonctions de la teneur en matières organiques.	76
Tableau IV.8	Résultats d'essai de compressibilité du sol naturel.	81
Tableau IV.9	Classement des argiles selon leurs indices de compressibilités et indices des vides, donné par Philipponnat et Hubert (1997).	81
Tableau IV.10	Classement du sol selon l indices de compressibilité.	82
Chapitre V		
Tableau V.1	Propriété physique.	85
Tableau V.2	Variation des limites d'atterbergue en fonction du % Bentonite.	86
Tableau V.3	Indice d'activité du sol reconstitué.	88
Tableau V.4	Variation des limites d'atterbergue en fonction du % chaux.	89
Tableau V.5	Relation entre ρ_{dOPN} , W_{opt} et pourcentage en chaux.	93
Tableau V.6	Résultats d'essai de compressibilité.	96
Tableau V.7	Classement des sols traités selon leurs indices de compressibilités et indices des vides.	97

LISTE DES SYMBOLES

- A : coefficient d'activité
- CEC : capacité d'échange cationique
- Cg : coefficient de gonflants
- Cc : indice de compressibilité
- c: cohésion
- D : diamètre des particules solides

- e_0 : indice de vide
- I_p : indice de plasticité
- N : effort normal de compression
- G : taux de gonflement maximal pour un temps infini.
- H : hauteur
- h_0 : hauteur initiale
- h_p : La hauteur pleine
- I_p : indice de plasticité.
- I_R : indice de retrait.
- P: pression
- P_c : pression capillaire
- P_0 : pression de surconsolidation,
- P_{max} : pression du gonflement maximale.
- S : section oedométrique
- Q: surcharge
- S.S.T : surface spécifique.

- MEB : Microscope électronique à balayage
- t_0 : temps de référence
- u : tension de surface eau air
- u_a : pressions d'air
- u_w : pressions d'eau,
- VB: Valeur du bleu

Introduction générale

Les sols argileux présentent des couches d'assises pour un grand nombre d'ouvrages de génie civil. Ils sont constitués de minéraux variés, certains ont la caractéristique d'être fortement affiné à l'eau, telles que: la montmorillonite, l'illite, et notamment la smectite. Ils sont donc largement influençables par la variation de la teneur en eau. Une humidification de ces sols induit des gonflements importants, et inversement, une désaturation de ce type de sol provoque une diminution importante de volume, caractérisée par l'apparition d'un réseau de fissures à partir de la surface –c'est le retrait.

Le caractère gonflant de certaines argiles est lié en premier lieu à leur composition minéralogique. D'autres facteurs tels que la structure du sol, sa densité, sa teneur en eau initiale peuvent affecter de manière significative la pression de gonflement ou la déformation de ces argiles. les problèmes de gonflement se manifestent spécialement dans les régions arides et semi-arides qui se caractérisent par de longues périodes de sécheresse suivies, par de courtes périodes pluviales. Divers approches ont été proposées pour l'explication du phénomène. En effet, certains chercheurs supposent que le gonflement est du uniquement à la non saturation du matériau argileux : suite à une saturation progressive des pores du sol, on assiste à la disparition des forces capillaires liant ces pores induisant un chargement apparent du volume. Par contre, d'autres auteurs considèrent qu'il est dû à l'affinité des minéraux argileux à la solution d'hydratation : par absorption des molécules d'eau sur la surface extérieure des particules ainsi qu'à leur pénétration (les molécules d'eau) entre les feuillets dont l'empilement constitue les particules d'argile.

Le problème de gonflement est rencontré dans beaucoup de pays tel que : l'Algérie, l'Afrique le Mexique, le Maroc, les USA, le Venezuela. l'analyse des résultats obtenus en 1978 par la Fondation Nationale de Science, Chen (1975) ; a noté que 10% de la population mondiale, risque d'être affectée par les dommages associés aux sols gonflants, et qu'aucun état n'est à l'abri des conséquences et des préjudices susceptibles d'en résulter.

En Algérie, plusieurs cas de désordres très préjudiciables, liés au gonflement, ont été signalés dans plusieurs régions : la raffinerie d'In Aminas, l'hôpital de N'Gaous(Batna), la ligne de chemin de fer Ramdane (Jijel), l'hôpital de Sidi Chahmi et la briqueterie de Mers El Kébir

(Oran) (hachichi et fleureau ,1999), Groupement de Tlemcen-Mansourah- Chetouane (Bekkouche et al .2001), nouvelle cité de Bormadia (Relizine) (Bengueneb , 2009) ...

Les argiles gonflantes sont donc présentes dans de nombreux contextes, leurs propriétés pouvant être à la fois profitable et ou dommageable. Il parait donc important de prévoir le comportement hydromécanique de ces matériaux, afin de mieux maitriser leur utilisation.

La problématique de cette recherche est donc d'étudier la réponse des sols argileux en contact avec la chaux pour atteindre cet objectif, la voie qui nous a paru la plus approprié consistait à passer par des expérimentations spécifiques en laboratoire afin de comprendre le comportement d'un matériau argileux. Les résultats expérimentaux obtenus ont servi par la suite de comprendre l'effet de la chaux sur les paramètres du gonflement.

Le plan de cette mémoire est organisé comme suite :

- ✓ Le chapitre I :<< **propriétés des sols argileux** >> Ce chapitre est un voyage au cœur des argiles pour mieux connaître ses propriétés. Il peut être divisé en deux parties :
 - Minéralogie et caractérisation des argiles.
 - Interaction eau-argile : où on va voir l'aptitude de certaines argiles au gonflement.

- ✓ Le chapitre II :<< **causes et conséquences du gonflement**>> Ce chapitre consiste à dépeindre le cadre générale de l'impacte du gonflement sur les ouvrages en géotechnique pour en préciser les désordres rencontrés et l'importance d'étudier de tels phénomènes.

- ✓ Le chapitre III :<< **méthodes de stabilisation des sols argiles.** >> Ce chapitre présenté une synthèse bibliographique en mentionnant l'état d'avancement des recherches dans le domaine de la stabilisation des sols gonflants.

- ✓ Le chapitre IV :<< **Identification du sol et protocoles d'essai** >> Dans ce chapitre nous identifions et caractérisons nos sols (sol Belattar) par une série d'essais (limites d'Atterberg, sédimentométrie, valeur du bleu, perte au feu,...).ces essais sont complétés par des mesures directes des paramètres de gonflement.

- ✓ Le chapitre V : << **Résultat et analyse du sol traité par l'ajout chaux** >> Ce chapitre porte sur l'effet de l'ajoute de la chaux en différents pourcentage sur les caractéristiques mécaniques des sols étudiés ainsi que les paramètres de gonflement.

- ✓ :<< **Conclusions et perspectives** >>En fin, dans cette partie on rassemblera les points importants issus de ce travail, et on présentera les perspectives ouvertes par cette modeste recherche

Chapitre I : Propriétés des sols argileux

I.1. Définition des sols argileux

En géotechnique, les sols argileux désignent une famille de roches, un ensemble de particules minérales, une catégorie de sols, une classe granulométrique, ou encore un matériau de construction. En mécanique des sols, elle a un double sens : elle désigne à la fois les minéraux argileux eux-mêmes (on définit la fraction argileuse d'un sol comme étant la teneur en particules de moins de $2 \mu\text{m}$ de diamètre) et les sols contenant une assez grande quantité de particules argileuses plus de 50% de minéraux argileux.

Les argiles couvrent environ 42% du volume de l'écorce terrestre (Azzouz, 2006). Elles peuvent être classées en deux grandes catégories selon leur consistance (Figure I.) :

- Argiles plastiques : tendres et très déformables.
- Argiles raides : elles sont indurées et présentent un comportement plus fragile que ductile au-delà de la limite d'élasticité, à cause de la présence des carbonates et du quartz.

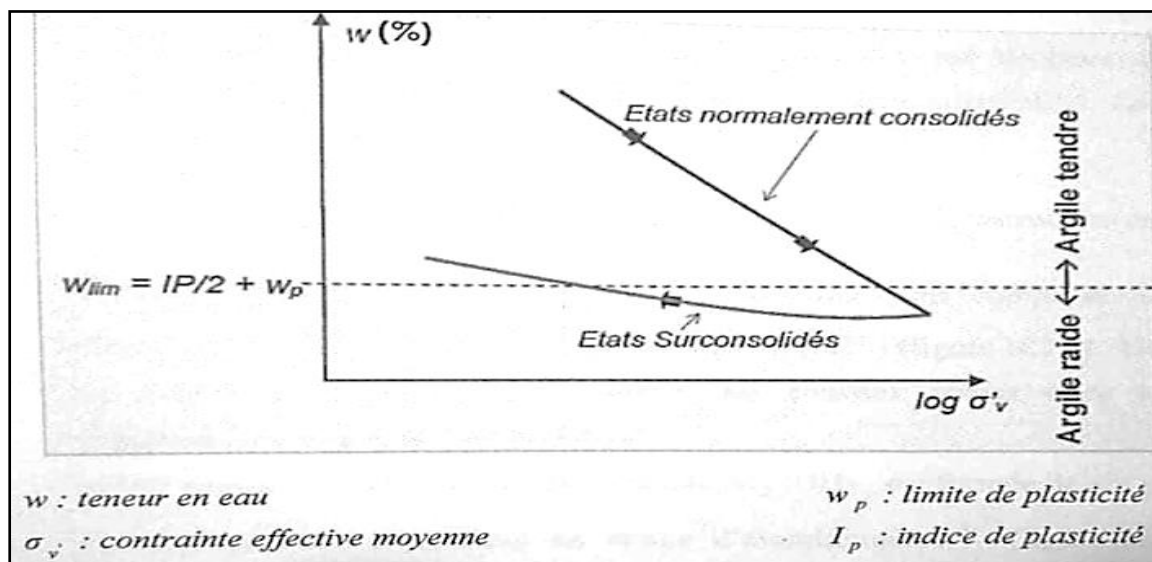


Figure I.1 : définition d'une argile raide et une argile tendre (Lancellotta, 1995) cité par (Coll C, 2005)

I.2 .Structure minéralogique des argiles

Elles sont constituées essentiellement d'aluminium, silicium, oxygène, et ions hydroxyles. Ce sont des phyllosilicates d'alumine hydratés, désignant des minéraux qui prennent des formes feuilletés. Ces minéraux argileux se présentent sous forme de particules de petites tailles, se distinguant en quatre niveaux d'organisation :

- Les plans sont constitués par les atomes
- Les feuillets, tétraédriques ou octaédriques, sont formés par combinaison de plans
- Les feuillets correspondent à des combinaisons de couches
- Le cristal résulte de l'empilement de plusieurs couches.

Il existe deux unités cristallines fondamentales de minéraux argileux, à savoir tétraédrique et octaédrique. Une unité tétraédrique appartient à quatre silicium renfermant de l'oxygène, tandis qu'une unité octaédrique est composée de six atomes l'oxygène ou d'hydroxyles situés aux angles des ions aluminium, magnésium, fer ou autres. Les schémas de base des unités tétraédriques et octaédriques sont présentés aux figures (I.2) et (I.3).

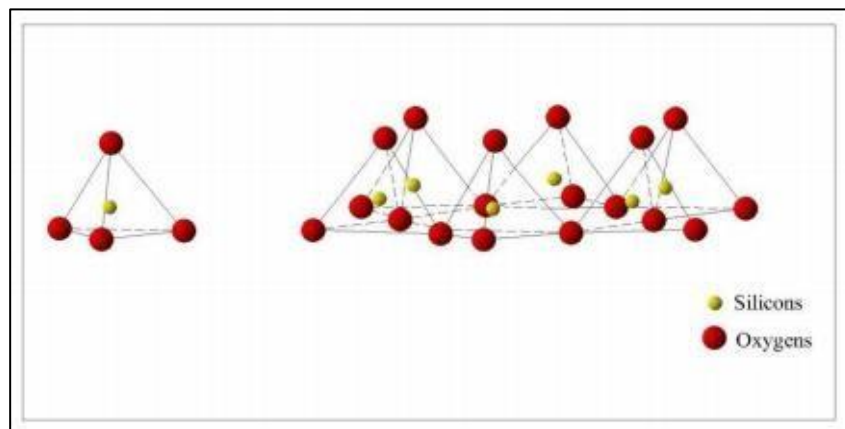


Figure I.2 : Élément tétraédrique (Luckham et al,1999)

I.3. Classification des minéraux argileux

La classification des argiles et leur nomenclature dépendent de leur composition chimique et de l'ordre structural. Les travaux de l'Association Internationale pour l'Etude des Argiles AIPEA (1966-1972) ont permis d'aboutir à une classification qui repose sur les critères suivants :

- Type de feuillet 2:1 ou 1:1.
- Charge globale du feuillet.

- Nature des cations interfoliaires.

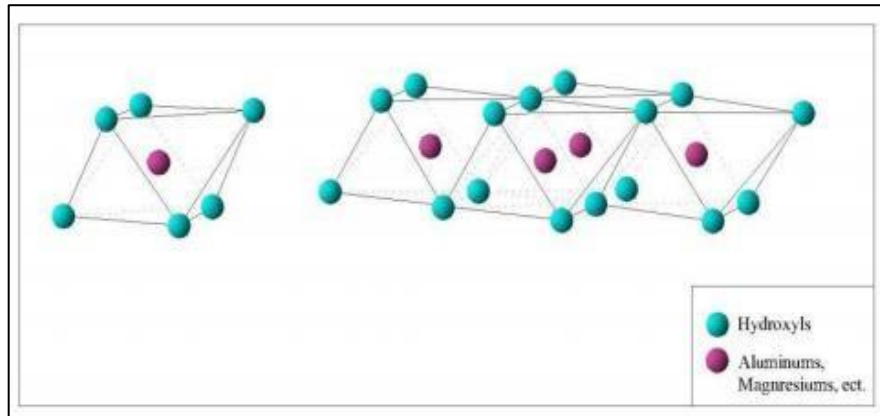


Figure I.3: Élément octaédrique (Luckham et al, 1999)

Suivant le mode d'agencement des tétraèdres et des octaèdres, on peut distinguer deux grandes familles de minéraux :

- 1) Les minéraux fibreux qui sont des espèces à pseudo feuillets, par exemple les sépiolites.
- 2) Les minéraux phylliteux à structure lamellaire. Ces derniers sont les plus répandus et les plus étudiés. Il existe plusieurs groupes de minéraux :
 - Minéraux 7A° : Le feuillet est constitué d'une couche tétraédrique et d'une couche octaédrique, il est de qualité : T : O ou de type 1 : 1
 - Minéraux 10A° : Le feuillet est constitué de deux couches tétraédriques et d'une couche octaédrique, il est de qualité : T:O:T ou de type 2 : 1
 - Minéraux 14A° : Le feuillet est constitué de l'alternance de T:O:T et de couche octaédrique interfoliaire.

I.4 .Les différents types argiles

Il y a lieu de distinguer trois grandes familles d'argiles caractérisées par des propriétés différentes (Duchaufour, 1983 ; Caillère et al, 1982). Les types d'argiles les plus fréquents sont : la kaolinite, la montmorillonite et l'illite (Figure I.4).

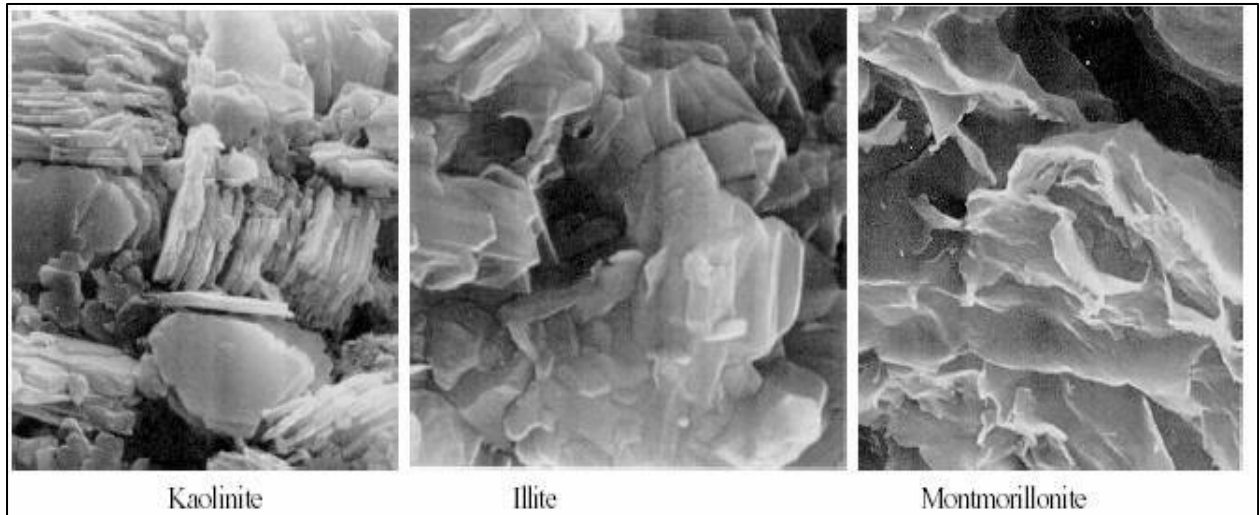


Figure I.4 : Photographies au MEB des argiles Mitchell (1976) cité par Huidi et al (2006)

I.4.1 Kaolinite

La kaolinite est une argile stable, non-gonflante et sa structure élémentaire n'est pas affectée par la présence d'eau et ne peut être détruite que par chauffage à 450°C. La formule générale d'un feuillet de kaolinite est donnée par la formule (I.1) (Hafsi, 1993). Chaque feuillet de cette famille résulte de l'assemblage d'un feuillet tétraédrique SiO_4 avec un feuillet octaédrique $\text{AlO}_2(\text{OH})_4$ (Figure I.6). Les argiles de cette famille sont dites argiles



Les couches de base successives sont maintenues par les liens d'hydrogène entre les hydroxydes du feuillet en octaèdre et les atomes d'oxygène du feuillet en tétraèdre.

Ces liaisons considérées comme très forte, empêchent l'hydratation entre les feuillets élémentaires permettant un empilement relativement important de couches et la formation d'un cristal d'assez grande dimension. L'espace inter-foliaire de cette famille est de 7.2Å .

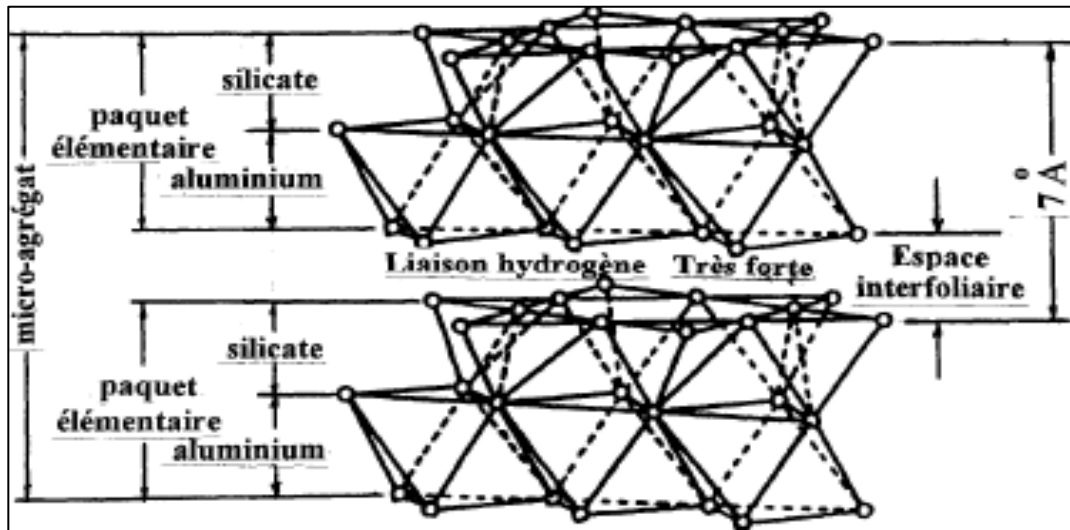


Figure I.5 : Réseau cristallin de la kaolinite (Parcevaux,1980 ; Tefal ,1993)

I.4.2. Montmorillonite

Ces minéraux sont également formés de feuillets à trois couches et sont des argiles T-O-T. L'épaisseur d'un feuillet est de 10Å , il est constitué par l'association de deux couches tétraédriques de type $\text{TO}_4(\text{OH})_2$. T pouvant être Al^{3+} , Fe^{3+} , Mg^{2+} , K^+ ,...etc (Figure I.6). La formule générale de la montmorillonite est la suivante, citée par (Hafsi; 1993)



Les liaisons d'un feuillet à l'autre sont faibles et l'eau pénètre facilement entre les feuillets. Pour cette raison, les ions échangeables peuvent pénétrer dans la structure et séparer les couches. La faiblesse de ces liaisons leur confère de grandes surfaces spécifiques et de forts potentiels de gonflement.

L'argile contenant un fort pourcentage de montmorillonite est considérée comme une argile de nature gonflante.

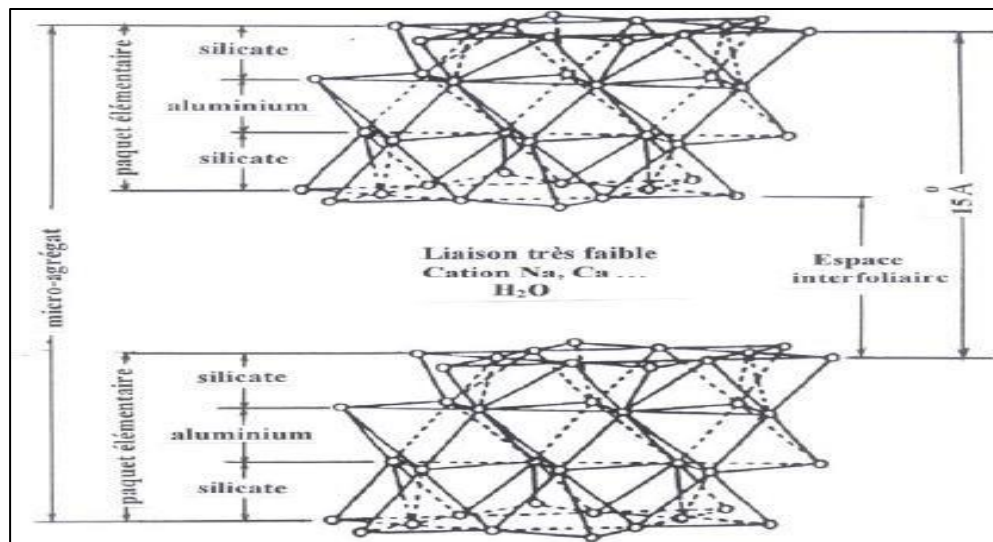


Figure I.6 : Structure de Famille de la montmorillonite.

I.4.3. L'illite

Ces argiles sont donc aussi appelées argiles **T-O-T**. La structure de l'illite est analogue à celle de la montmorillonite, mais la présence d'ions potassium K^+ dans la structure (Figure I.7) Rééquilibre et renforce la liaison entre les feuilles, rendant ainsi l'argile moins sensible aux phénomènes de retrait-gonflement

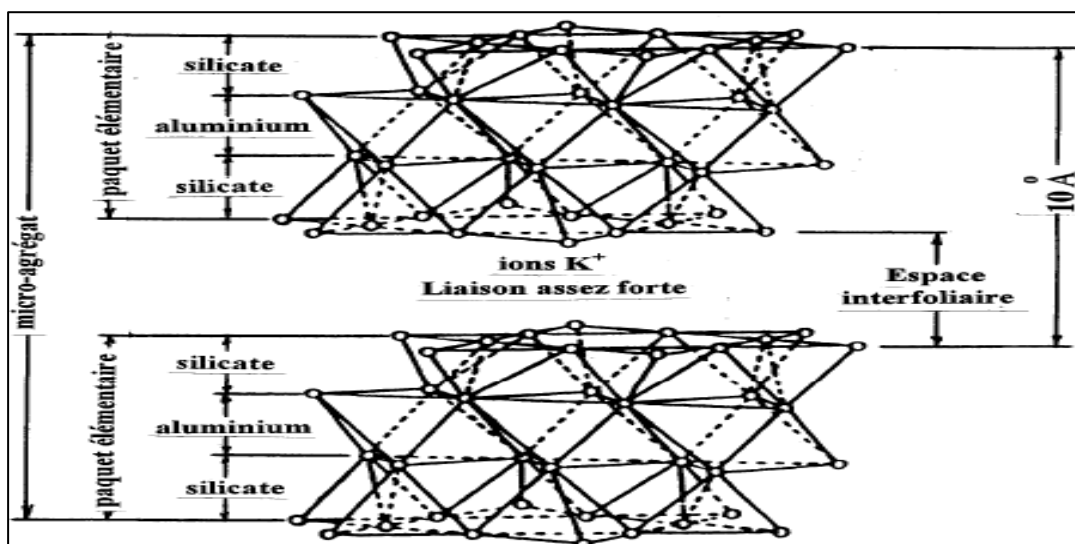


Figure I.7 : Structure de famille de l'illite

I.4.4. Bentonites

C'est une argile composée essentiellement de montmorillonite du groupe des smectiques et qui se caractérise par une forte capacité de gonflement après absorption d'eau.

Les smectites se caractérisent par une structure en feuillets (distance réticulaire 14\AA) constitués de trois couches tétraédriques et octaédriques selon la position de l'oxygène ou de l'hydroxyle (OH), les petits cations (Si^{4+} , Al^{3+} , Fe^{3+} , Fe^{2+} , Mg^{2+}) se logent dans les cavités des tétraèdres et des octaèdres.

La bentonite c'est un phyllosilicate 2:1 (famille de smectites) dans laquelle la charge négative de la couche est électriquement équilibrée par une charge égale, des cations échangeables (Ca, Mg, H⁺, K⁺, NH⁺ et Na⁺) situées principalement entre ces couches silicates ; ces cations ne font pas partie de la structure et garde une certaine mobilité.

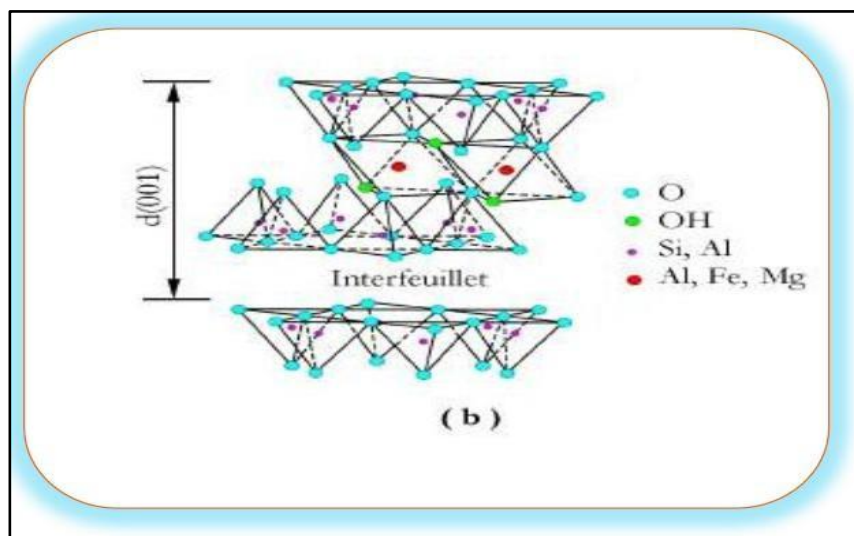


Figure I.8 : Structure de la bentonite

I.5. Principales caractéristiques des minéraux argileux

I.5.1. La densité de la charge spécifique :

La densité σ est définie par le rapport entre la capacité d'échange cationique, CEC et la surface spécifique S de la particule argileuse :

$$\sigma(\text{meq/m}^2) = \frac{\text{CEC}}{S} \quad (\text{I.3})$$

Deux types de charge existent dans les milieux argileux :

Une charge permanente ou structurale liée aux substitutions ioniques (Al^{3+} pour Si^{4+} dans la couche tétraédrique; Mg^{2+} ou Fe^{2+} pour Al^{3+} dans la couche octaédrique), une charge de

surface variable selon le PH du milieu liée aux réactions chimiques qui se produisent à la surface des minéraux.

La densité de charge spécifique renseigne sur le pouvoir de la particule à repousser les autres, cette répulsion étant la capacité de gonflement des minéraux argileux. L'augmentation de la densité de charge spécifique réduit le gonflement ou la pression de gonflement des matériaux argileux. Cette augmentation entraîne l'attraction des ions, ce qui va provoquer une condensation de la double couche, donc une diminution de son épaisseur. (Lefevbre et Lajudie, 1999),(cité par Allam, 2011).

I.5.2 .La forme des particules argileuses

Les argiles se présentent sous trois formes :

✓ *En forme de flocons*

Elles sont caractérisées par une même dimension dans les deux directions, ainsi qu'une épaisseur équivalente à 1/20ème de leur longueur.

✓ *En forme de lattes*

Cette forme d'argile possède une dimension plus longue, ainsi qu'une épaisseur équivalente à 1/20ème de la longueur.

✓ *En forme d'aiguilles*

Ce type est de forme est très rare. Les particules présentent deux dimensions similaires avec latroisième dimension qui est beaucoup plus grande. La Figure II.19 montre les différentes formes des particules d'argiles.

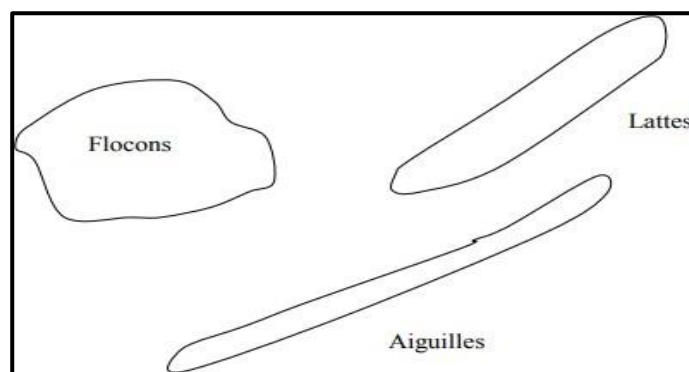


Figure I.9 : Les différentes formes des particules argileuses (Velde, 2013)

I.5.3 .La surface spécifique des particules argileuses

Les argiles sont composées de la surface externe comprise entre les particules et la surface interne correspondante à l'espace interfoliaire. L'augmentation de la surface spécifique donne un pouvoir de gonflement plus important et par conséquent un potentiel de gonflement plus élevé (Wakim.J, 2005). Le tableau I.1 donne les valeurs caractéristiques des surfaces des grandes familles argileuses.

Cette caractéristique est très importante, qui définit le comportement mécanique des particules argileuses. D'après ce tableau, nous pouvons constater que les montmorillonites possèdent une grande surface spécifique, ce qui leur approprient par conséquent un gonflement d'autant plus important en comparant avec d'autres argiles, à l'instar des kaolinites qui possèdent une faible surface spécifique.

Tableau I.1. La surface spécifique des particules argileuses (Eslinger et Peaver, 1988).

Type d'argile	Surface spécifique (m ² /g)		
	Interne	Externe	Total
Kaolinite	0	15	15
Illite	5	25	30
Chlorite	0	15	15
Vermiculite	750	<1	750
Montmorillonite	750	50	800

I.5.4. Les propriétés colloïdales

Les propriétés colloïdales de l'argile sont dûes à la présence de charge négative à la surface des particules, engendrant des forces de répulsion entre elles. Une grande importance est attribuée à la colloïdalité pour la purification des argiles, car celle-ci nous permet d'éliminer des impuretés non argileuses de densité élevée par sédimentation (Chosset, 2005).

I.5.5. la capacité d'échange cationique (CEC)

La capacité d'échange cationique sert à mesurer la faculté d'une argile à échanger des cations. Elle est exprimée en milliéquivalent par 100 grammes d'argiles et varie dans le même sens que la densité de charge surfacique. Donc, pour les argiles ayant une valeur inférieure à 15 CEC, elles ont tendance à peu gonfler (Lefevbre et A .Lajudie, 1987).

Tableau I.2: Capacité d'échange cationique des particules argileuses (Hafsi, 1993)

Argils	CEC (meq/100gr)
Montmorillonite Na ⁺	150
Montmorillonite Ca ²⁺	80
Illite	10-40
Kaolinite	3-15

I.5.6 .Cations échangeables

Substitutions isomorphes de Al³⁺ par Mg²⁺ à la surface des feuillets entraînent un excès de charge négative. Pour assurer la neutralité, ce déficit de charge est compensé par des cations Ca²⁺ ou Na⁺. Ces cations échangeables se fixent à la surface des feuillets et assurent la liaison entre eux.

L'intensité de ces liaisons dépend de la valence de ces cations. A titre d'exemple, la valence des cations de sodium Na⁺ est plus faible que celle des cations de calcium Ca²⁺, c'est pour cette raison que la montmorillonite sodique (composée par des cations Na⁺) aura la plus grande surface spécifique, ce qui est propice à la fixation des molécules d'eau et des cations entre ces feuillets

I.6. Interactions physico-chimiques entre l'eau et l'argile

Compte tenu de la nature électrique des feuillets élémentaires ou bien la présence de cations compensateurs, des interactions physico-chimiques prennent place entre les argiles et les molécules d'eau de caractère dipolaire.

Différents phénomènes d'interactions vont pouvoir s'établir, entre les feuillets chargés négativement et l'eau située dans l'espace inter-foliaire ou adjacent à la surface externe d'une particule. Ces phénomènes sont multiples, tels que les liaisons d'hydrogènes, les forces

d'attraction de Van der Waals ainsi que l'hydratation des cations échangeables (Mitchell et Soga, 2005).

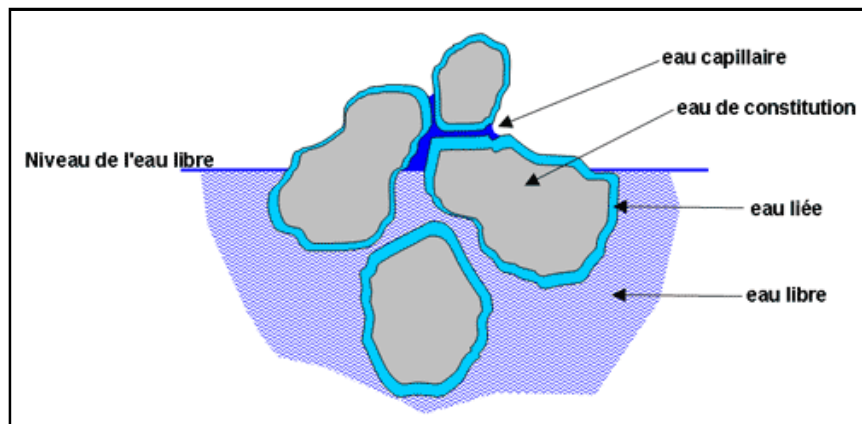


Figure I.10 : Les différents types d'eau dans le sol (Lefèvre, 2015)

Source: http://tice.inpl-nancy.fr/modules/sciences_techniques/Proprietes-Meca-Sols/chap7/formes.html

I.6.1. Les liaisons d'hydrogènes

Ces liaisons se développent entre les molécules d'eau et les hydroxyles situés à la surface des feuillets. En effet, les atomes d'oxygènes sont susceptibles d'attirer les pôles positifs des molécules d'eau, de la même manière que les groupements hydroxyles attirent le pôle négatif d'eau (Menad, 2008).

I.6.2. Les forces d'attraction de Van der Waals

Les charges négatives situées sur les surfaces des feuillets argileux, manifestent leurs attractions sur les molécules d'eau, engendrant la naissance des liaisons électrostatiques de type Van der Waals qui sont connues par leur forte attractivité. Pour deux atomes, ces forces sont proportionnelles à l'inverse de la puissance septième de la distance d_a qui les sépare, comme l'illustre l'équation suivante (Menad, 2008):

$$F = K (d_a)^{-7} \quad (\text{I.4})$$

Avec :

F : la force de Van der Waals ; K: une constante ; d_a : la distance qui sépare deux atomes.

I.7. Gonflement des sols argileux

Le phénomène de gonflement dépend des caractéristiques minéralogiques du matériau argileux et de la nature de la solution d'hydratation.

Il s'agit de l'adsorption de molécules d'eau sur la surface externe de la particule d'argile. Lors d'une hydratation inter-particulaire, les changements de volume qui s'ensuivent sont généralement faibles. On distingue deux types de gonflement, un gonflement intra-particulaire (interfoliaire) et un gonflement interparticulaire (Mouroux et al. 1988); (Popescu 1986) (Figure I 11 et I 12).

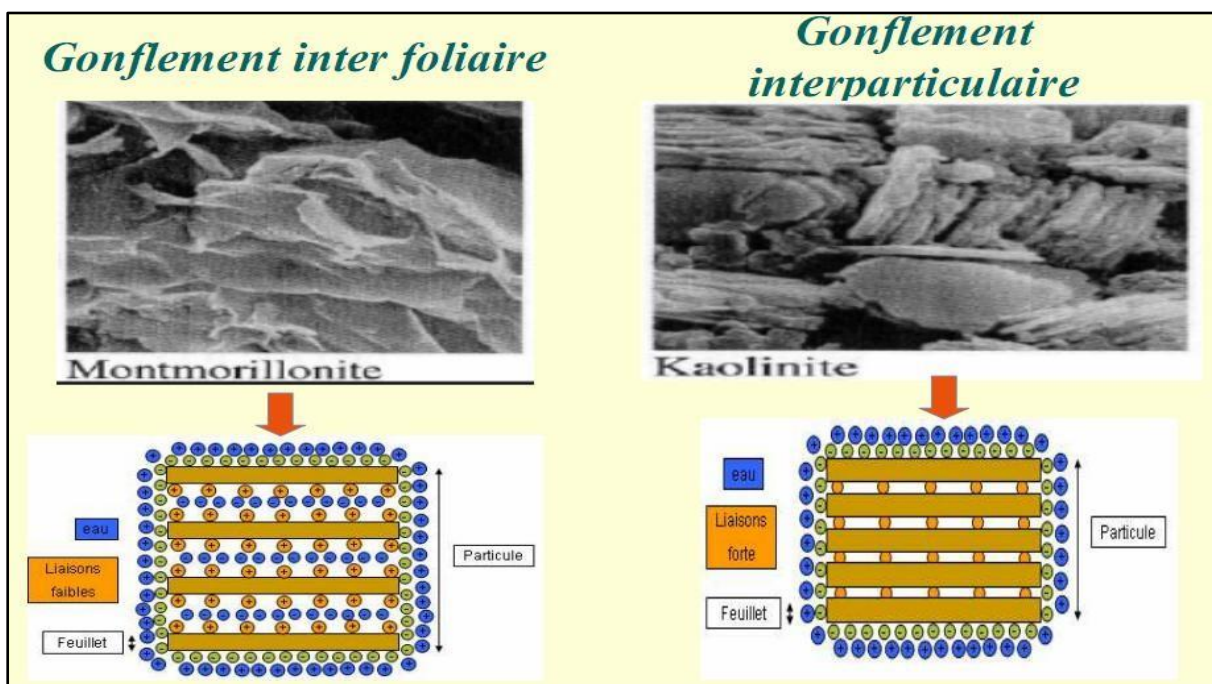


Figure I.11: types de gonflements

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 parce qu'il s'entoure de molécule d'eau. Il en résulte une augmentation de la distance inter-foliaire et par voie de conséquence un affaiblissement de la liaison entre les feuillets. Ce qui permet à d'autres molécules d'eau de s'immiscer entre les feuillets d'une même particule, c'est l'adsorption interfoliaire.

On divise le gonflement en un gonflement primaire et un gonflement secondaire (Holtz et Gibb, 1956), (Chen 1988), la figure I.13 représente la variation relative de la hauteur

d'échantillon en fonction du logarithme du temps, dans laquelle on distingue les deux phases de gonflement :

- Gonflement primaire: qui prend place très tôt, sa fin est caractérisée par un point d'inflexion permettant le changement de l'allure de la courbe.
- Gonflement secondaire: qui est caractérisé par la portion linéaire de la courbe.

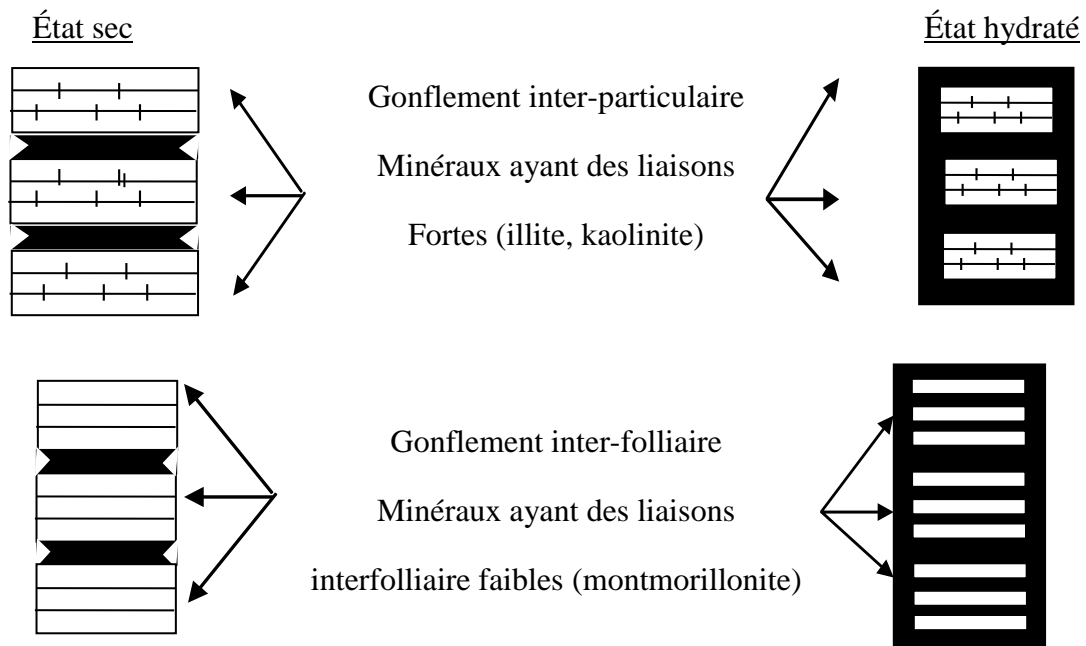


Figure I.12: Mécanismes de gonflement des argiles par hydratation. Bouzid. (1997) ; Bengraa (2004) et Gueddoudda (2005).

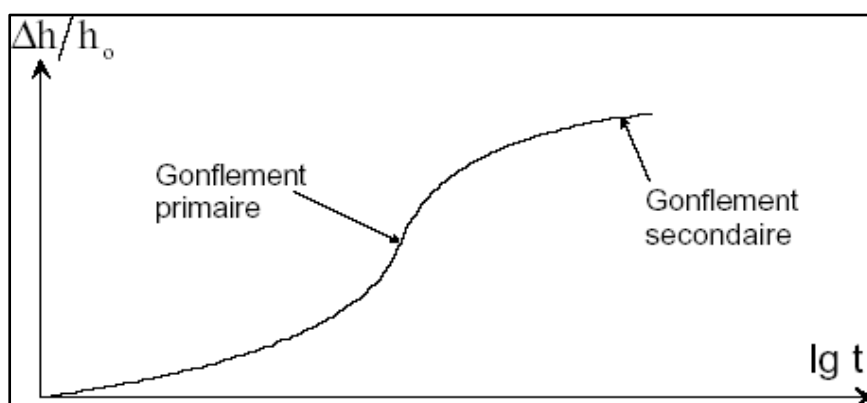


Figure I.13 : Courbe du gonflement en fonction du temps (Chen, 1988)

I.7.1.L'hydratation des cations échangeables

D'après Fripiat et Gattineau (1984), les cations présents dans l'espace inter-foliaire deviennent des sites privilégiés sur lesquels viennent se fixer les molécules d'eau. La Figure I.14, présente les trois modes de liaisons possibles de l'eau inter-foliaire (Morel, 1996 ; Menad, 2008).

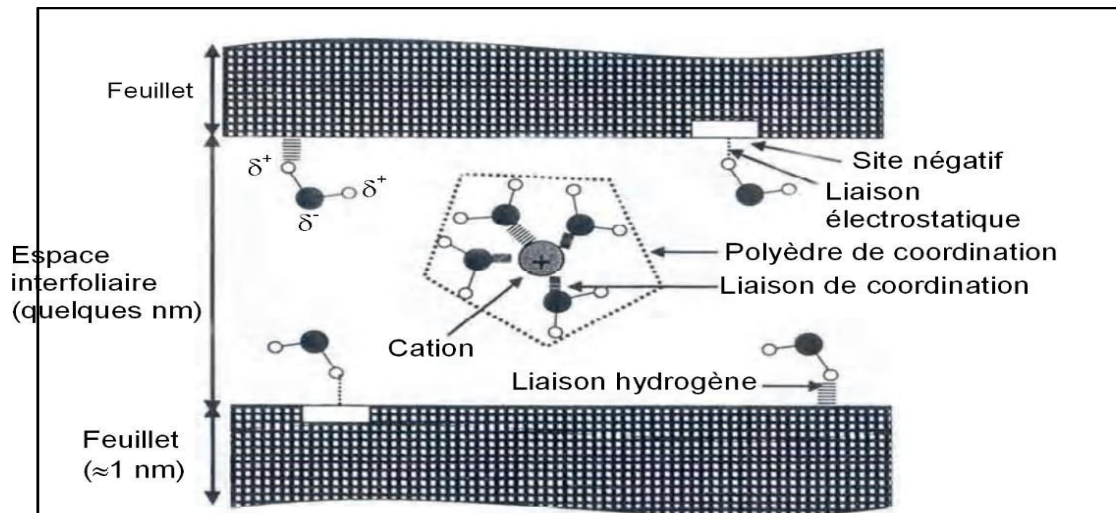


Figure I.14 : Les liaisons possibles de l'eau inter-foliaire (Morel, 1996)

I.8 .La double couche diffuse (DDL)

Le modèle de la double couche diffuse est distingué selon la littérature, comme étant une interaction entre les particules d'argiles chargées négativement et le fluide composé d'eau et des ions en solution (Figure I.15a). La concentration en cations diminue avec la distance de la surface des particules (Figure I.15b).

La double couche se compose d'une couche interne ou une couche de Stern, contenant des dipôles d'eau orientés à la surface et d'une couche externe diffuse ou couche de Gouy (figure I.16), où les cations subissent un équilibre entre la force électrostatique et la diffusion.

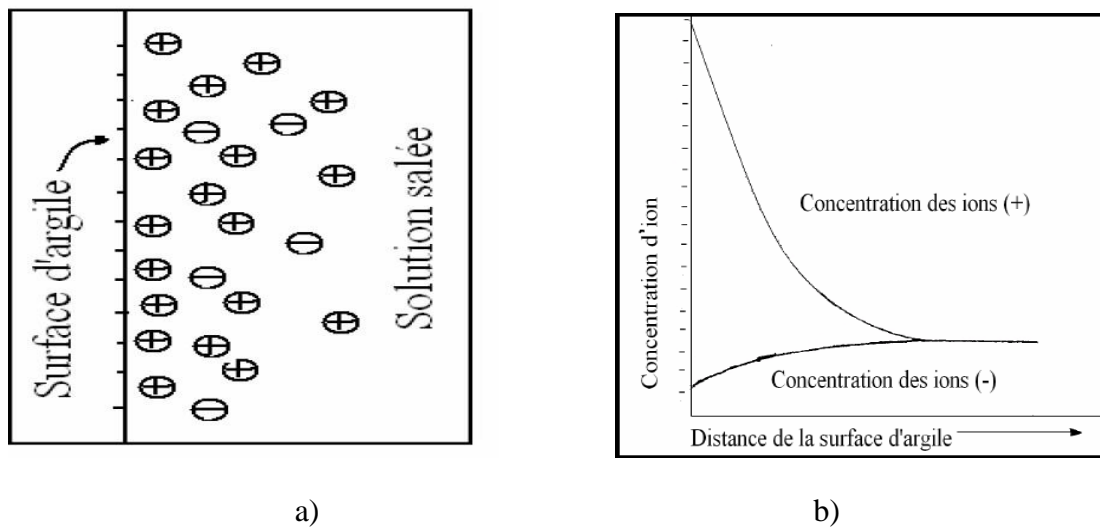


Figure I.15: a) Structure de la double couche électrique diffuse (DDL) adjacente à une surface d'argile et b) répartition potentielle des cations et des anions à partir de la surface de l'argile (Alshawabkeh, 2001).

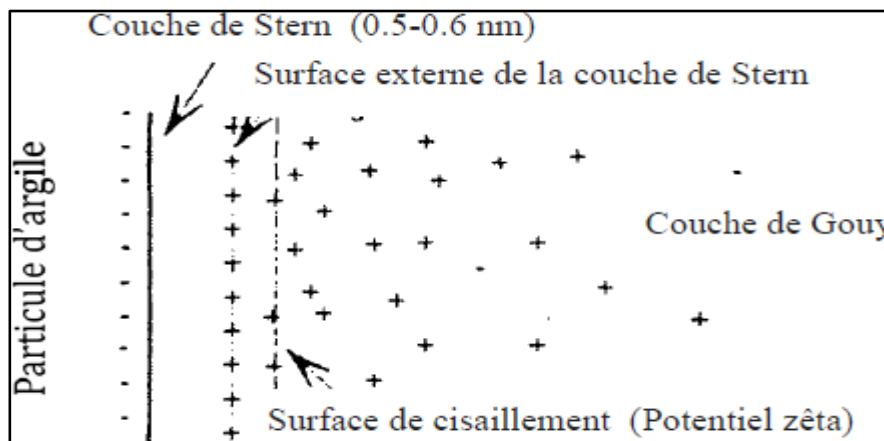


Figure I.16 : Modèle de la double couche de Gouy- Stern (1910-1924)

I.9. Conclusion

Nous avons expliqué dans ce chapitre les propriétés physico-chimique des minéraux qui confèrent des caractéristiques intrinsèques bien spécifiques au argiles notamment ceux qui causent le gonflement des sols .

Chapitre II : Causes et conséquences du gonflement

II.1. Introduction

Le phénomène du gonflement des sols a été connu pour environ aussi longtemps que le domaine de la géotechnique a été pratiqué. Pendant que la construction croissait dans des régions arides et humides, les problèmes associés au gonflement et aux sols craintifs ont commencé à susciter plus d'attention

Le gonflement de sols ou de certaines roches sédimentaires cause de nombreux dommages pour les ouvrages en surface et en souterrain; constitue un phénomène très important en géotechnique.

Ce phénomène, qui est prépondérant dans les matériaux argileux se déclenche lorsque ces derniers sont mis en contact avec l'humidité. Le gonflement est généralement accompagné d'un changement des caractéristiques mécaniques et physico-chimiques de la roche qui peut avoir une influence sur la durée de vie de l'ouvrage, ces conséquences sont nombreuses et dépendent principalement de chaque type d'ouvrage.

II.2. Conséquence du gonflement

La pathologie dépend du type d'ouvrage ; les constructions apportant de faible contrainte sur le sol support sont généralement les plus affectées par les désordres provoqués par le gonflement.

II.2.1. Cas des bâtiments

Les bâtiments et particulièrement les maisons individuelles construits sans précautions sur des sols gonflants présentent souvent des fissures de dégradation telles que fissures des murs porteurs, voire des murs de remplissage, bombement de l'éventuel radier, etc. qui conduisent parfois à l'instabilité générale du bâtiment par rupture ou déboisement de ses éléments porteurs.

Ces désordres résultent du caractère différentiel que prennent les mouvements du sol de fondation (tassement ou gonflement) sollicitant la structure en flexion ou en cisaillement (Figure II-1). Ces différences relatives de mouvement proviennent par ailleurs de l'hétérogénéité des sols de fondation, de celle des forces appliquées par la structure sur le sol, ainsi que des perturbations hydriques que le bâtiment peut engendrer (Mouroux et al ; 1987).

La (Figure II-2) illustre différents types de dégâts causés à un bâtiment qui repose sur un sol sujet au gonflement ou au retrait.

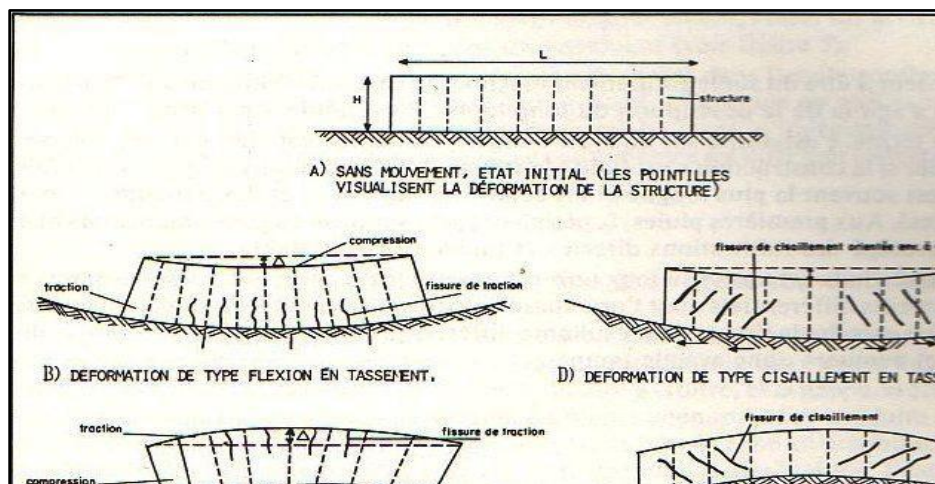


Figure II.1 : Formes de Dégâts Sur des Bâtiments Reposant Sur des Terrains gonflants ,
(Mouroux et al, 1988).

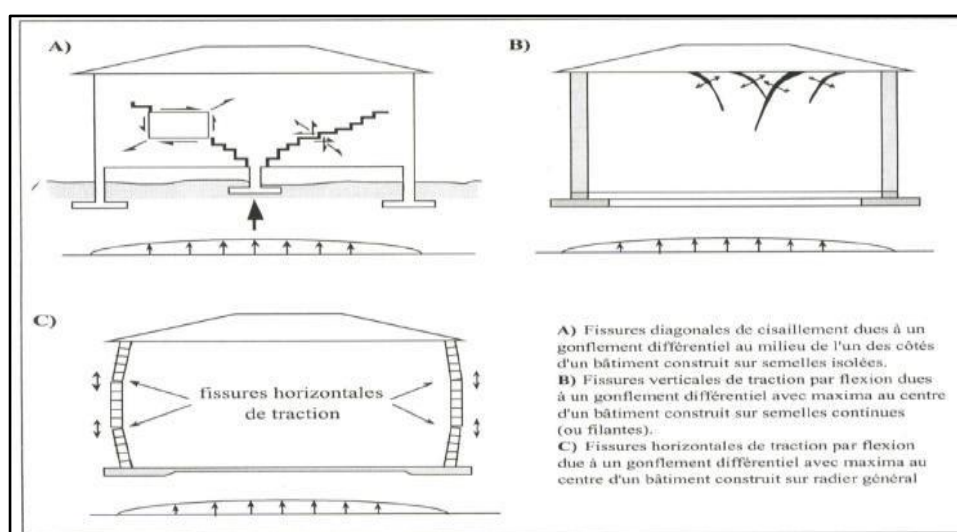


Figure II.2 : Formes et Directions de Fissuration, (Mouroux et al, 1988).

II.2.2.Cas des chaussées :

Le gonflement peut provoquer des désordres importants à la structure de la chaussée (Dégradation des routes). Ce phénomène est causé par des variations de teneur en eau du sous sol .d'après Jennings (1962) il peut être attribue au climat et a la surcharge.

Autre désordres provoqués par se phénomène :

- Distorsion des portes et fenêtres ;
- Dislocation des dallages et des cloisons ;
- Rupture des canalisations enterrées ;
- Dés encastrement des éléments de charpente ou de chainage ;
- Décollement des éléments composites (carrelage, plâtre,...).



Figure II.3 : Désordres due au gonflement
(Photo prise à Tizi-Ouzou)



Figure II.4 : Fissure sur les murs
(Zenk,2010)



Figure II.5 : Fissure longitudinales sur routes

II.2.3.Cas des travaux souterrains

Les travaux souterrains situés en terrain gonflant (principalement les tunnels) ont souvent posé des difficultés très importantes, aussi bien lors de leur construction qu'après leur mise en service. D'une manière générale, les désordres rencontrés résultent d'une augmentation de contraintes sur les parois de l'ouvrage, induite par le gonflement des terrains encaissants.

Les désordres caractéristiques qui affectent le plus souvent les tunnels localisés dans un milieu gonflant sont les suivants (Robert et Fabre, 1987) :

- Soulèvement puis dislocation du radier (Figure I-6),
- Bombement et convergence des pieds-droits.
- Pincement de la voûte en clé.



Figure II.6 : Soulèvement puis dislocation du radier d'un tunnel

II.2.4.Cas des voiries et réseaux divers

Les dommages touchent également les voiries et les réseaux divers. Les réseaux de drainage peuvent par exemple subir des inversions de pente qui provoquent le débordement des drains alimentant de cette façon le phénomène de gonflement, (Mouroux et al, 1987).

Les routes non conçues pour les sols gonflants peuvent facilement être détruites par enchainement des phénomènes d'évaporation de l'eau, de retrait des sols, de fissuration puis d'infiltration de l'eau à travers les fissures, puis de gonflement plus en profondeur, etc....

II.3.Causes du gonflement

Le caractère gonflant de certaines argiles est lié en premier lieu à leur composition minéralogique. D'autres facteurs tels que la structure du sol, sa densité, sa teneur en eau initiale peuvent affecter de manière significative la pression de gonflement ou la déformation de ces argiles.

Pour que le gonflement d'un sol se produise, il faut que des « minéraux expansifs » puissent entrer en contact avec de l'eau. En effet toutes les observations ayant portées sur les conséquences présumées du gonflement d'un sol, qu'il s'agisse de la construction de tunnels, d'habitats ou de voiries, ont abouti à la formation de cette équation de base :

$$\text{« Minéraux expansifs + eau = gonflement »}$$

on cite ci-après quelques causes provoquant le gonflement des terrains

- L'ouvrage est construit dans une région à saison constatées (saison sèche- saison humide, en région tropicale par exemple).
- Des canalisations sont rompues ce qui fait que l'eau s'infiltré dans les terrains gonflant.
- La construction d'un ouvrage proche perturbe l'écoulement des eaux souterraines.
- Des travaux de drainage contribuent au retrait des sols gonflants.
- Des mesures d'imperméabilisation ne sont pas prises, ce qui contribue à rendre les terrains sensibles aux variations saisonnières (alternance saison sèche- saison humide).
- L'évacuation ou l'évaporation de l'eau contenue dans les sols gonflants est brusquement empêchée alors que les apports d'eau à ses sols ne sont pas limités, ce qui a pour effet d'augmenter leur teneur en eau (ex : la construction d'un bâtiment supprime l'évacuation de l'eau contenue dans un sol de fondation).

II.4. Mécanisme de gonflement

Le gonflement d'une argile est le résultat d'une introduction de molécules d'eau entre les feuillets. Il est évident que la molécule d'eau ayant une distance interfoliaire supérieure à $3A^\circ$ (dimension de la molécule d'eau), son accès est possible. De ce fait ; les forces d'attraction entre les feuillets sont alors affaiblies du fait de sa présence, et ont des tendances à s'éloigner les unes des autres en augmentant l'espace interfoliaire, qui provoque par conséquent le phénomène de gonflement.

Les mécanismes de gonflement des argiles ont fait l'objet de nombreuses hypothèses, Terzaghi (1948) et Bolt (1956) ont subdivisé le phénomène de gonflement en deux processus distincts, l'un mécanique et l'autre physico-chimique. Par ailleurs certains auteurs ; Van Olfen, (1977) ; considère que le gonflement des sols peut être assimilé à un processus d'hydratation des particules argileuses .

II.4.1. Le Gonflement au sens physico-chimique

le gonflement résulte de forces de répulsion qui s'exercent entre les particules argileuses, entraînant une augmentation de volume à mesure que la teneur en eau augmente. Le gonflement des particules argileuses, à l'échelle microscopique, est directement lié à leurs propriétés minéralogiques, électrochimiques et à leurs surfaces spécifiques qui varient d'une famille d'argiles à l'autre D'après Morel (1996) et Mouroux *et al.* (1988), le phénomène de gonflement paraît relever de deux causes (Figure II.7):

- l'hydratation des espaces interfoliaires, entraînant une augmentation de la porosité interfoliaire (gonflement interfoliaire ou gonflement cristallin),
- la répulsion entre les particules, soit l'augmentation de la porosité interfoliaire et interparticulaire pouvant affecter toutes les argiles (gonflement interparticulaire ou gonflement osmotique).

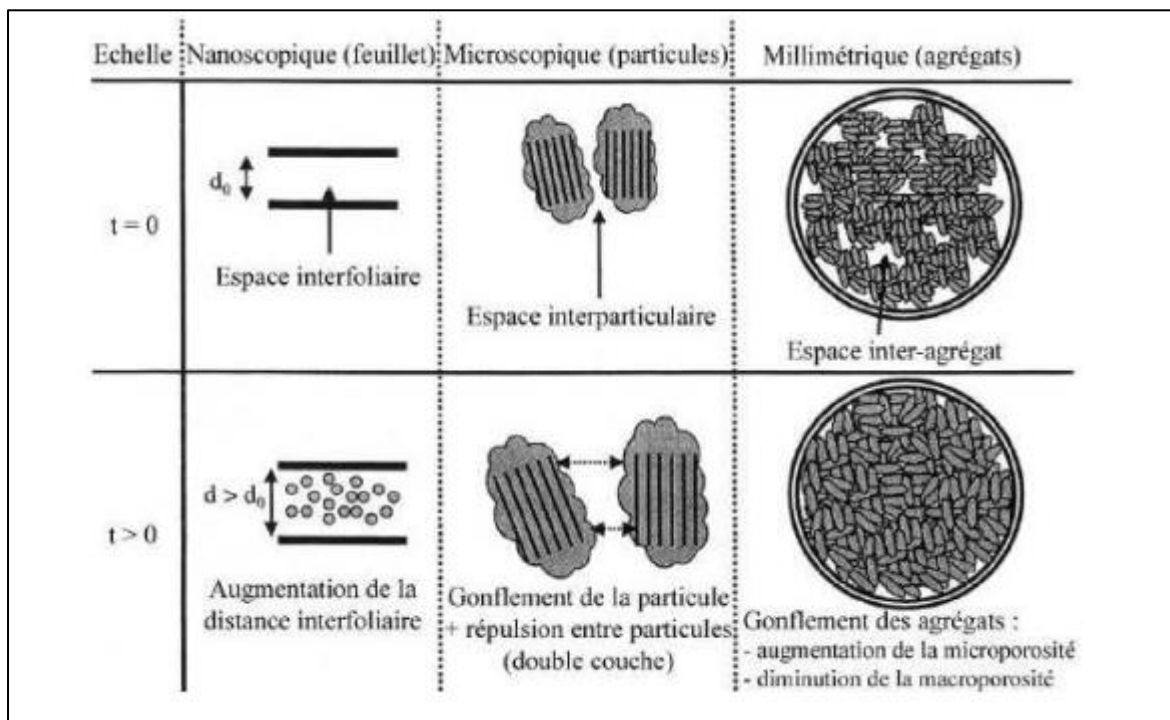


Figure II.7 : Mécanismes des causes de gonflement (Gens et Alonso, 1992)

II.4.1.1. Hydratation des espaces interfoliaires

Ce gonflement n'est possible que lorsque les liaisons interfeuillettes sont très faibles pour laisser pénétrer l'eau dans l'espace interfoliaire. C'est le cas par exemple de la montmorillonite. Le phénomène de gonflement est influencé par la nature des cations interfoliaires. Ainsi la montmorillonite sodique (Na^+) gonfle plus qu'une montmorillonite calcique (Ca^{2+}) (Dardaine *et al.*, 1985; Saiyouri, 1996). En effet, le rayon ionique de Na^+ est plus proche de la taille de la molécule d'eau et son interaction avec cette dernière est plus faible que pour le cation Ca^{2+} . L'eau se répartit alors plus facilement à la surface du feuillet. Dans les argiles illitiques, le gonflement cristallin est très faible et il est quasiment inexistant dans les kaolinites.

D'après Tessier (1990), ce type de gonflement ne représente environ que le dixième du gonflement macroscopique total d'une argile gonflante. Il est donc nécessaire selon lui d'envisager un autre mécanisme de gonflement que celui relevant uniquement des seules variations interfoliaires.

II.4.1.2. Répulsion entre les particules

Généralement la particule d'argile possède normalement une charge négative, et afin que l'ensemble eau-argile acquière l'électro-neutralité, des cations sont attirés à la surface de la particule d'argile. Cependant cette attraction est contrariée par la tendance des ions (cations et anions) à diffuser et à se distribuer d'une manière homogène dans l'eau. Le résultat de ces deux influences est un nuage d'ions entourant la particule.

En effet, dans une argile sèche, les cations sont fortement adsorbés à la surface des feuillets argileux. Les cations en excès, par rapport à ceux assurant l'électroneutralité des particules argileuses et des anions associés, sont présents sous forme de sels. Si l'argile sèche est placée au contact de l'eau, les sels se dissolvent dans la solution, mais les différents ions se répartissent de manière non homogène : la concentration en cation devient plus forte au voisinage des surfaces externes des argiles, tandis que les anions ont plutôt tendance à s'éloigner des surfaces argileuses. La zone perturbée, ainsi créée par cette répartition non homogène des cations et des anions, est appelée la double couche diffuse. Cette dernière assure l'électroneutralité du système entre la particule d'argile et la double couche diffuse du modèle de Stern (voir chapitre I§I.8), (figure I.16)

Compte tenu de la structure ionique présentée précédemment, il apparaît d'importantes interactions physico-chimiques entre une particule argileuse et l'eau, généralement illustrées par le modèle de la double couche. Avec des hypothèses très précises, cette théorie permet de quantifier le phénomène de gonflement par rapport aux différents paramètres de l'eau.

II.4.2. Le Gonflement au sens mécanique

Le phénomène de gonflement, de même que le tassement, peut provenir d'une modification de l'état de contraintes dans le sol en présence d'eau. Un sol est constitué de 3 phases : une phase solide (les particules solides), une phase liquide (eau interstitielle en général) et une phase gazeuse (bulles d'air). Le sol est saturé si la phase gazeuse disparaît, c'est-à-dire si tous les vides inter-particulaires sont occupés par l'eau interstitielle. Considérons ici un élément de sol saturé à l'équilibre. Dans un sol saturé soumis à une contrainte totale σ (géostatique ou surcharge extérieure σ_e), cette dernière se décompose de la façon suivant

$$\sigma_e = \sigma = \sigma' + u \quad (\text{Théorie de Terzaghi, 1951}) \quad (\text{II.1})$$

u : pression interstitielle de l'eau des pores

σ' : la contrainte effective

Dans le cas où l'élément de sol considéré est situé sous la nappe phréatique à une cote z , la pression interstitielle est égale à la pression exercée par la colonne d'eau sus-jacente, soit

$$u_0 = \gamma_w \cdot z. \quad (\text{II.2})$$

Si l'on permet alors au sol de se drainer, un phénomène de consolidation va se développer, correspondant à l'expulsion de l'eau en surplus. Un nouvel équilibre va alors s'établir pour l'état de contraintes, avec : $u_0 = 0$ et $\sigma' = \sigma_e$

Dans un milieu poreux, l'existence conjointe d'une phase gazeuse et liquide provoque le développement de ménisques capillaires air-eau. Le développement de ces ménisques dans la structure du sol est la caractéristique principale d'un milieu non saturé (Delage et Cui, 2000), et traduit une pression négative de l'eau appelée succion. Si la contrainte σ_e est alors supprimée, le même phénomène se produit en sens inverse, et immédiatement : $u = -\sigma_e$ et $\sigma' = \sigma_e$

La pression interstitielle u devient négative (succion négative) et opposée à la variation de contrainte totale. Dans des conditions de libre circulation de l'eau, un phénomène de gonflement va alors se développer, exprimant l'absorption de l'eau et le transfert d'une contrainte négative de l'eau sur le squelette solide, jusqu'à l'état final où : $u = 0$ et $\sigma' = 0$

Il est donc possible d'affirmer que si la consolidation exprime une diminution de la pression interstitielle jusqu'à u_0 , le gonflement exprime quant à lui la diminution de la succion ($-u$) jusqu'à son annulation. La succion capillaire du terrain s'exprime alors par la relation suivante :

$$S = u_a - u_w \quad (\text{II.3})$$

u_a : la pression de l'air dans le sol et u_w , la pression interstitielle de l'eau dans le sol.

II.6- Conclusion :

Les matériaux argileux, que ce soient les sols ou les roches, sont très fréquents et couvrent une partie considérable de l'écorce terrestre.

La maîtrise du phénomène de gonflement demande de grandes connaissances afin de minimiser les dégâts occasionnés par ce phénomène sur les différents ouvrages construits sur les sols gonflants.

Après cette brève présentation des conséquences du gonflement sur les comportements des ouvrages géotechniques, il est préférable de présenter les différents mécanismes induisant et influençant ce phénomène.

Chapitre III : Méthodes de stabilisation des sols argileux .

III.1.Introduction

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

- ✚ Stabilisation mécanique (compactage, substitution ; ajout de sable etc....).
- ✚ Stabilisation chimique (par ajout de matériaux comme les sels, le ciment, la chaux, cendres volantes, etc...).

Dans cette partie de la recherche bibliographique consacrée à la présentation de quelques résultats obtenus par différents chercheurs dans le domaine de la stabilisation des sols gonflants.

III.2. Stabilisation mécanique

III.2.1. Méthode de compactage

Le compactage est l'ensemble des mesures prises pour augmenter la densité apparente sèche du sol traité. Ce qui conduit à réduire son volume apparent (par diminution de l'indice des vides). Cette densification conduit aux conséquences :

- ✓ **La première :** atteindre une bonne compacité c'est limiter au maximum les tassements
- ✓ **La deuxième:** la diminution de la perméabilité de la couche traitée afin de s'opposer à l'écoulement de d'eau,
- ✓ **Une troisième :** possible du compactage est l'amélioration des caractéristiques mécaniques qui en résultent généralement : portance et module de déformation, résistance à la compression et au poinçonnement, résistance au cisaillement.

Pour les sols argileux, l'augmentation de compacité peut à des teneurs en eau élevées, entraîner une diminution brusque de la portance et du module de déformation. Cette hypothèse a été illustrée par des chercheurs qui ont émis des conditions pour le choix du méthode de compactage :

- Dawson et Chen (1988) cité par Bengraa (2004) recommandent de compacter les 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 lorsqu'elle est compactée à une basse densité et à une grande teneur en eau.
- Seed et al (1961) cité par Bengraa (2004) notent que les argiles compactées du côté sec de l'optimum ont plus tendance à gonfler que si elles sont compactées du côté humide.

III.2.2.Méthode de substitution

Cette technique est préconisée quand pour éliminer totalement le phénomène du gonflement , pour Mouroux (1969) , deux possibilités se présentent :

- Si la couche à une faible épaisseur, il est possible de la supprimer totalement.
- Si la couche à une grande épaisseur, on ne peut envisager une suppression complète, il faut excaver jusqu'à une certaine profondeur puis remblayer avec du sable ou un autre matériau graveleux.

Mais parfois cette méthodes peut entrainer des coûts élevées dans le cas de profondeur très importante.

III.2.3. Stabilisation par ajoute de sable

Plusieurs résultats ont été obtenus , ci-joint quelques recherches faites

- **Satyanarayana (1969)**, cité par Bengraa (2004). a étudié le comportement de l'argile de Black Cotton au sud de l'Inde sous forme de mélange avec du sable, et sous forme de couches. Il a constaté que la pression du gonflement est réduite par le simple ajout de faibles pourcentages de sable. Plus le pourcentage de sable augmente, plus la réduction de la pression diminue.

- **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 suffisait pour réduire la pression de gonflement de 50% environ et que la relation qui lie le pourcentage du sable à la pression de gonflement était logarithmique.
- **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 constaté 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 des argiles gonflantes de la région d'Oran, par addition de trois types de sables (sable carrière, sable de rivière et sable de plage) à des différents pourcentages variant de 10% à 40%. Elle a montré que plus le pourcentage de sable est augmenté plus le taux et la pression de gonflement diminuent.
- **Gueddouda (2005)**, travaillant sur des argiles gonflantes de la région de Laghouat par addition de sable de dune à des différents pourcentages (15%, 30% et 45%). Il est arrivé aux mêmes constatations que *Bengraa* est que le sable de dune aussi diminue le taux et la pression de gonflement, ainsi augmentant la résistance mécanique pour des sols saturé et non saturé.
- **Hachichi et al (2009)**: ont étudié la stabilisation des deux argiles gonflantes (Sidi Chahmi et Mers El Kébir) tel que la tendance de la variation du gonflement dans le temps est la même pour tous les mélanges, car d'après les graphes, plus le pourcentage de sable augmente, plus le potentiel de gonflement diminue.(figure III.1) Il est à noter également 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 grand. Dans la première phase de gonflement, l'eau pénètre entre les particules et conduit à un relâchement des tensions dans les vides ; puisque l'argile seule est plus dense que mélangée avec le 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 par conséquent, ils favorisent le gonflement des particules d'argile dans les mélanges. En revanche, dans la deuxième phase, le potentiel de gonflement est épuisé pour les mélanges avant qu'il le soit pour l'argile seule; en effet, dans l'argile seule, l'eau continue à pénétrer entre les particules qui sont plus nombreuses tandis que, dans les mélanges, les vides créés par le sable encaissent une bonne partie du gonflement.

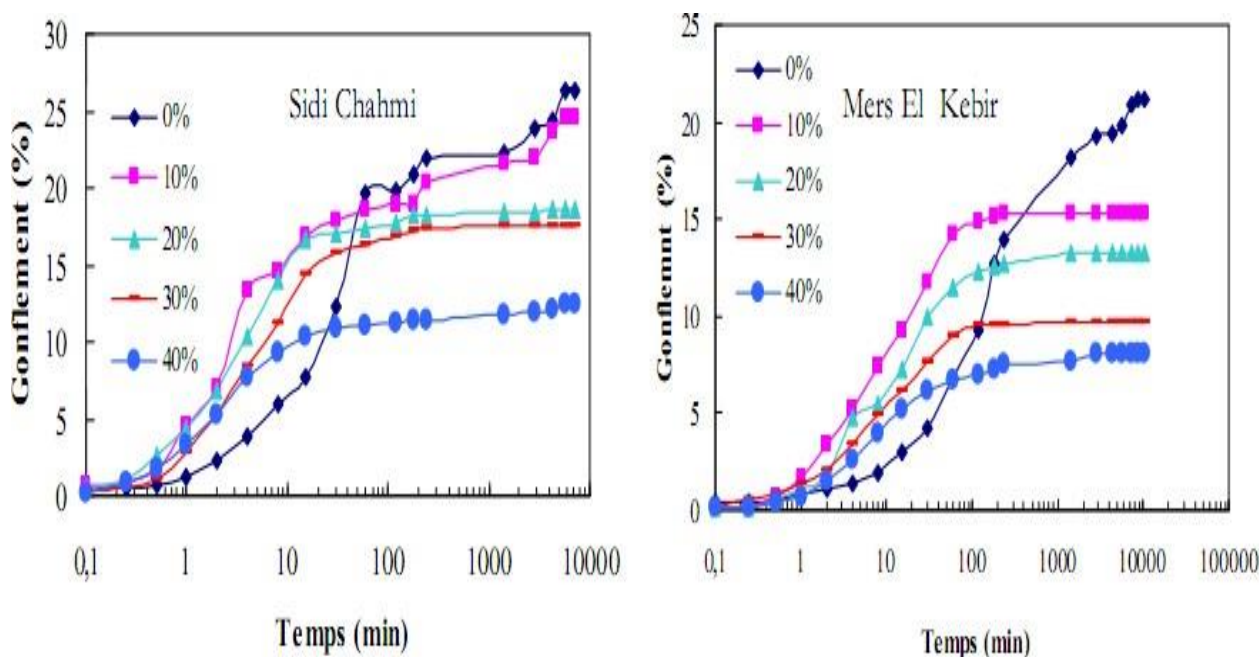


Figure III.1 : Variation du potentiel de gonflement dans le temps du mélange argile de Sidi Chahmi et Mers El Kébir + sable de rivière.

III.3. Stabilisations chimiques

III.3.1. Stabilisation par des solutions salines

Cette technique de stabilisation par ajout de sel a fait ces preuves quant à la réduction du gonflement des sols, néanmoins son application doit être envisagée avec prudence car il n'est pas impossible que les sels soient lessivés par l'eau et que leur effet finisse par disparaître.

Dans ce cas, il est en général demander de faire des études sur le sol vis-à-vis de sa perméabilité et lixiviation dans les conditions du site avant chaque cas de traitement, pour définir la nature et la concentration des solutions salines à utiliser.

➤ *Aboubekr et al. (2003)* ont étudié l'influence des sels sur le gonflement libre des argiles. L'étude a été effectuée sur des échantillons d'argiles naturelles et artificielles en utilisant quatre sels différents (chlorure de potassium, chlorure de sodium, chlorure de calcium, sulfate d'Ammonium). Des réductions importantes ont été observées par l'association d'un sel de chlorure de potassium mais pour chlorure de calcium est moyen à faible.

➤ **Hachichi (2006)**, a étudié l'influence des sels sur le potentiel de gonflement et la pression de gonflement, en utilisant les sels, le chlorure de potassium et le chlorure de calcium et le chlorure de sodium, les meilleurs résultats obtenus étaient avec le chlorure de potassium et le chlorure de calcium. En travaillant aussi sur l'effet sel + polymères sur le gonflement final et la pression de gonflement, il a montrés que son effet est plus important que celui de l'action du sel seul.

➤ **Azouz (2006)** a étudiée 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 III.2), les diverses actions des solutions salines ont conduit aux conclusions suivantes:

- Le chlorure de calcium et le chlorure de Magnésium sont plus efficaces à fortes concentrations.
- Le chlorure de potassium réduit le gonflement grâce à la fixation de ces cations entre les feuillets, le gonflement diminue et sa vitesse est rapide même à faibles concentrations.
- Le chlorure de sodium réduit lui aussi le gonflement mais à un degré faible.
- Le chlorure d'ammonium réduit moyennement le gonflement avec une forte concentration.

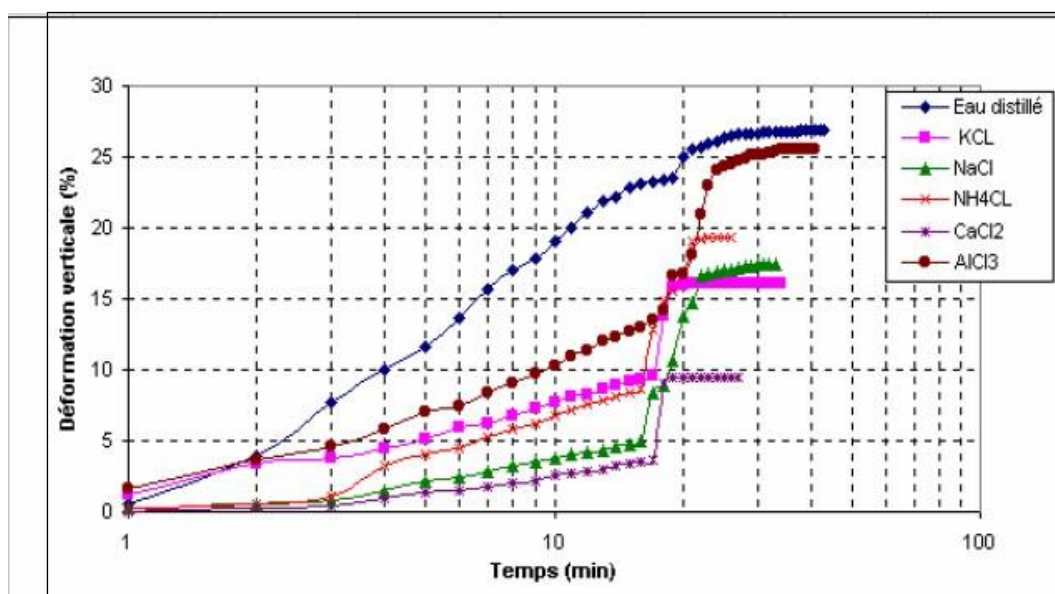
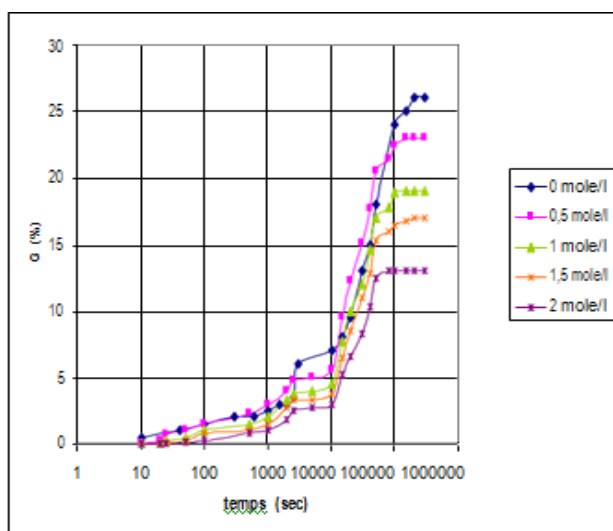
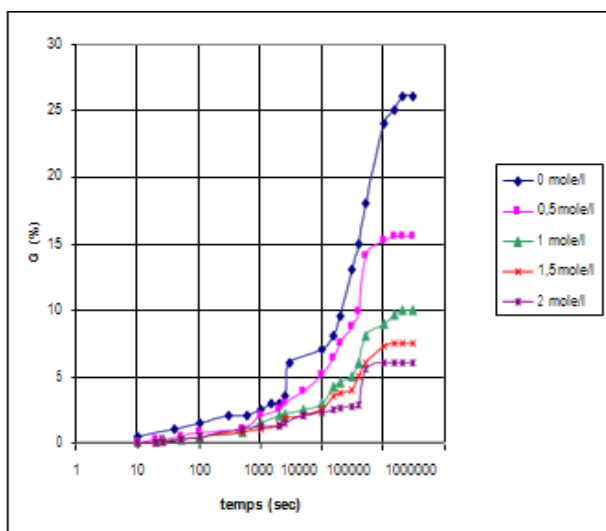


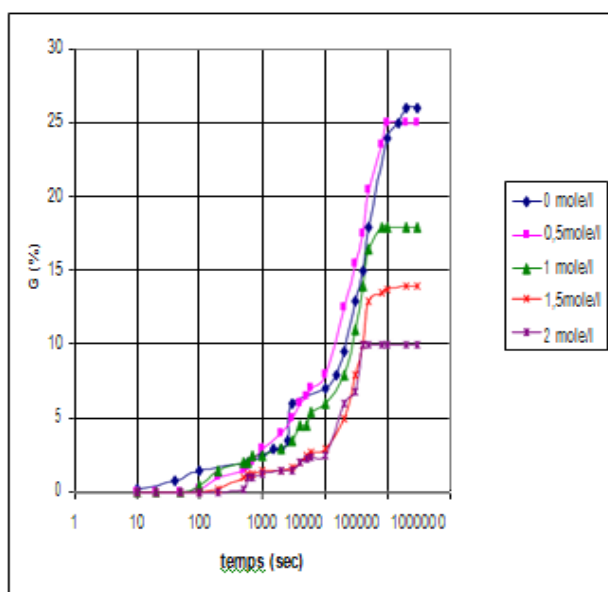
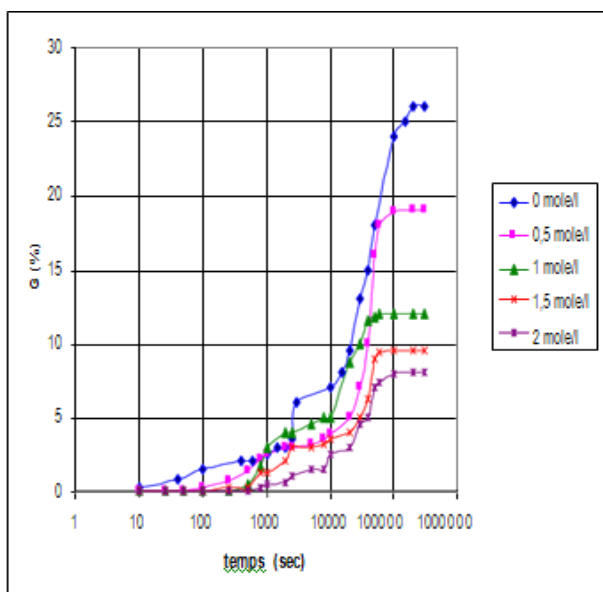
Figure III.2 : Action des différents types de sels sur le taux de gonflement Azouz (2006).

➤ **Bengueneb (2009), (Figure III.3 et III.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 qu'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 III.3).



Action de chlorure de potassium

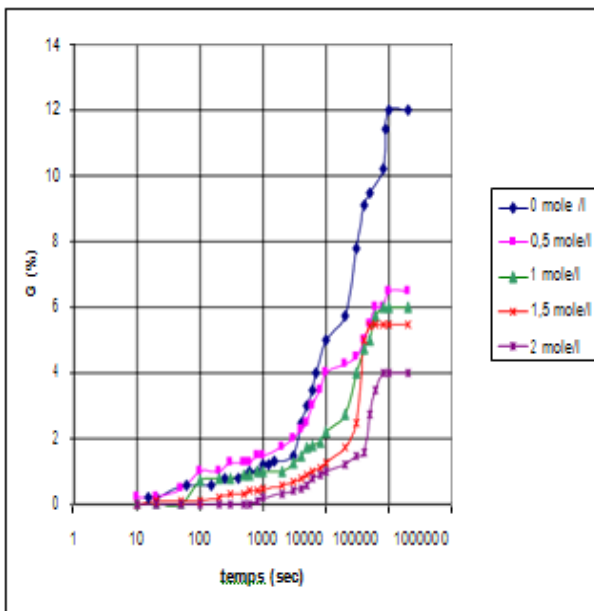
Action de chlorure de sodium



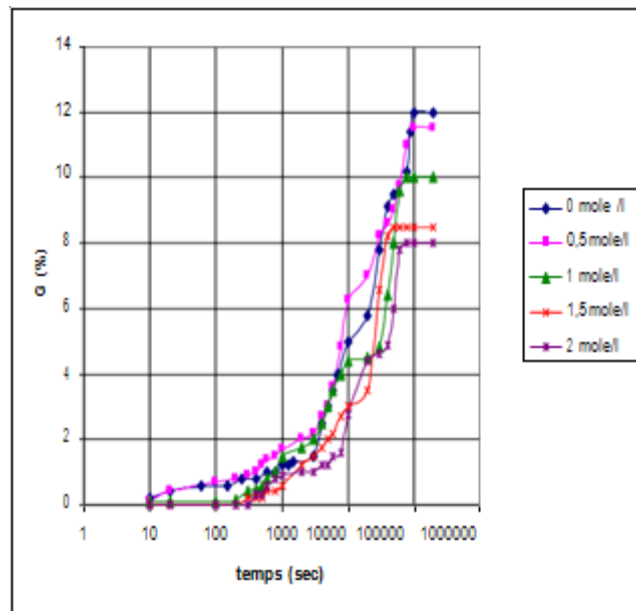
Action de chlorure de calcium

Action de chlorure d'aluminium

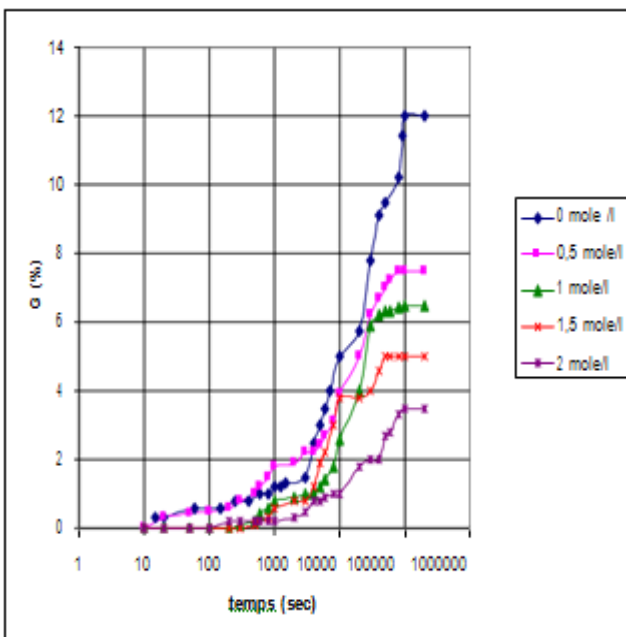
Figure III.3 : Évolution du potentiel de gonflement en fonction du temps en Présence de différentes concentrations salines la bentonite de M'zila (Bengueneb,2009)



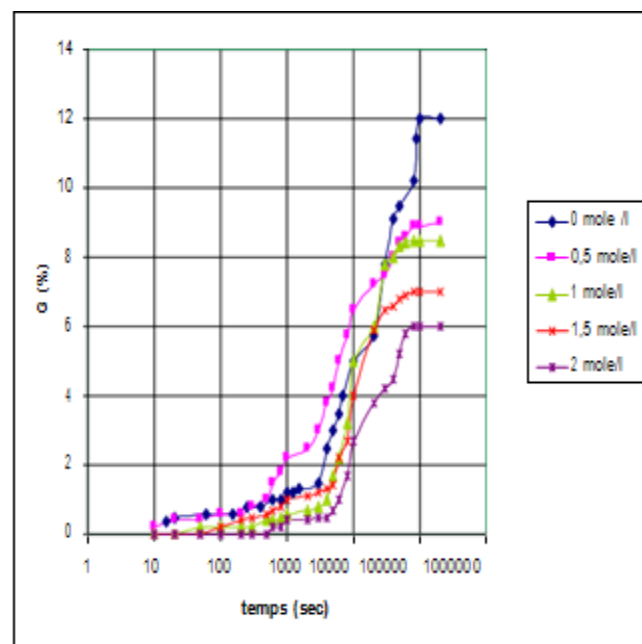
Action de chlorure de potassium



Action de chlorure de sodium



Action de chlorure de calcium



Action de chlorure d'aluminium

Figure III.4 : Évolution du potentiel de gonflement en fonction du temps en présence de différentes concentrations salines de l'argile de Bourmadia (Bengueneb,2009)

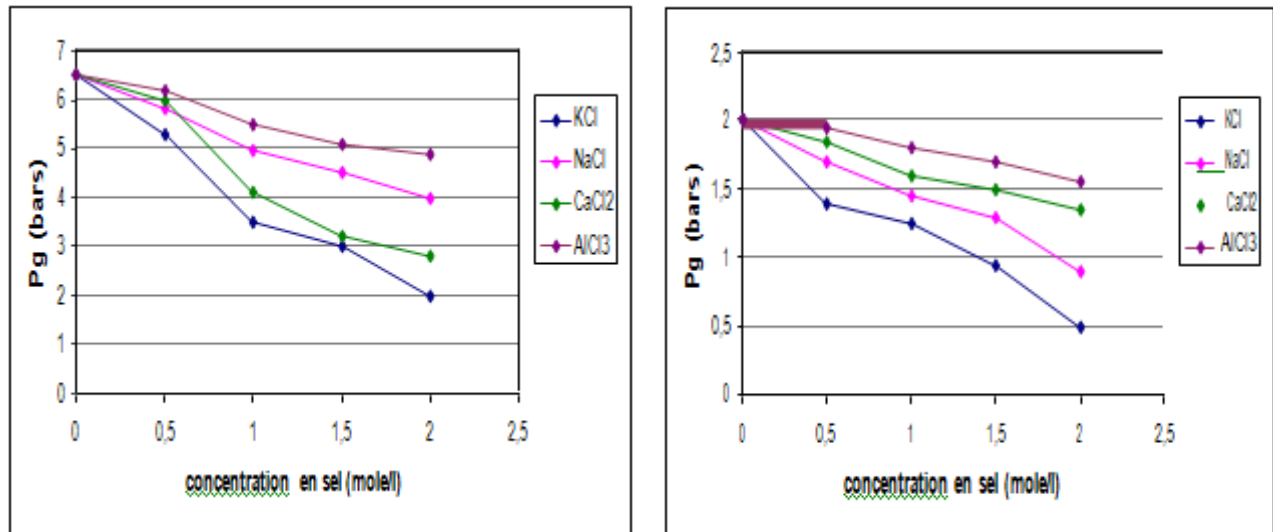


Figure III.5 : Évolution finale de pression de gonflement en fonction de différentes concentrations salines de la bentonite de M'zila et l'argile de Bourmadia.

➤ *Hachichi et al (2009)* : ont étudiés la stabilisation des deux argiles gonflantes (Sidi Chahmi et Mers El Kébir) par les sels minéraux (figure III.6): la présence des sels qui ont donné le plus grand pourcentage de réduction. est surtout observée pour de fortes concentrations en chlorure de potassium et en chlorure de calcium (66% et 52%) pour l'argile de Sidi Chahmi, (44% et 48%) pour celle de Mers El Kébir. Par contre, le chlorure d'ammonium est moyennement efficace à forte concentration pour l'argile de Sidi Chahmi (29%) et pour l'argile de Mers El Kébir (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 Kébir, respectivement, mais il a l'avantage d'être moins coûteux.

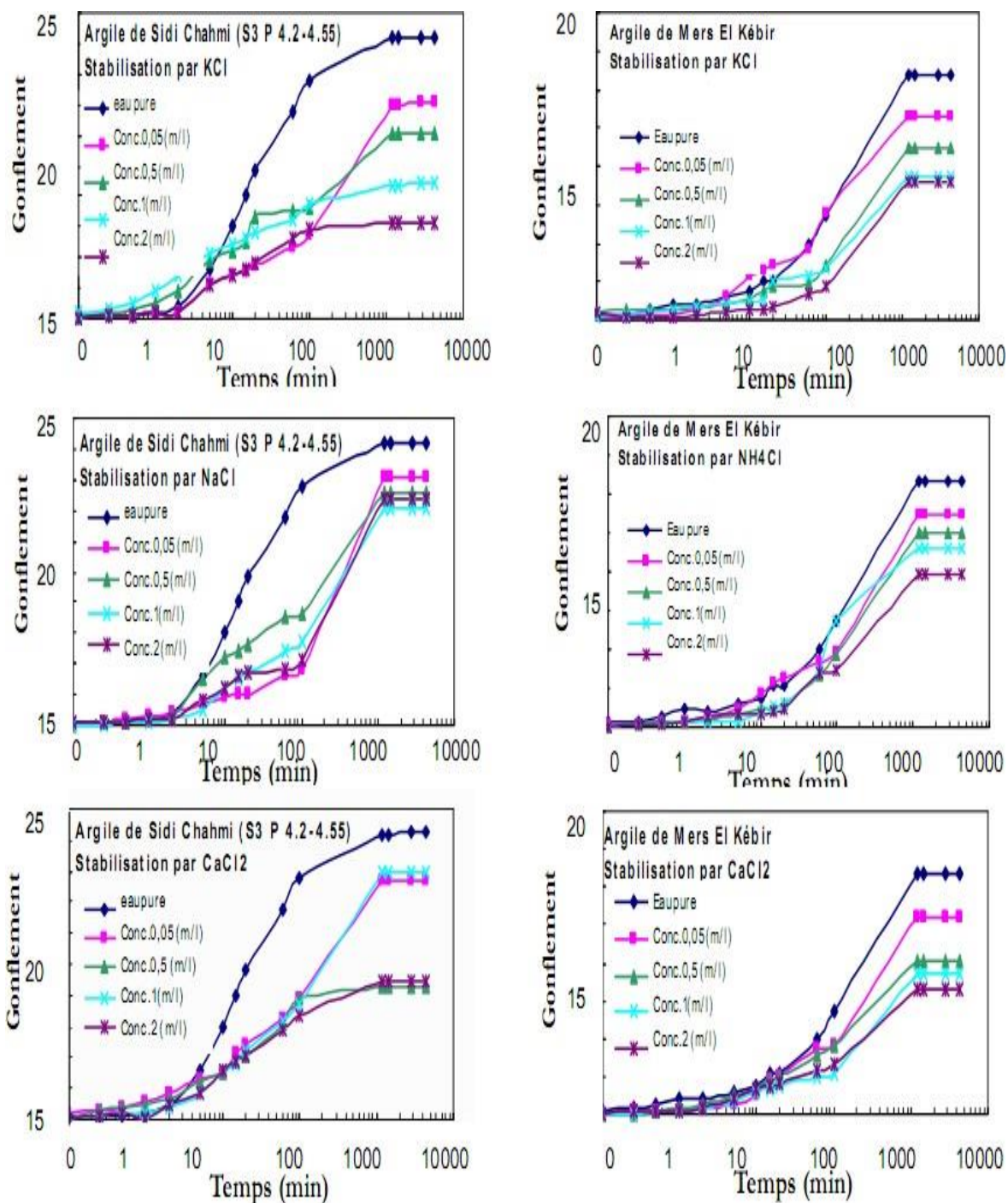


Figure III.6 : Courbes de gonflement des argiles de Sidi Chahmi et Mers El Kébir en présence de différents sels minéraux à différentes concentrations.

III.3.2. 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; voies romaines, habitations (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 durant la deuxième guerre mondiale. Mais surtout depuis vingt ans, l'emploi de ces liants s'est développé en technique routière. Elle concerne essentiellement les sols fins (argileux, limoneux...).

La chaux et le ciment ont pour effet de réagir avec la fraction argileuse et de modifier leur environnement chimique et sa structure minéralogique. Parmi les stabilisations les plus couramment utilisés

III.3.2.1. Stabilisation par ajout de la chaux

On utilise la chaux sous forme de chaux éteinte ou de chaux vive, qui produit un abaissement plus important de la teneur en eau mais qui est plus délicate à manipuler (3% de chaux vive ont les mêmes effets que 4% de chaux éteinte), (Haras nationaux (2004)

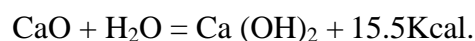
La chaux provoque deux actions différentes dans le sol :

- L'action immédiate: se produit directement après que la chaux soit mélangée au sol.
- L'action à long terme: peut durer entre plusieurs mois et quelques années après la mise en œuvre.

a. Action immédiate

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

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



Chaux vive + eau = Chaux éteinte + Chaleur.

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

- ✓ L'apport de la matière sèche qui diminue le rapport de la masse d'eau à la masse de solide.

La diminution de la teneur en eau est de l'ordre de 1% de teneur en eau par pourcent de chaux vive introduite. L'adjonction de chaux au sol provoque une modification de la qualité des argiles par échange des cations alcalins (Na^+ , K^+ ...) par des cations Ca^{++} apportés par la chaux, cette action développe des forces électriques conduisant à une agglomération des fines particules argileuses en particules grossières et friables. (Haras nationaux(2004).

b. Action à long terme

La chaux éteinte

La chaux éteinte diminue également la teneur en eau . La diminution de la teneur en eau est limitée à 0.3% de chaux éteinte introduite.

La chaux influe sur les charges électriques se trouvant autour des particules d'argiles et modifie ainsi les champs électriques entre ces particules, ceci entraîne leur floculation.

L'effet de la chaux éteinte se traduit par une augmentation de la limite de plasticité, et une diminution de l'indice de plasticité (Azouz ,2006).

La (figure III.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 d'un sol de l'état plastique (déformable, collant – difficilement compactable) à l'état sec rigide.

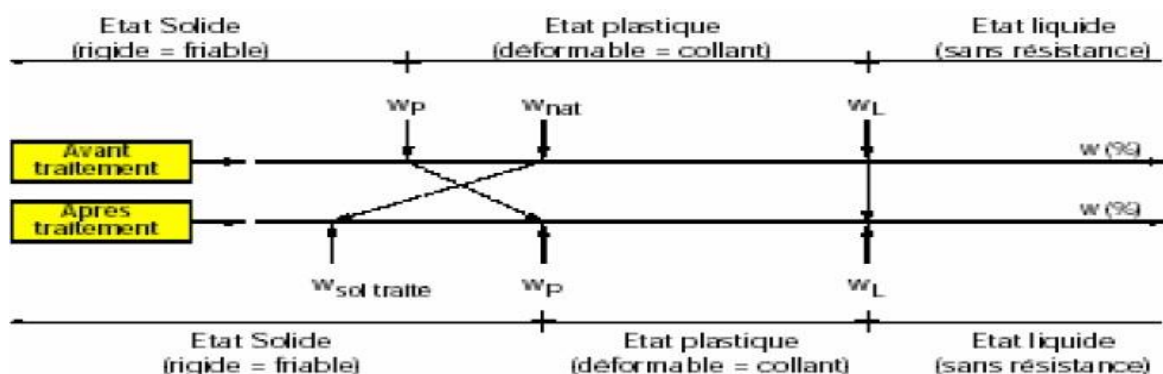


Figure III.7 : Variation de l'indice de plasticité avec l'ajout de la chaux. (Azouz ,2006

La (figure III.8) montre que la courbe Proctor d'un sol traité à la chaux est décalée 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 avec la chaux.

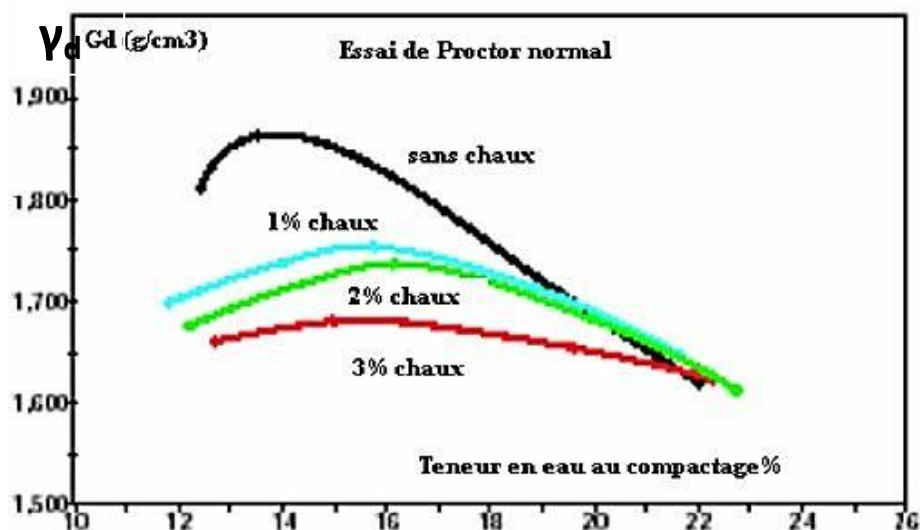


Figure III.8 : Influence de la chaux sur les caractéristiques de compactage, (Azouz, 2006)

III.3.2.2. Stabilisation par ajout du ciment

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

En effet ; le ciment rigidifie rapidement le sol de manière irréversible mais s'il y a rupture de l'horizon traité (action mécanique) il n'y a pas de nouvelle prise. La prise au ciment est plus rapide que celle de la chaux (qui peut évoluer encore au bout d'un an), . Les constituants hydratés du ciment relient les grains d'argile entre eux en formant des sortes de ponts nombreux et solides, ceci aboutit à l'augmentation de la portance, des résistances mécaniques et de la résistance au gel (*Haras nationaux (2004)*

L'hydratation du ciment est une réaction pouzzolanique très compliquée. Il est bien admis que l'addition d'un certain pourcentage de ciment de 2 à 6%) à des argiles gonflantes conduit à des effets équivalents à ceux de la chaux cité (Azouz, 2006).

Selon Djedid (2005), le traitement des échantillons reconstitués d'argile de Tlemcen a montré une réduction du gonflement libre jusqu'à un dosage de 12 % en ciment, les résultats obtenus sont présentés par la figure III.9.

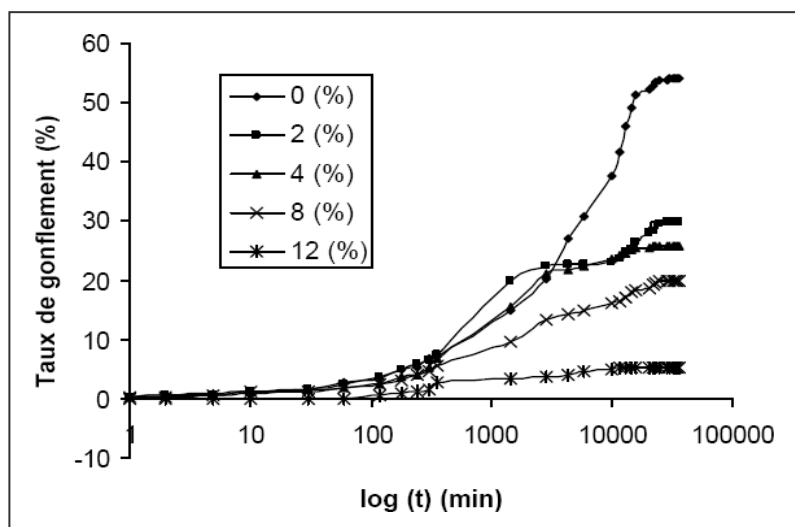


Figure III.9 : Effet du dosage au ciment sur le gonflement de la Bentonite de Meghnia. (Djedid,2005) .

III.4. Technique d'injection

L'injection se réalise à partir d'un maillage de forages équipés de tubes crépines, tubes à manchettes ou canules, suivant les techniques recherchées. Ces tubes ou canules sont mis en place dans une gaine de coulis de liants hydraulique qui empêche la remontée de coulis le long du forage. Le coulis est ensuite injecté sous faible pression dans le terrain et pénètre dans les vides interstitiels du terrain avant sa prise.

Le coulis est classiquement composé d'eau, de chaux, de ciment, parfois de sablons ou cendres volantes.



Figure III.11 : Technique d'injection

III.5. Avantages et inconvénients des techniques de stabilisation couramment utilisées :

Dans le tableau suivant, on donne les principaux avantages et inconvénients de chaque technique de stabilisation

Tableau III.1 : les principaux avantages et inconvénients de quelques techniques.

Technique	procédés	Les avantages	Les inconvénient
Stabilisation mécanique	compactage	-Le compactage est le plus économique. - Réduire le potentiel expansif.	- il faut une grande quantité d'eau. (compacter au dessus de l'optimum avec une wn élevée).
	Substitution	facile	-L'épaisseur de la couche - la disponibilité des matériaux.
Stabilisation chimique (ajout de matériaux)	Les sels	-Augmenter la concentration Tonique de l'eau libre. -Réduire le phénomène d'échange.	- Le choix de type de dosage et de la méthode 'addition d'un produit.
	Le ciment	-augmenter la résistance. -diminuer la plasticité -réduire le potentiel de variation de volume. -Augmenter la limite de Retrait.	- Utilisation d'un dosage important.
	La chaux	-diminuer la plasticité. La densité sèche et la pression u gonflement. -Augmenter la résistance et Wn opt -utilisation d'un faible dosage.	-Carbonations de la chaux.

III.6. Méthode d'utilisation de la chaux dans le traitement du sol

Les injections ou le malaxage du sol avec de la chaux réduisent fortement le phénomène de retrait/gonflement des sols cohérents pour les voiries, parkings, bâtiments ou ouvrages d'art. mais les techniques de mise en œuvres sont très importantes à suivre pour un bon résultat.

III.5.1 Malaxage sur place

Les étapes de traitement peuvent se présenter dans un ordre différent suivant qu'il s'agit de traiter le sol en place, ou que l'on prévoit des mouvements de terre avant ou après le traitement. On distingue les étapes principales suivantes :

1- Préparation du sol

Il s'agit d'une scarification dont le but est soit d'éliminer de gros éléments susceptibles d'entraver le malaxage, soit de permettre la modification de l'état hydrique du sol par aération ou humidification. L'exécution de cette opération, qui n'est pas toujours nécessaire, s'effectue à l'aide d'un ripper, d'une herse ou d'une charrue.

2- Epannage

La technique de l'épannage "au sac" sur des plateformes préalablement quadrillées peut être envisagée pour des chantiers de surface très limitée ($< 250 \text{ m}^2$) ou de géométrie complexe.

Dans les autres cas, la répartition de la chaux est réalisée à l'aide d'un épandeur à dosage pondéral, équipé en général d'un dispositif asservi à la vitesse du véhicule.

L'épannage de chaux doit être réalisé avec un maximum de précision et de régularité. La chaux est chargée pneumatiquement dans l'épandeur, soit directement à partir de la citerne de transport, soit via des silos-tampons installés sur chantier.

3- Malaxage

Cette opération a pour but de faire foisonner le sol, et d'y incorporer la chaux de façon homogène. En fonction de la nature du sol, de la taille et du type de chantier, il est exécuté à l'aide de pulvimixers, de rotobêches, de charrues à disques ou à socs.

Pour les chantiers de faible importance, du matériel de type agricole peut être utilisé. Sur sites

sensibles au niveau des poussières, il est recommandé d'utiliser des malaxeurs de type pulvimixers à chambre de malaxage fermée.

4 Compactage

Le compactage des matériaux traités intervient après un éventuel nivellement en couches d'épaisseur compatible avec les performances des compacteurs, qu'ils soient à pneus, vibrants ou à pieds dameurs.

En cas de sol humide, il est recommandé de réaliser le compactage 2 à 4 heures après le malaxage, afin que la chaux vive eue le temps d'assécher le sol au maximum. Lorsqu'il y a risque de pluie, il est recommandé de fermer le sol avant toute précipitation.



Figure III.10.A : Technique de Malaxage (**fediex section Kalk sectie**).

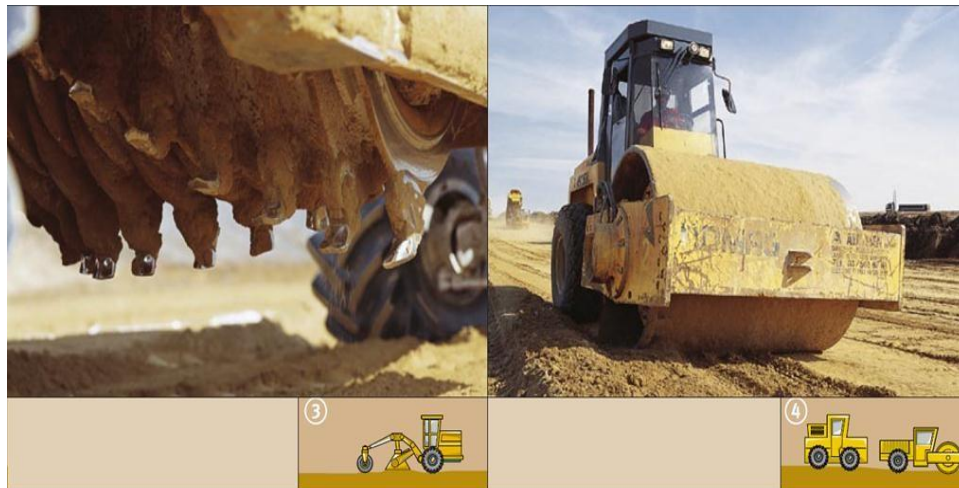


Figure III.10.B : Technique de Malaxage (**fediex section Kalk sectie**)

III.10 .Conclusion

Suite aux conséquences des sols expansifs sur les ouvrages géotechniques en surface et souterrains, plusieurs chercheurs se sont intéressés sur leur stabilisation. Les différentes recherches se sont orientées sur les ajouts qui minimisent le plus le potentiel et la pression de gonflement.

Un grand nombre de méthodes et d'appareillages ont été mis au point, pour connaître l'influence de l'efficacité d'une solution ou d'un produit sur la stabilisation d'un sol argileux. Ce chapitre a été consacré à l'étude bibliographique présentant l'état d'avancement de la recherche dans le domaine de la stabilisation des sols argileux.

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

Chapitre IV : Identification du sol et protocoles d'essai

IV.1. Introduction

Le but de ce travail est d'étudier l'influence d'addition de la chaux sur la stabilité des sols ayant des potentiels gonflants très élevés.

Le choix définitif du lieu de prélèvement du sol était difficile, c'est pourquoi on s'est référé à la bibliographie des études faites dans la région de Mostaganem, il s'avère que la région de Sidi-Belattar (commune) soit la plus destinée pour faire le prélèvement. Cependant, des essais sont nécessaire à faire au préalable afin d'évaluer le degré de gonflement du sol.

Ce chapitre a pour but de présenter dans son ensemble notre démarche expérimentale ainsi que les moyens mis en œuvre et les protocoles d'essai qui nous ont permis à l'identification du sol, le programme d'essai concerne la mesure et calcul des paramètres géotechniques du sol prélevé.

Les étapes de ce travail sont :

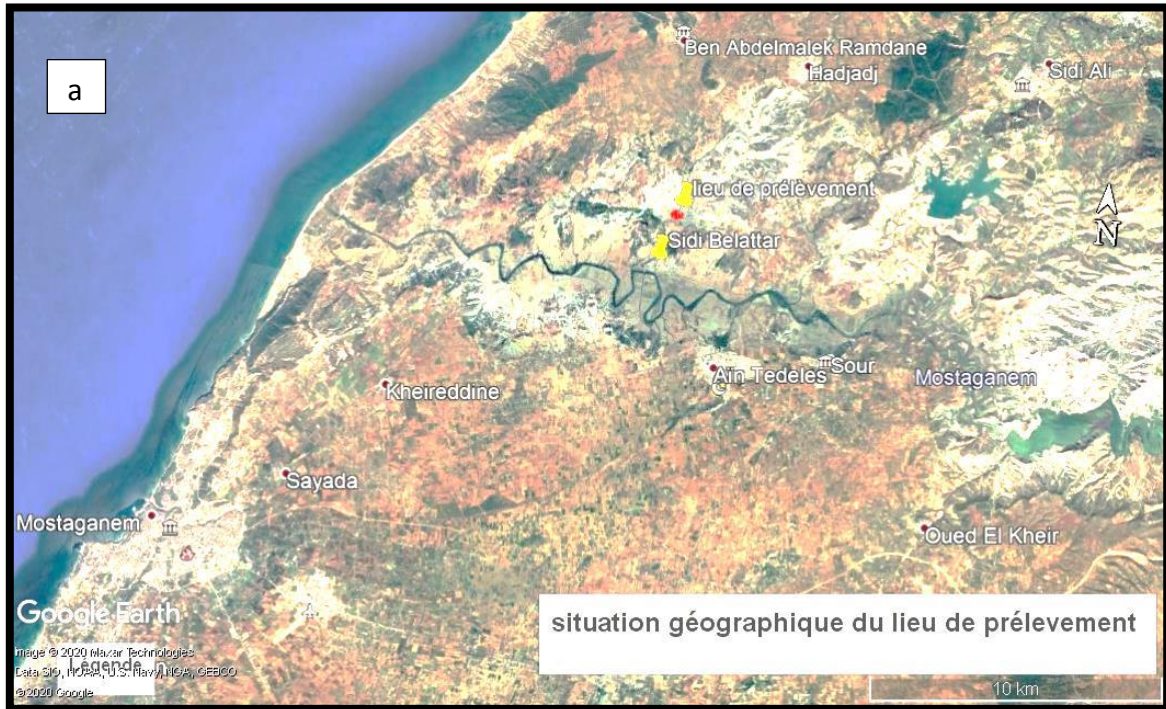
- Préparation des matériaux qui composent les sols d'essais.
- Détermination des caractéristiques physiques de ces sols (granulométrie, limites d'Atterberg, teneurs en eau optimales...).
- Reconstitution d'un éventuel nouveau sol.

IV.2. Identification et localisation du site

Le sol étudié est situé dans la région de JEDOUAA, sise à la commune de Sidi-Belttar(W) de Mostaganem (nord-ouest de l'Algérie), elle s'éloigne de 30 km du chef de lieu de la wilaya

D'un point de vue géographique :

- Au nord : Les commune de Ben-Abdelmalek Ramdane, Hadjaj
- A l'est : Commune de Achasta
- Au sud : Commune de Ain-Tedeles et Oued Cheliff
- Au Ouest : Commune de Ain-Boudinar



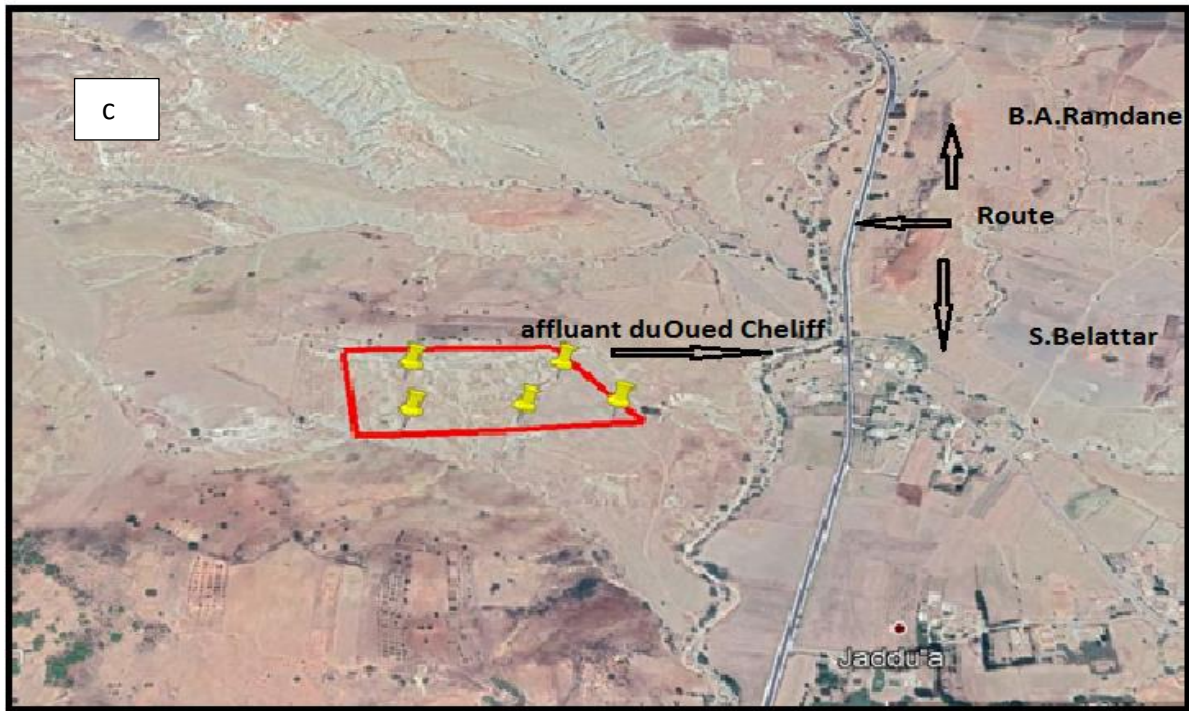


Figure IV.1 : (a),(b) et (c) localisation géographique du lieu d'étude (image google earth)

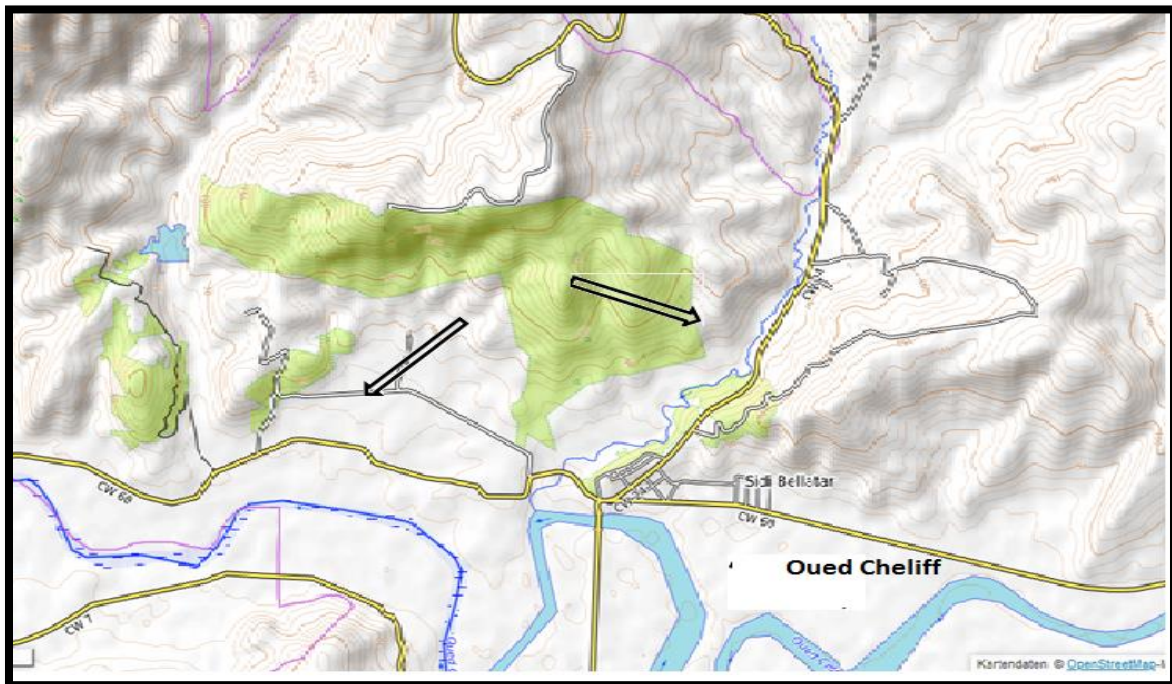


Figure IV.2 : Coupes de niveau du terrain d'étude

IV.3. Caractéristiques physiques

Les propriétés physiques du sol étudié sont : l'analyse granulométrique, les limites d'Atterberg, la surface spécifique, la teneur en matière organique. Après son extraction, le sol a été placé dans des sacs en plastique, transporté et stocké au laboratoire.



Figure IV.3 : Prélèvement de sol

IV.3.1. Calcul des Poids volumiques

- **Poids volumique du sol humide (δ_h)**

C'est la masse d'un corps par unité de volume apparente en état naturel et exprimé en (gr/cm^3 ; kg/m^3 ; t/m^3)

$$\delta_h = p_h / V_t \quad (\text{IV.1})$$

Avec p_h poids humide et V_t le volume total

- **Poids volumique du sol sec (δ_d)**

C'est rapport du poids de matériau sec (après expulsion de l'eau libre) contenu dans Une certaine quantité de sol au volume de ce même matériau exprimée en (gr/cm^3 , kg/m^3 , t/m^3).

$$\delta_d = \delta_h / (1 + w\%) \quad (\text{IV.2})$$

Avec $w\%$ teneur en eau à l'état nature et δ_h la masse volumique humide

- **Poids volumique solid (δ_s)**

C'est le rapport du poids matériau sec contenu dans une certaine quantité de sol au volume des grains du sol exprimée en (g/cm^3 ; kg/m^3 ; t/m^3)

$$\delta_s = P_s / V_s \quad (\text{IV.3})$$

Avec P_s le poids sec et V_s le volume sec.

IV.3.2 Teneur en eau W%

Le calcul de cette teneur, nous permettra de reconnaître l'état hydrique du sol in situ à son état naturel. Elle est le rapport du poids d'eau contenu dans ce matériau au poids de même matériau sec. On peut aussi définir la teneur en eau comme le poids d'eau W contenu par unité de poids de matériau sec exprimée en (%)

$$W (\%) = 100 (W_w / W_s) \quad (\text{IV.4})$$

Avec W_w : poids de l'eau ; W_s : poids sec après étuvage



Figure IV.4 : Essai d'étuvage du sol

IV.3.3. Degré de saturation S_r

Le degré de saturation est le pourcentage de l'espace poreux qui est occupé par l'eau. Pour le sol saturé le degré de saturation est égale 100% et pour le sol sec est 0%.

$$S_r = V_w / V_v \quad (\text{IV.5})$$

Avec V_w le volume de l'eau et le V_v le volume total occupé par les vides.

Tableau IV.1 : les propriétés physique du sol

Propriétés physique	Symbol	Unité	Valeur
La teneur en eau à l'état naturel (après prélèvement)	W	%	27,50
Poids volumique des grains solides	δ_s	g/m^3	2,54
Poids volumique humide	δ_h	g/m^3	1,72
Poids volumique sec	δ_d	g/m^3	1,36
Degré de saturation	S_r	%	78,31
L'indice de vide	e		0,87
Porosité	n		0,47

IV.3.4. Analyse granulométrique (NF P94-057)

L'analyse granulométrique a pour but de déterminer la répartition des grains de sol suivant leur dimension. Elle a été effectuée par tamisage pour les éléments supérieurs à 800 μm , d'après le calcul du pourcentage du refus cumulé récupéré de 6%, il ressort que le sol présente une texture fine, cela nous conduit à compléter l'analyse par l'essai de sédimentétrie du tamisât.

IV.3.5. Analyse par sédimentométrie (NF P94-057)

Pour les fractions inférieure 80 μm , l'analyse a été faite par sédimentation, où une quantité de 80 g de sol a été imbibée en ajoutant une solution à 5% d'hexamère taphosphate de sodium, le mélange est laissé pendant 16 heures, après quoi il est mis dans une éprouvette cylindrique en verre de 2 litre contenant de l'eau distillée. La lecture se fait automatiquement après agitation en utilisant un densimètre. [Figure IV.6].

La granulométrie est exprimé par une courbe granulométrique qui donne la dimension moyenne des grains exprimé sous forme pourcentage du poids total du matériau elle est tracée en diagramme semi logarithmique (figure IV.7).



Figure IV.5 : Essai de sédimentométrie

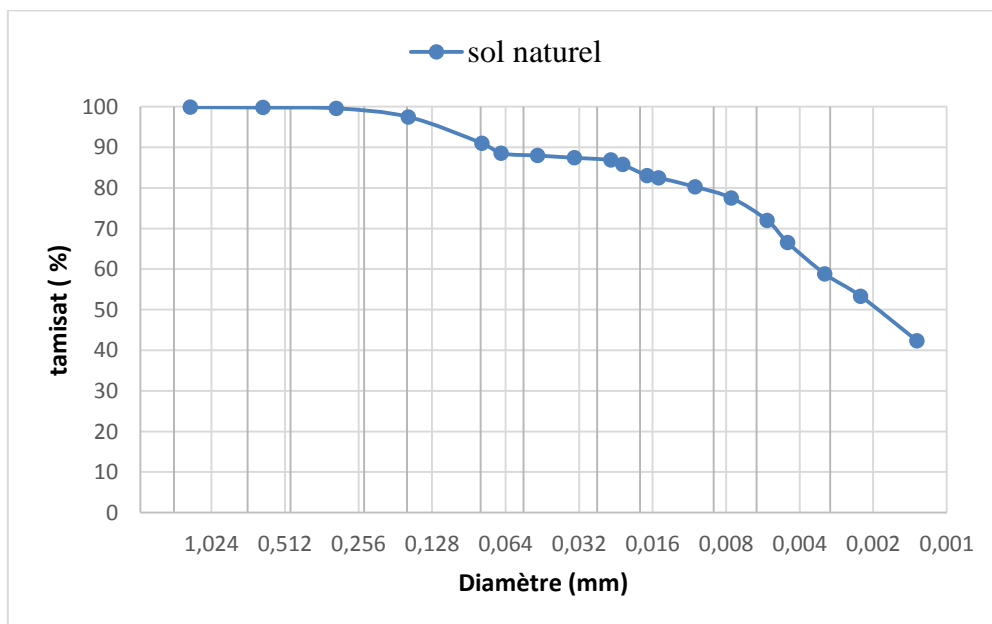


Figure IV.6 : Courbe granulométrique du sol naturel prélevé

Le résultat d'analyse granulométrique et de la texture du sol prélevé montre l'importance de ce paramètre dans la classification ; après la projection des résultats de l'analyse granulométrique sur le triangle textural (Figure IV.7) , il ressort que le sol en question présente une texture Argileuse plus au moins limoneuse puisque sa

position se trouve entre les limites du deux domaine de classification, avec la prédominance en pourcentage des argiles soit: Argile (51 %) ; Limon (37 %) et Sable (12 %)

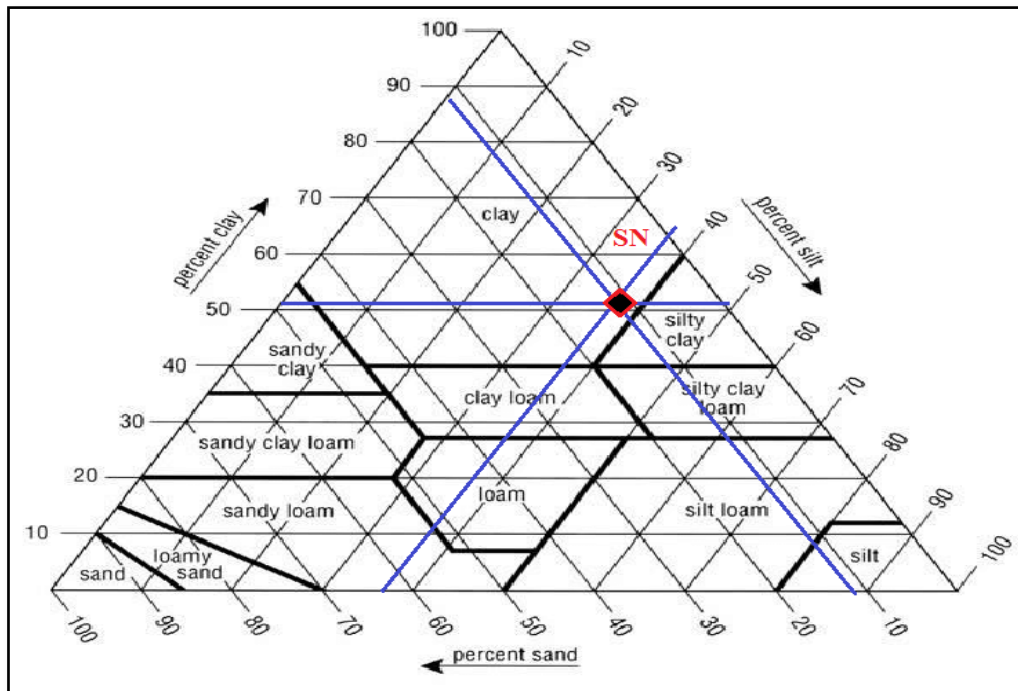


Figure IV.7 : Classification du sol en fonction du triangle de texture

IV.3.6. Limites d'Atterberg (NF P94-051)

Cet essai permet de prévoir le comportement des sols pendant les opérations de terrassement, en particulier sous l'action des variations de teneur en eau. Il consiste à faire varier la teneur en eau d'une fraction de sol en observant sa consistance. Il existe deux limites dites d'Atterberg : la limite de liquidité et la limite de plasticité.

- **Limite de liquidité WL** : la limite de liquidité et la teneur en eau (W%) qui correspond à une fermeture après 25 coups, de A en utilise un appareil conforme aux spécifications qui porte le nom de Casagrande. Formule de la teneur en eau pondérale : $\text{Masse d'eau (g)} / \text{Masse de sol sec (g)}$.



Figure IV.8 : Essai de limite Atterberg (appareil de Casagrande)

- **Limite de plasticité WP :** la limite de plasticité est la teneur en eau (exprimée en %) du sol en forme de rouleau qui se brise en petits tronçons de 10 à 20mm de longueur au moment où son diamètre atteint 3mm



Figure IV.9 : Essai de limite de plasticité

À partir des limites d'Atterberg, on peut calculer les grandeurs physiques suivantes : indice de plasticité (I_p) et sa consistance (I_c).

- **Indice de plasticité : I_p** est la différence entre la limite de plasticité et la limite de liquidité, il mesure l'étendue du domaine de plasticité du sol. Il s'exprime donc la relation :

$$I_p = W_L - W_p \quad (\text{IV.6})$$

- **Indice de consistance :**

$$I_c = W_L - W_n / I_p \quad (\text{IV.7})$$

Tableau IV.2: résultats des limites d'Atterberg

Grandeur physique	W_L	W_p	I_p	I_c
Valeur en (%)	59,11	32,85	26,27	1,2

Ces indices expriment la sensibilité du sol vis-à-vis de l'eau, et permettent aussi de le classer et avoir une idée sur sa nature. D'après l'abaque de Casagrande représentée par la figure (IV.10), on peut conclure que le sol appartient à la classe des sols argileux peu plastique. Sur la même figure, on remarque une projection du potentiel de gonflement des sols inspirée par différents auteurs ; Dakshanamurthy et Raman (1973) classe le sol comme étant un sol moyennement gonflement, alors, pour Chen (1988) le classe entre la limite du moyen et élevé.

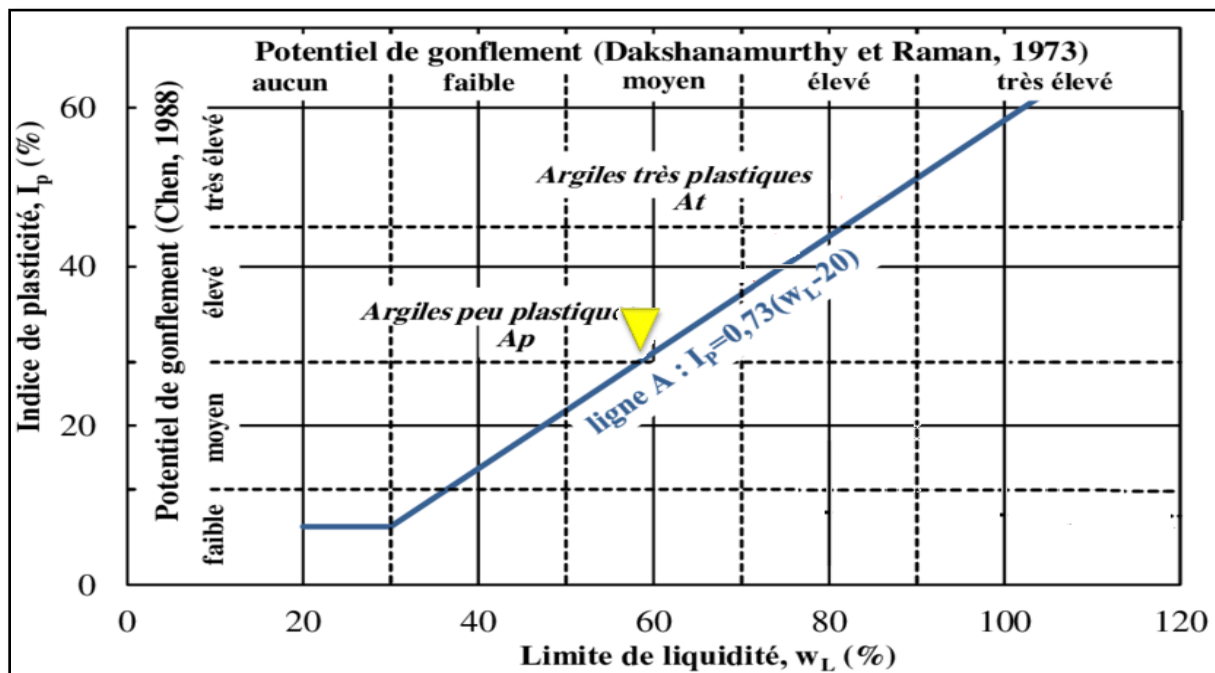


Figure IV.10: Classification des sols fins, diagramme de plasticité

La figure (IV.11), montre que le sol peut appartenir à la famille des argiles Illites chose confirmé par la valeur de indice d'activité des argiles calculé par la formule suivante (Holtz, 1991)

$$A = I_p / \% \text{ des argiles } (< 2\mu\text{m}) \quad (\text{IV.8})$$

Ou A : indice d'activité argileuse

I_p : indice de plasticité

Tableau IV.3: détermination du type d'argile

% Argiles < 2 μm	Indice de plasticité	Indiced'activité	Type d'argile
51	26,27	0,51	Illites

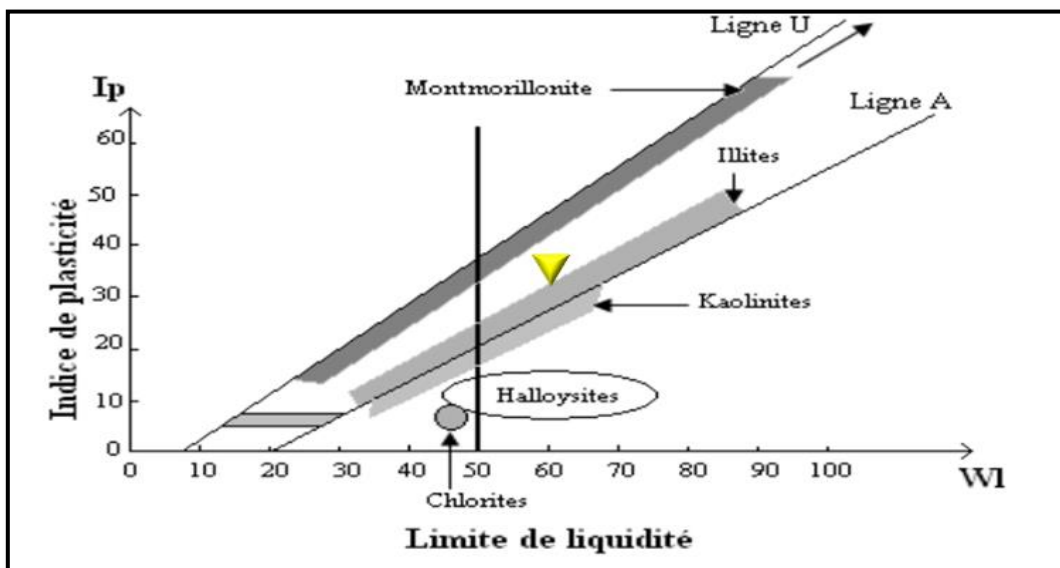


Figure IV.11: Position des minéraux argileux les plus communs sur l'abaque de plasticité de Casagrande. (Casagrande, 1948, et de Mitchell, 1976)

IV.4. Caractéristique chimique

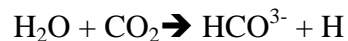
IV.4.1 Dosage des carbonates CaCO₃ (NF ISO 10693)

La calcimétrie est la mesure du pourcentage de CaCO₃ dans une roche, un sol l'appareil de mesure la plus fréquemment utilisée est la calcimètre de Bernard.

Le dosage du carbonate de calcium est basé sur l'attaque par l'acide chlorhydrique (HCL) dilué d'un échantillon d'une masse donnée à pression et température standard. On mesure le volume de CO₂ dans un tube manométrique après attaque de la roche après attaque de l'échantillon à l'acide chlorhydrique (HCL) suivant la réaction suivante :



On utilise l'eau saturée en sel pour éviter la perte de CO₂ à partir leur réaction avec H₂O selon la réaction suivante :



Connaissant la masse de CaCO₃ et la masse de l'échantillon, pour calculer le pourcentage de CaCO₃ dans l'échantillon. En prend une quantité de l'échantillon à une masse égale 0,5 g. Le résultat trouvé montre que le sol contient 30,36 % de CaCO₃ et d'après le tableau (IV.4) il peut être classé comme sol argileux-calcaire.

Tableau IV.4 : Teneur en CaCO₃ de quelques sols

CaCO ₃ (%)	Dénomination
0-10	Argile ou limon.
10-30	Argile calcaire.
30-70	Marne.
70-90	Calcaire argileux

IV.4.2. Valeur en bleu du sol (VBS) et surface spécifique (NF P94-068)

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

La surface spécifique totale d'un sol est déduite de l'essai au bleu de méthylène. Cette surface spécifique est liée directement à la quantité de bleu de méthylène absorbée par la fraction argileuse. Elle est donnée par la formule (IV.8) D'après les résultats le sol se classe dans la catégorie des sols très argile, sensible à l'eau.

$$SST = 20,93 \times V_{cc} \times 1/P_s \quad (IV.8)$$

SST : surface spécifique totale (m²/g)

VCC : volume de bleu de méthylène utilisé (cm³)

Ps : masse de matériau sec (g)

20,93 : surface correspondant à 1 cm² de bleu de méthylène.

Tableau IV.5 : Essai de bleu méthylène et surface spécifique

Paramètres	Sol naturel prélevé
Valeur du bleu VBS (%).	8,50
Surface spécifique totale SST (m ² /g).	177,91

Tableau IV.6 : Classement des sols en fonction du VBS

Valeur de bleu de méthylène (V _{BS})	Catégories de sol
V _{BS} < 0,1	Sol insensible à l'eau
0,2 ≤ V _{BS} < 1,5	Sol sablo limoneux, sensible à l'eau
1,5 ≤ V _{BS} < 2,5	Sol sablo argileux, peu plastiques
2,5 ≤ V _{BS} < 6	Sol limoneux de plasticité moyenne.
6 ≤ V _{BS} < 8	Sol argileux.
V _{BS} > 8	Sol très argileux.

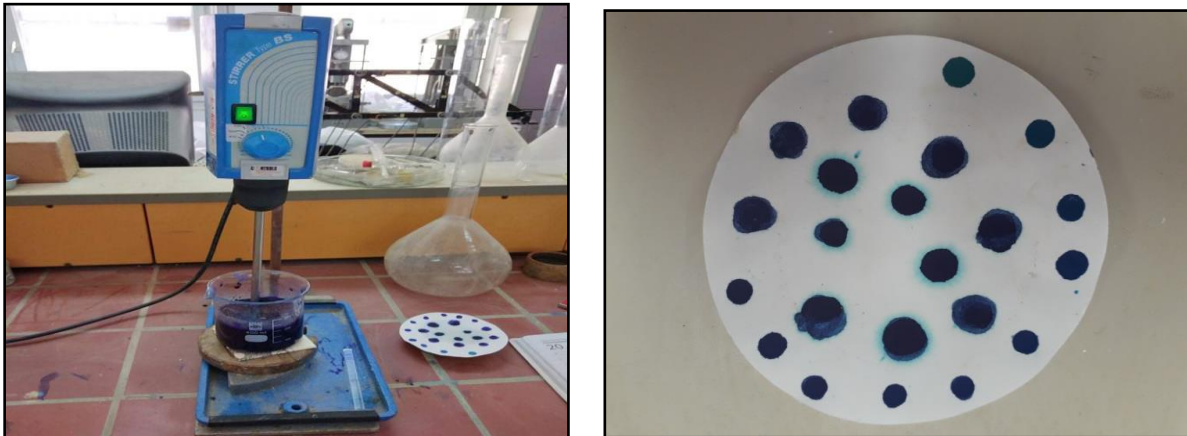


Figure IV.12 : Essai de bleu méthylène

IV.4.3. La teneur en matière organique (NF EN 12879-2000)

La teneur en matière organique des échantillons prélevés est mesurée selon la norme (NF EN 12879-2000). Dans cet essai, la matière organique est mesurée suite à la perte au feu de la masse sèche. Nous prenons un creuset vide, sec et propre et nous notons son poids (M_a). Par la suite, nous introduisons une prise d'essai et nous notons son poids (M_b). Ensuite, la prise d'essai et le creuset sont mis dans un four à une température de 550 ± 25 °C pendant 3 heures, comme le montre la Figure (IV.15). Après, nous mettons la prise d'essai dans un dessiccateur à une température pour qu'elle refroidisse et nous notons le nouveau poids (M_c). Le calcul de la matière organique se fait selon l'équation suivante :

$$M.O. (\%) = (M_b - M_c) / (M_b - M_a) \times 100 \quad (\text{IV.9})$$

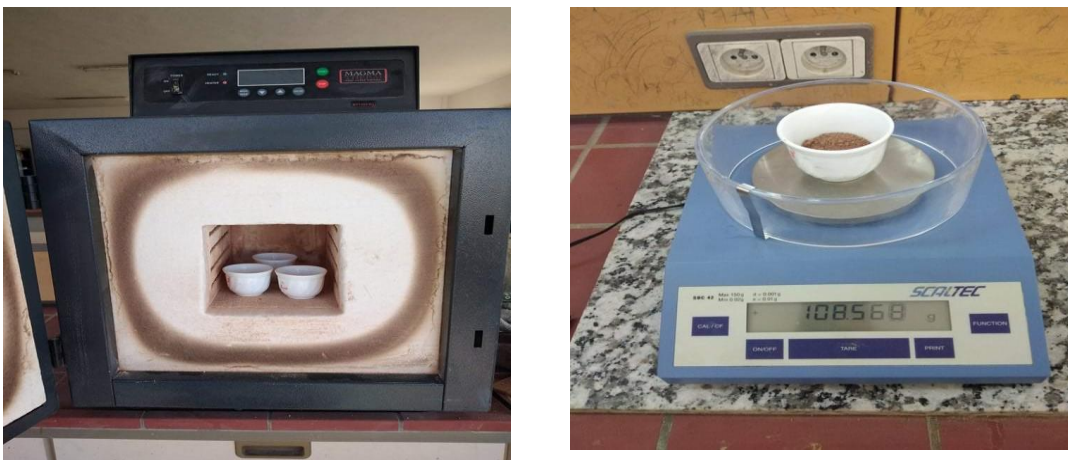


Figure IV.13: Essai de détermination de la matière organique

Le résultat trouvé d'une moyenne de 5.15% , le tableau IV.7 indique que le sol est classé dans la catégorie des sols faiblement organiques.

Tableau IV.7: Les différents types de sols en fonctions de la teneur en matières organiques

Teneur en matière organique	Type de sol
M.O. <3	Argile ou limon
$3 \leq \text{M.O.} < 10$	Sols faiblement organiques
$10 \leq \text{M.O.} < 30$	Sols moyennement organiques
M.O. ≥ 30	Sols très organiques

IV.5. Caractéristique mécaniques

IV.5.1 Essai Proctor (NF P 94-093)

Il s'agit de déterminer la teneur en eau optimale conduisant à une force portante maximale pour un sol donné, selon des conditions de compactage précises. On compacte des échantillons de sol dans un moule normalisé, en adoptant diverses valeurs. Pour chaque essai, on détermine la masse volumique apparente de teneur en eau correspondante. (Figure IV.15). Puis les résultats sont portés sur un graphique et la courbe joignant au mieux les points obtenus passe par un maximum qui correspond à l'optimum Proctor. Le résultat illustré par la figure IV.17 montre que le sol a atteint sa capacité portante maximale de $1,549 \text{ g/cm}^3$ pour une teneur en eau optimum W_{opt} de 20,55.

Le sol présente une forte sensibilité à l'eau autour de l'optimum Proctor. C'est l'une caractéristique des sols argileux



Figure IV.14: Essai Proctor

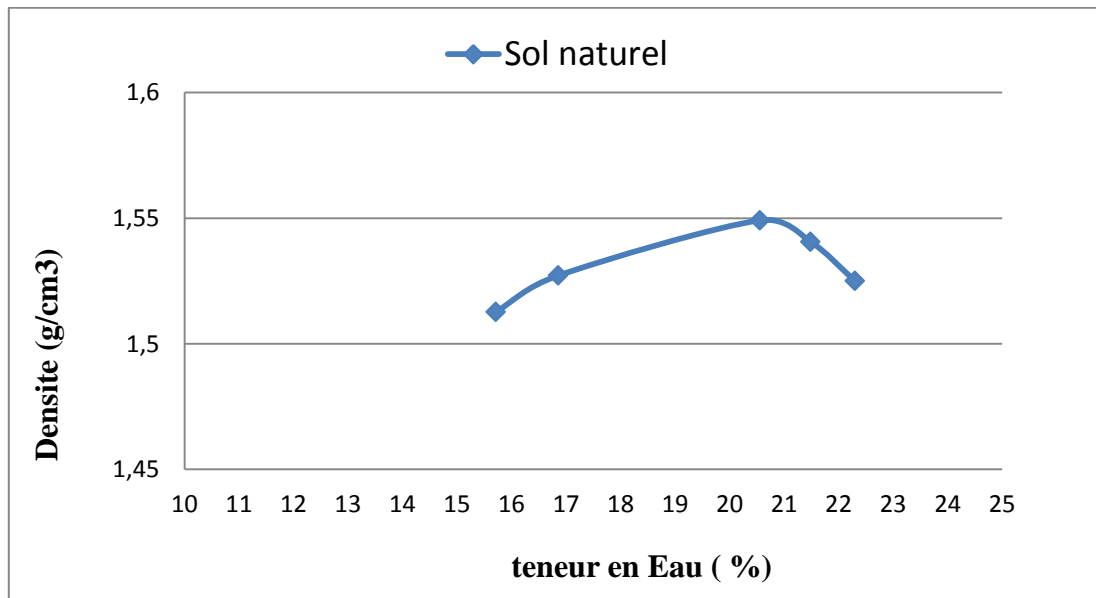


Figure IV.15: Essai de compactage du sol naturel

IV.5.2 Essai de compressibilité et consolidation à l'œdomètre (NF P 94-090-1)

L'essai s'est effectué conformément à la norme, sur un sol remanié. Au plan quantitatif, le programme expérimental a comporté quatre essais de compressibilité permettant de déterminer les paramètres de compressibilité et de consolidation des sols étudiés.

a-Principe de l'essai :

L'essai s'effectue sur plusieurs éprouvettes provenant d'un même échantillon et prélevé sensiblement au même niveau. Chaque éprouvette de sol est placée dans une enceinte cylindrique rigide (bague) et un dispositif pour appliquer un effort axial vertical maintenu sur l'éprouvette. L'essai consiste à appliquer à chaque éprouvette une contrainte verticale différente après chaque consolidation et à mesurer la variation de la hauteur lorsqu'elle est mise en présence d'eau.



Figure IV.16: Appareil Oedomètre

b- Mode opératoire

- Préparer les échantillons.
- Mettre les échantillons ainsi préparés entre deux pierres poreuses.
- Porter à saturation à l'aide du dispositif de l'oedomètre.
- Appliquer le chargement de l'échantillon par paliers de contraintes à l'aide du piston de l'oedomètre.
- Effectuer la lecture du comparateur lorsque le tassement est stabilisé (Consolidation)

c- Les paramètres initiaux

- **La section oedométrique S:** est la section transversale de l'enceinte oedométrique avec un rayon R, telle que

$$S = R^2 \cdot \Pi \quad (\text{IV.10})$$

- **Hauteur initiale h_0 :** est la hauteur de l'enceinte
- **Le poids sec w_s :** le poids sec est le poids de l'échantillon oedométrique après passage à l'étuve, le poids sec de l'échantillon nous aide pour calculer le poids spécifique de sol (γ_d) tel que :

$$\gamma_d = w_s / s \cdot h_p \quad (\text{IV.11})$$

Et pour calculer la hauteur pleine h_p tel que :

$$h_p = w_s / \gamma_s \quad (\text{IV.12})$$

- **Indice de vide initiale e_0 :** est l'indice du vide de l'échantillon à $T = 0s$ et $P = 0$ tel que :

$$e_0 = h_0 / h_p - 1 \quad (\text{IV.13})$$

- **Contrainte effective de pré consolidation « σ'_{pc} » :** qui correspond à la contrainte effective verticale maximale supportée par l'échantillon au cours de son histoire. Courbe ($e - \log \sigma$).

- **Indice de compressibilité « C_c » :** qui représente la pente de la droite ($e - \log \sigma'_v$) pour le cas du chargement, il est donc défini par :

$$C_c = -\Delta e / \Delta(\log \sigma'_v) \quad (\text{IV.14})$$

- **Coefficient de gonflement « C_g » :** qui représente la pente de la droite ($e - \log \sigma$) pour le cas du déchargement et il a la même expression que C_c .

$$C_g = \Delta e / \Delta(\log \sigma) \quad (\text{IV.15})$$

d- Traçage des courbes:

La courbe de compressibilité du sol gonflant est représentée dans la figure suivante (IV.19), c'est à partir du graphe que les paramètres de compressibilité ; consolidation et gonflement sont calculés ,

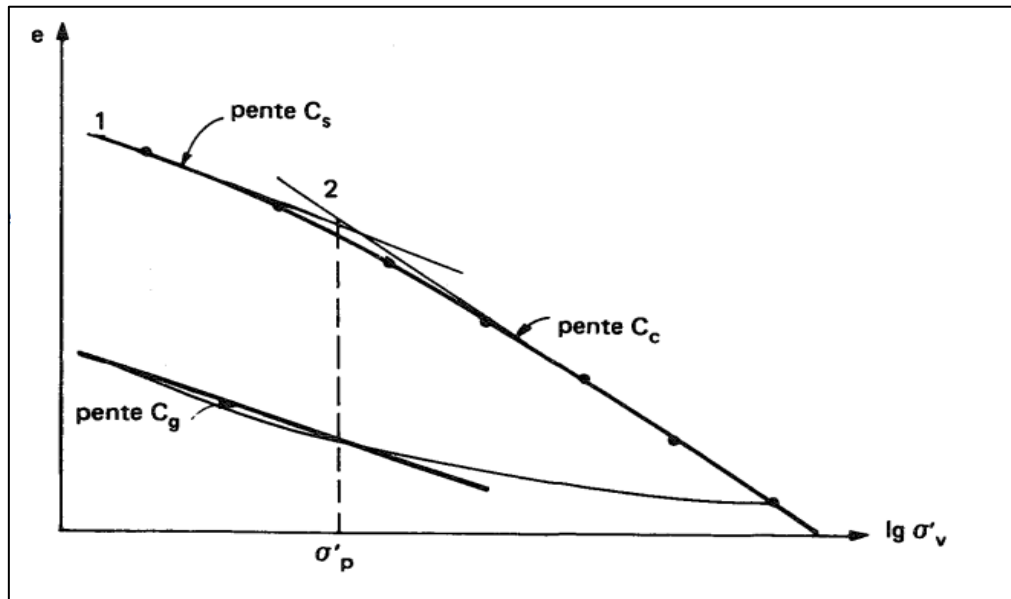


Figure IV.17 : schéma de la courbe de compressibilité (LCPC)

➤ Préparation des échantillons

Il est à noter que l'essai a été effectué sur des échantillons remaniés, préparés par broyage puis compactage quasi statique à la densité et à la teneur en d'optimum Proctor calculés. Les échantillons du sol naturel (SN) ont été préparé par mélange du sol à la teneur en eau et densité optimum de proctor soit $w\%$: 20,55 % et la densité sèche égale à 1.549 g/cm^3 . L'échantillon est ensuite prélevé en enfonçant l'anneau oedométrique, puis lissé et arasé aux niveaux supérieur et inférieur en comblant les vides éventuels.

A partir de la courbe, on peut déterminer les coefficients de gonflement et de compressibilité du sol, qui sont essentiels à la classification des sols considérés. Les résultats sont regroupés dans le tableau (IV.8).

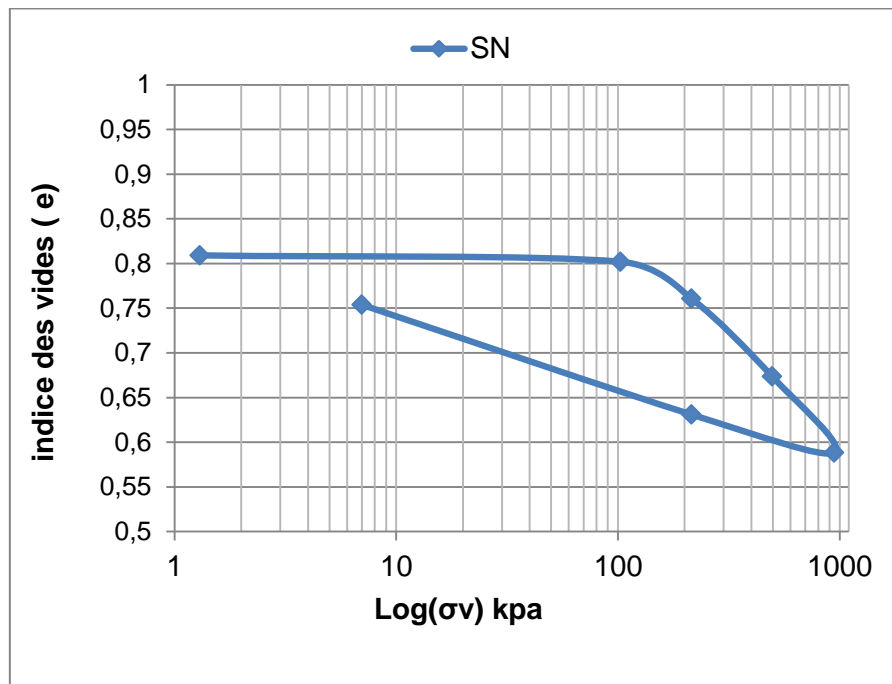


Figure IV.19 : Courbe de compressibilité du sol naturel

Tableau IV.8 : résultats d'essai de compressibilité du sol naturel

Cc	Cg	$\sigma v'$ (kpa)	e_0
0,304	0,082	164.6	0,8195

Il existe plusieurs abaques qui nous permettent de classer le degré de compressibilité du sol

Tableau IV.9: Classement des argiles selon leurs indices de compressibilités et indices des vides, donné par Philipponnat et Hubert (1997)

$Cc/1+e_0 < 0,015$	sol incompressible
$0,015 < Cc/1+e_0 < 0,05$	sol peu compressible
$0,05 < Cc/1+e_0 < 0,2$	sol moyennement compressible
$Cc/1+e_0 > 0,2$	sol très compressible

Tableau IV.10 : Classement du sol selon l'indices de compressibilité.

Sol naturel	$C_c/(1+ e_0)$	Classement
SN	0,16	Moyennement compressible

IV.6. Conclusion

Les résultats d'analyse des échantillons de sol naturel ;des limites d'Atterberg et analyse granulométrique et compressibilité à l'oedomètre ; ressort que le sol prélevé est un sol argileux de moyenne plasticité classé dans la catégorie des sols CH (Argile inorganique) selon le système de classification unifié des sols (Unified Soil Classification System (USCS)) ; appartenant à la familles des illites, avec un indice d'activité moyen, ayant un potentiel de gonflement moyen, peu compressible.

De ce fait, et en fonction des résultats obtenus, on conclue que le but de cette étude énoncé dans le début de chapitre n'a pas été atteint.

Sur ceux ; il est très évident de procéder à une reconstitution d'un nouveau sol qui aura les propriétés requises en ce qui concerne le potentiel de gonflement très élevé ; pour passer à la suite du travail proprement dit soit la stabilisation par la chaux.

Nous avons choisis la bentonite comment matériau additionnel au sol , pour ces caractéristiques très connues : plasticité et gonflement très élevés.

Chapitre V: Résultat et analyse du sol traité Par l'ajout chaux

V.1 Introduction

Le but de ce chapitre, et de reconstituer un sol ayant les caractéristiques d'un potentiel gonflant très élevé par l'ajout de la bentonite, en premier lieu il sera question de varier le pourcentage en bentonite de 5 et 10 %, et de déterminer les paramètres de gonflement. En second lieu et après le choix l'un de ces pourcentages, on étudiera l'effet de la chaux à différents teneur sur les propriétés physiques (limites d'atterbergue, masse volumique, VBS,....) et mécaniques (stabilité et compactage).

V.2 Bentonite

La bentonite est une argile de très forte plasticité, de couleur grise claire, Elle est utilisée dans cette étude comme addition au sol naturel. Nous l'avons récupéré chez la société BENTAL(Mostaganem), la fiche technique (1) présenté en annexe donne le plus essentiel de ces propriétés : l'analyse minéralogique, chimique et physique.

V.3 La chaux

Oxyde de calcium solide, blanc, caustique (chaux vive) obtenu le plus souvent par calcination de la pierre à chaux ou calcaire et susceptible de se transformer par hydratation en hydroxyde de calcium pulvérulent (chaux éteinte), la fiche technique (2) présenté en annexe donne le plus essentiel de ces propriétés .

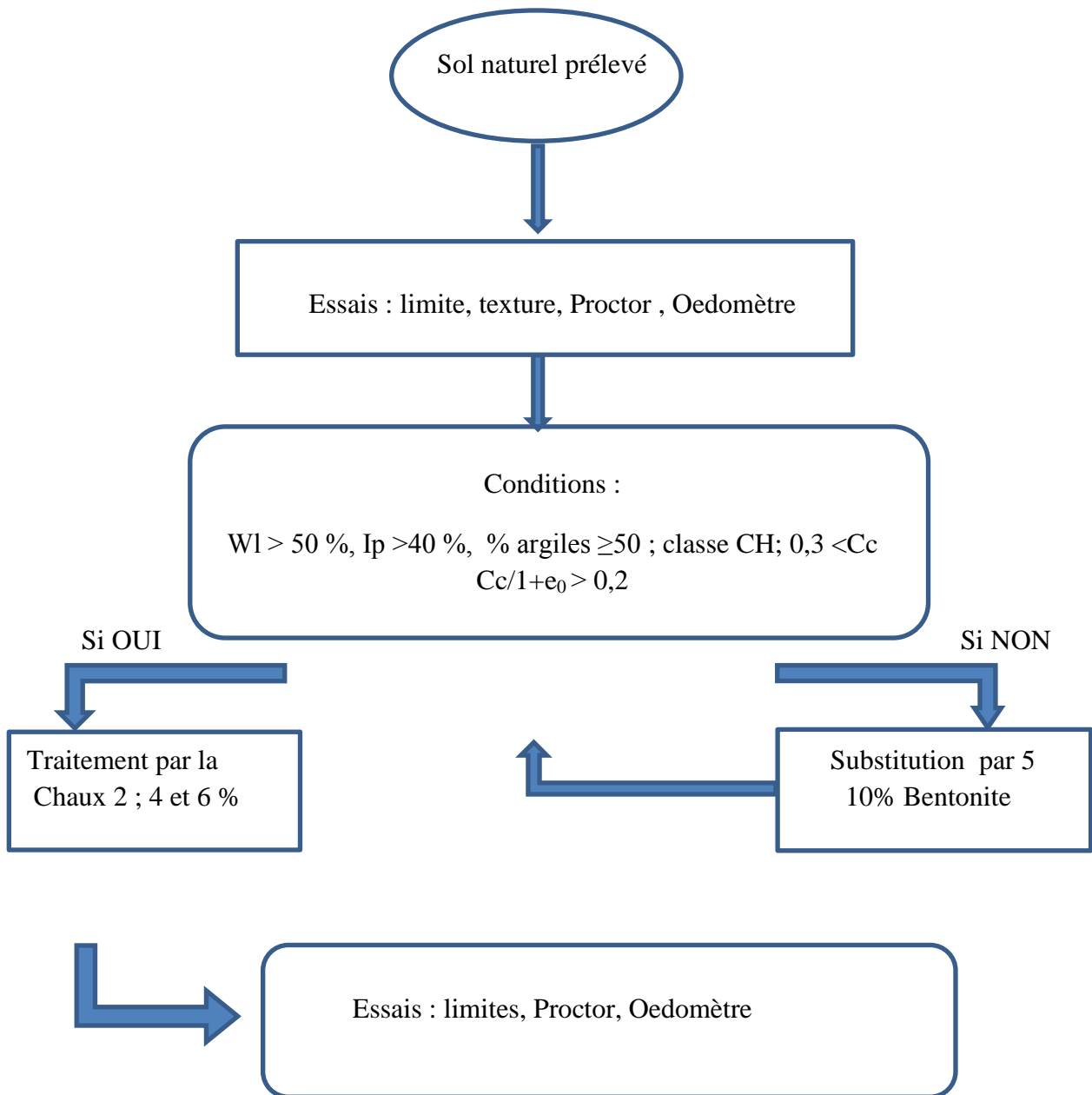


Figure V.1 : Organigramme des essais

V.4 Propriétés physiques du sol reconstitué

La préparation des échantillons des sols reconstitués s'est faite par la substitution en masse du sol naturel par la bentonite, les sols sont notés comme suivants :

- SN : sol naturel prélevé
- SN+5%B : sol naturel avec 5% de bentonite
- SN +10%B : sol naturel avec 10 % de bentonite

Le tableau V.1 montre les changements enregistrés sur les propriétés élémentaires physiques, on constate que la masse volumique diminue, alors que le VBS et la surface spécifique augmentent avec le pourcentage ; cela est très évident puisque l'une des caractéristique de la bentonite est sa grande surface spécifique, aussi pour un même volume la masse décroît provoquant une diminution en densité.

Tableau V.1 : Propriété physique

Propriétés	SN	SN+5%B	SN+10%B
δ_s (g/m ³)	2,54	2,53	2,51
VBS (%)	8,50	8,75	9,75
SST (m ² /g)	177,91	183,14	204,07

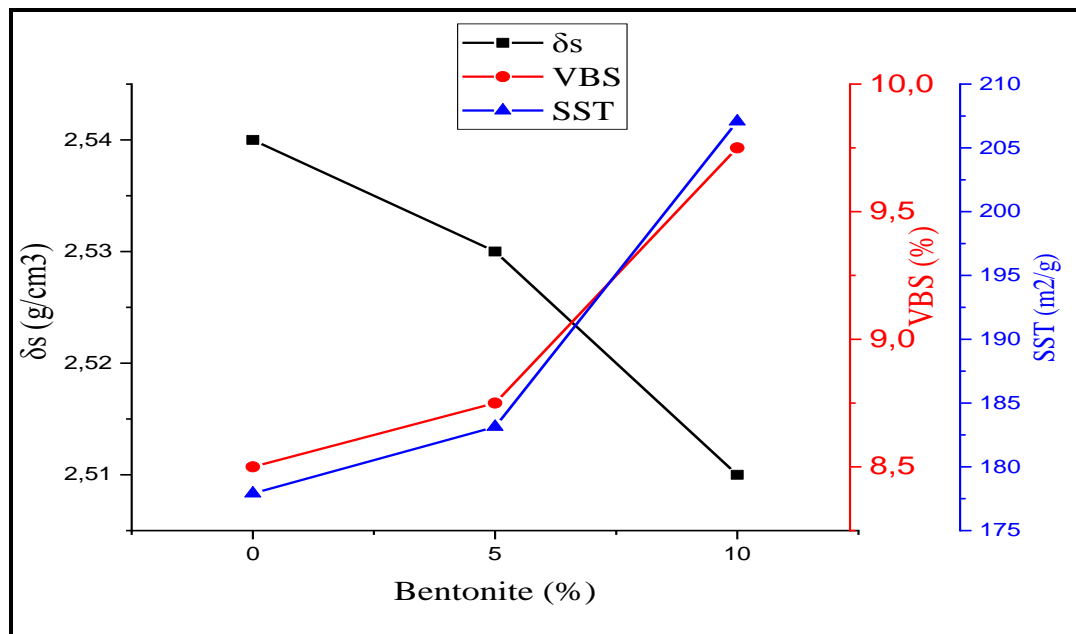


Figure V.2 : variation des propriétés physiques des sols reconstitués

V.5 Résultats des limites d'Atterberg

V.5.1 Effet de la Bentonite sur les limites d'Atterberg

D'après le tableau V.2 ; on constate que la limite de liquidité et l'indice de plasticité augmentent conjointement (figure V.3) avec le pourcentage en bentonite contrairement à l'indice de plasticité qui présente des diminutions, l'histogramme (figure V.4) représente clairement l'évolution des résultats

Tableau V.2 : variation des limites d'atterberg en fonction du % Bentonite

% Bentonite	Limites d'Atterberg		
	Wl(%)	Wp(%)	Ip(%)
0	59,11	27,92	31,19
5	62,56	23,61	38,95
10	67,63	21,90	45,73

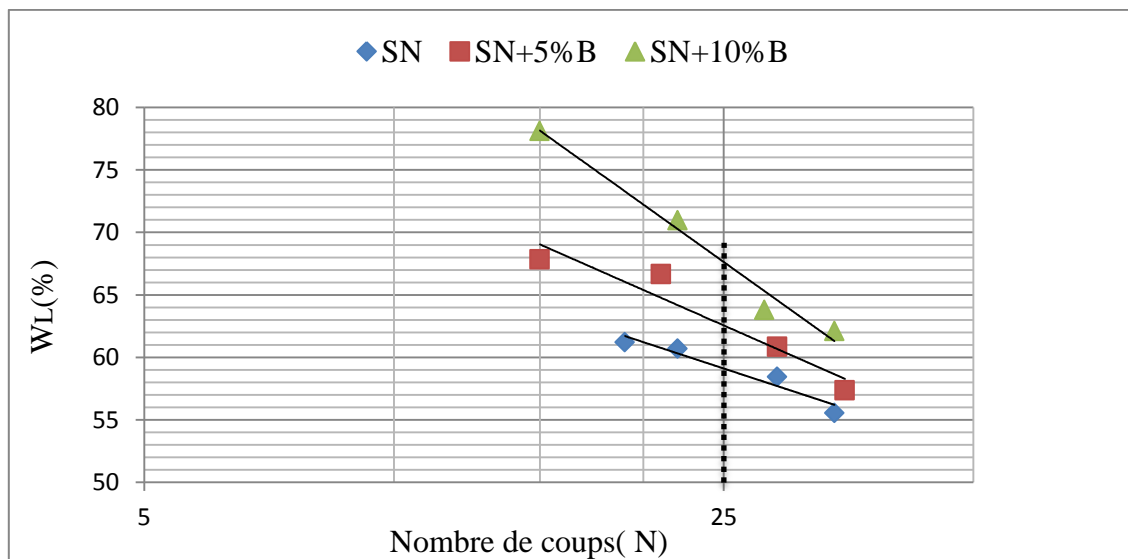


Figure V.3 : limite de liquidité en fonction du pourcentage de bentonite

Les particules de la bentonite présentent une grande affinité pour l'eau qui s'exprime d'une part par la quantité d'eau qu'est susceptible de retenir l'argile et d'autre part par l'énergie avec laquelle cette eau est retenue. Ce phénomène d'ordre capillaire résultant de la

granulométrie fine des particules ainsi que de la présence de charges à la surface des feuillets vont contribuer à accentuer les interactions bentonite-eau.

Le classement des sols reconstitués sur l'abaque (figure V.5), montre que l'ajout de 10 % de bentonite change le caractère physique du sol présentant un potentiel de gonflement moyennement élevé à un potentiel très élevé.

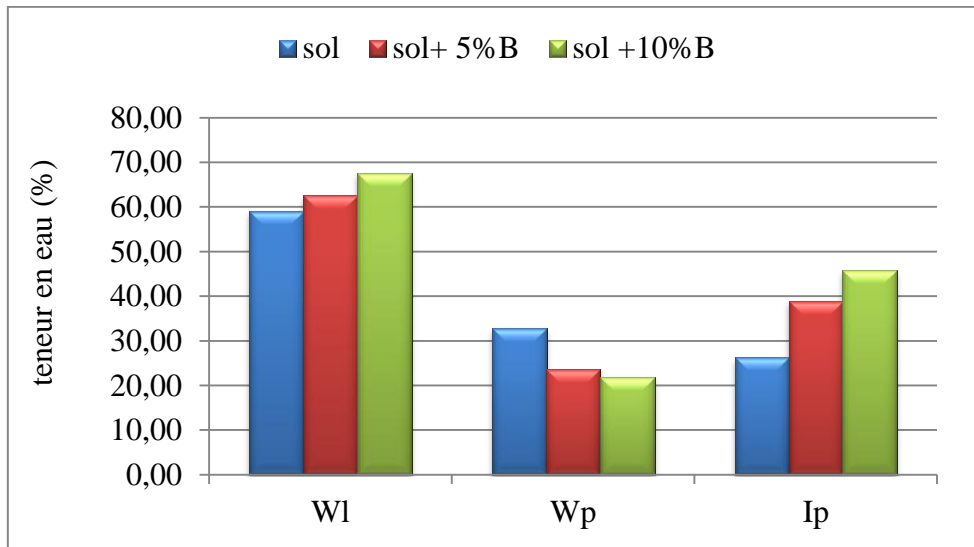


Figure V.4 : histogramme de variation des limites en fonction du pourcentage de Bentonite

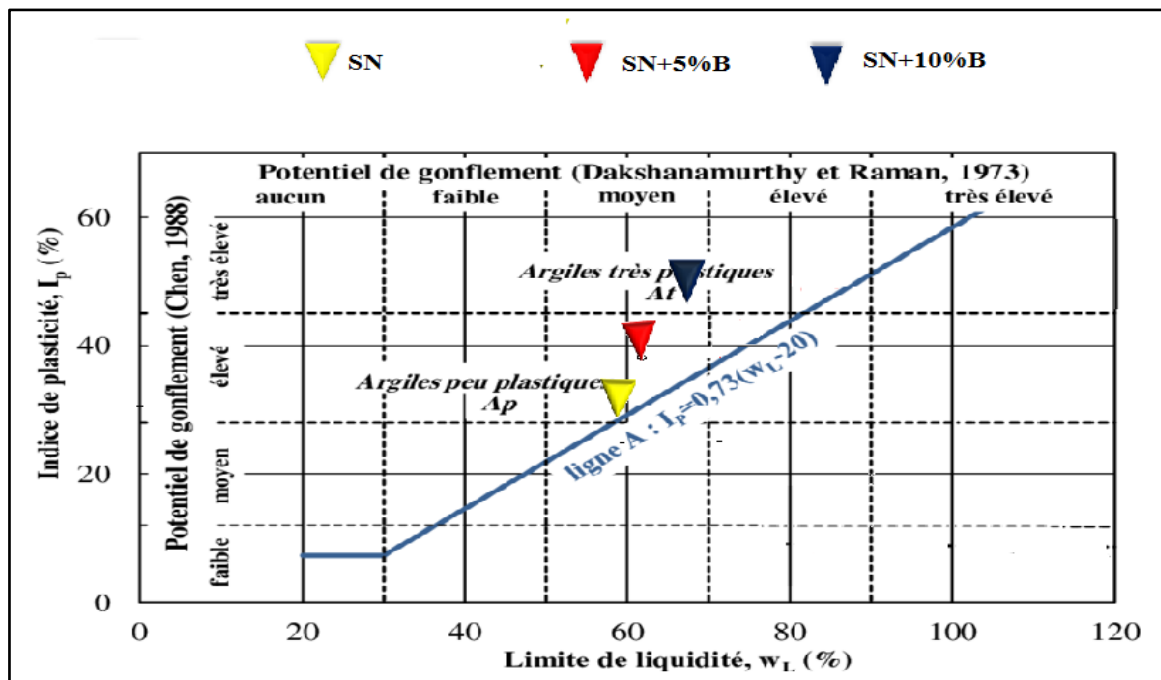


Figure V.5 : Classification des sols fins, diagramme de plasticité

V.6 Analyse granulométrique

L'analyse granulométrique a été faite sur le sol (SN+10%B), le graphe présenté par la figure V.6, montre la même texture argileuse, avec un pourcentage plus élevé en élément argileux (56%). L'abaque de plasticité de Casagrande ; (Casagrande, 1948, et de Mitchell, 1976) (voir chapitre IV§.3.1.6), (figure IV.12) indique que la minéralogie a changé vers la montmorillonite, sachant que la bentonite est constituée essentiellement de 78,4% montmorillonite et 19,6 % d'illite (voir annexe 1). Ce changement est tout à fait prévisionnel.

Tableau V.3 : indice d'activité du sol reconstitué

Sol	% Argiles < 2 μm	Ip	Ac	Type d'argile
SN	51	26,27	0,51	Illites
SN+10%B	56	45,73	0,82	Illites, Montmorillonite

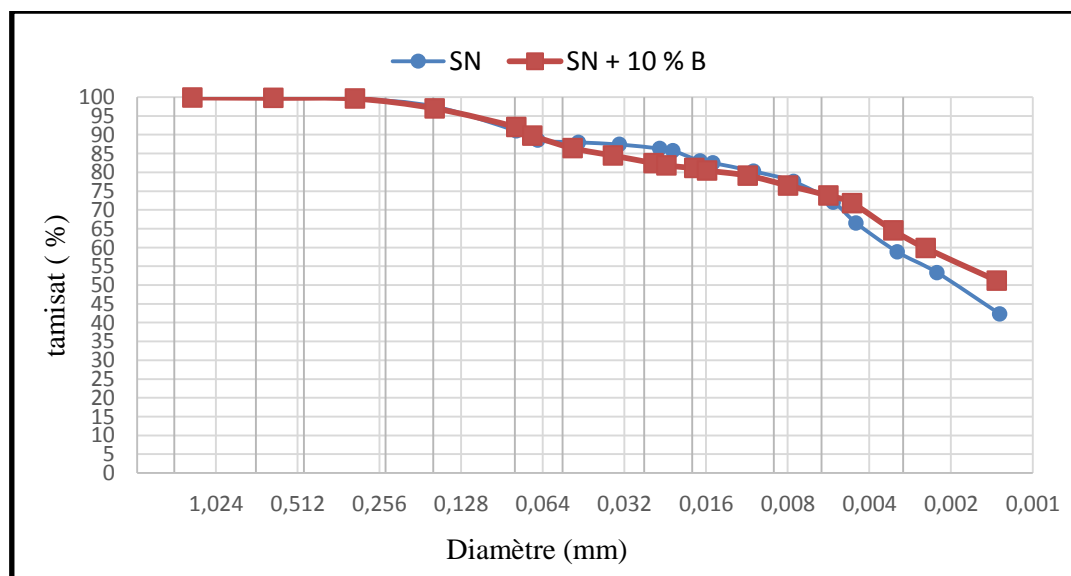


Figure V.6 : Influence de la Bentonite sur la granulométrie du sol

D'après les résultats d'essais effectués sur les sols reconstitués, nous pouvons dire que celui confectionné avec 10 % de bentonite, et le sol qui présente le plus le caractère gonflant, et reste maintenant à entamer la deuxième phase du travail.

V.7 Effet de la chaux sur les limites d'Atterberg

V.7.1 Les processus physico-chimiques provoqué par l'ajout de chaux

Pour expliquer les résultats obtenus en ce qui concerne les limites d'Atterberg et essais mécanique (proctor et oedomètre), il faut comprendre avant le processus physico-chimique après l'incorporation de chaux à un sol humide.

Trois processus physico-chimiques essentiels se produisent : pour (Diamond et Kinter, 1965) le premier (1) concerne l'hydratation et l'ionisation de la chaux ; le second (2) la modification de la capacité d'échange cationique (*CEC*) tous les deux mènent à la floculation/agglomération des particules argileuses (Herzog et Michell, 1963), le troisième (3) c'est le développement des réactions pouzzolaniques : réactions entre la chaux, la silice (SiO_2) et l'alumine (Al_2O_3) contenus dans les particules du sol, créant des produits cimentaires (C-S-H, C-A-H, C-A-S-H) qui lient les particules de sols entre elles (Eades et Grim, 1960; Diamond et al., 1964).

Après avoir laissé le mélange sol-chaux-eau à température ambiante pendant 48 heures, des tests de limites d'Atterberg ont été réalisés. Les résultats (moyenne de deux tests pour chaque pourcentage de chaux) indiquent un changement impressionnant dans les valeurs calculées (tableau V.4).

Tableau V.4: variation des limites d'atterberg en fonction du % chaux

% Chaux	Limites d'Atterberg (SN+10% B)		
	Wl (%)	Wp(%)	Ip(%)
0	67,63	21,90	45,73
2	71,72	45,23	26,49
4	72,24	46,43	25,81
6	69,86	44,81	25,04

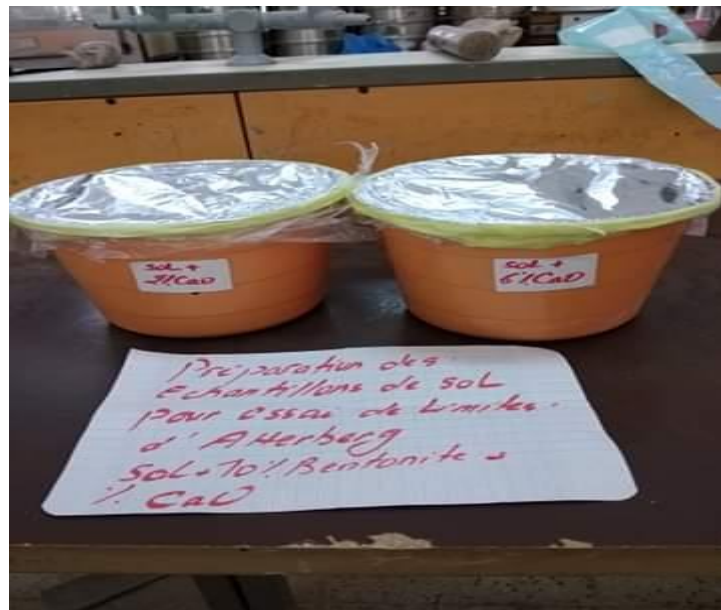


Figure V.7 : préparation des sols pour essai de limite

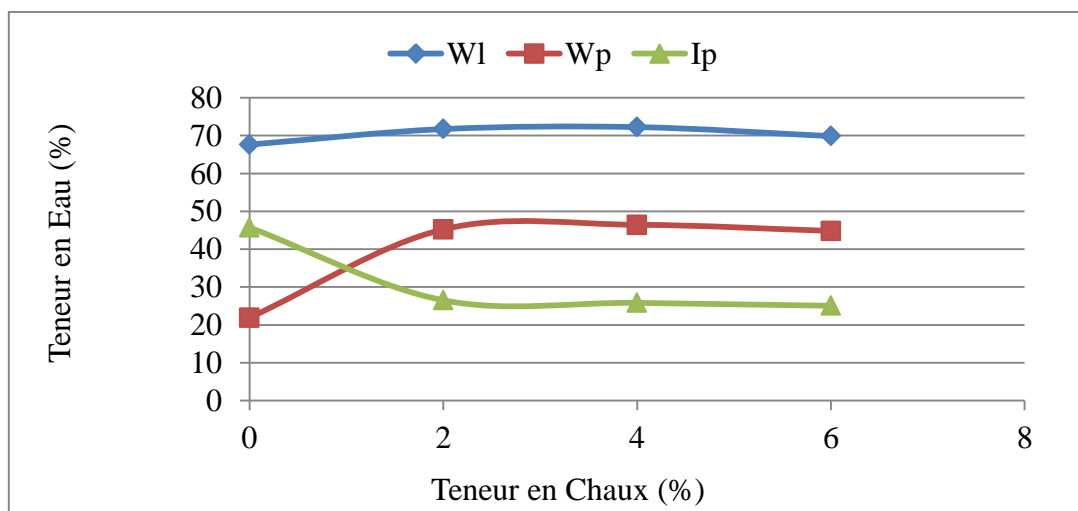


Figure V.8: Relation entre les limites et la teneur en chaux

V.7.2. Effet sur l'indice de plasticité

Le sol reconstruit a présenté une nette amélioration dans la maniabilité et une diminution de l'indice de plasticité après l'addition de la chaux, d'après le figure V.8 ; il est claire que la valeur de I_p est passé de 45,73% à 25,04 % pour 6% de chaux cette évolution a été observé par plusieurs chercheurs qui ont montré la même tendance dans leurs travaux de recherche (Vitale et al, 2017 ; Sakr et al 2009)

Ce comportement peut être attribué à la première et seconde phase du processus des réactions chimiques entre la chaux et le sol menant à la floculation/agglomération des particules argileuses (Al-Mukhtar al 2012 ; Sharma et al 2018).

V.7.3. Effet sur les limites de plasticité et liquidité

L'addition de la chaux conduit à une augmentation importante de la limite de plasticité (WP) du sol pour 2 et 4% de chaux, et une légère diminution pour 6% sans modification significative des limites (WL) et Wp.

Le même résultat est trouvé dans l'étude de Hilt et Davidson (1960). Ces auteurs ont remarqué que l'importance des modifications des limites d'Atterberg ne dépend pas du temps de cure mais du dosage de chaux ajoutée et de la nature du sol traité. Cette constatation peut être reliée aux variations de CEC en fonction de la quantité de chaux ajoutée.

Il faut noter que la minéralogie argileuse du sol reconstitué joue un rôle important dans l'augmentation de limite de plasticité d'argile traitée à la chaux (Bell, 1996) et elle est plus forte pour la montmorillonite.

L'ajout d'un liant au sein du sol provoque une modification de sa teneur en eau. Plusieurs travaux (Dupraz et Zohry, 2007 ; Bell, 1996) ont confirmé que les limites de plasticité et de liquidité des sols augmentent avec le taux de chaux. Toutefois, l'augmentation de la limite de liquidité est moins importante que celle de la limite de plasticité. Celle-ci provoque l'agglomération et la précipitation rapide des matières colloïdales en suspension dans l'eau, ce qui modifie la consistance du milieu et le fait passer d'un état plastique à une structure rugueuse stable.

La représentation des limites sur l'abaque de Casagrande (figure V.9) , montre clairement que le sol naturel classé en tant qu'argile (At) (Argile très plastique) de classe CH (Argile non organique) est reclassé dans la partie des sols limoneux (Lt) très plastique de classe MH (limon non organique) ou OH (argile ou limon organique) au-dessus de la ligne(A), cela veut dire qu'avec ajout de chaux , le sol va acquérir tous les paramètres géotechniques de cette nouvelle classe. On note aussi que les potentiels de gonflement ont diminués pour les trois pourcentages en chaux.

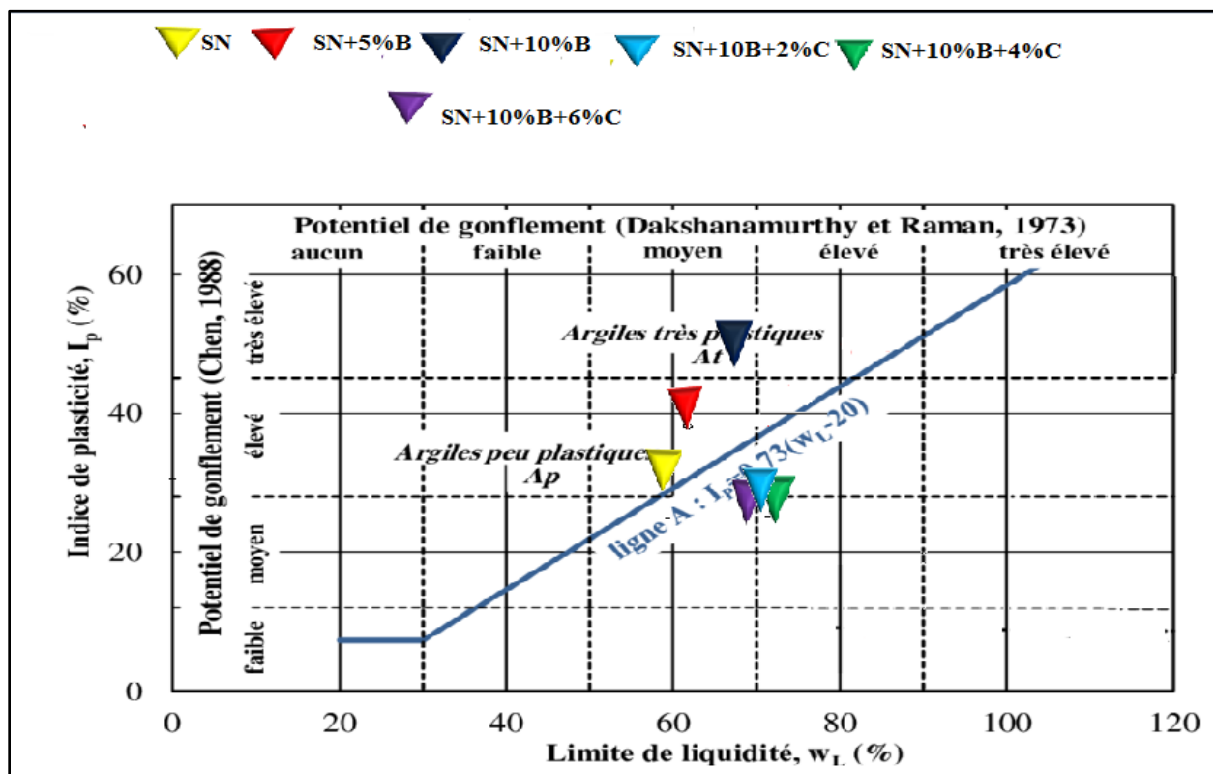


Figure V.9 : Classement des échantillons vis-vis du potentiel de gonflement

V.8 Influence des teneurs en chaux sur les paramètres de compactage

Dans le but de déterminer les caractéristiques de la compactibilité du sol confectionné et l'influence de la chaux sur ces caractéristiques qui sont la densité sèche maximale et la teneur en eau optimale, on fait soumettre le sol traité à différents dosages de chaux à l'essai Proctor normal.

Les échantillons de sol sont préparés et conservés dans des sacs en plastique deux jours à l'avance conformément à la norme NF P94-100. A partir de l'essai Proctor normal, on détermine les caractéristiques optimales du sol reconstitué, traité à 2 et 4 % de chaux.

Pour chaque teneur en chaux, nous avons effectué des essais de compactage, la figure V.10 donne l'évolution de l'optimum Proctor des sols traités.

(Il faut noter que pour des raisons plus fortes que notre volonté nous n'avons pas pu faire l'essai de sol traité à 6% de chaux).

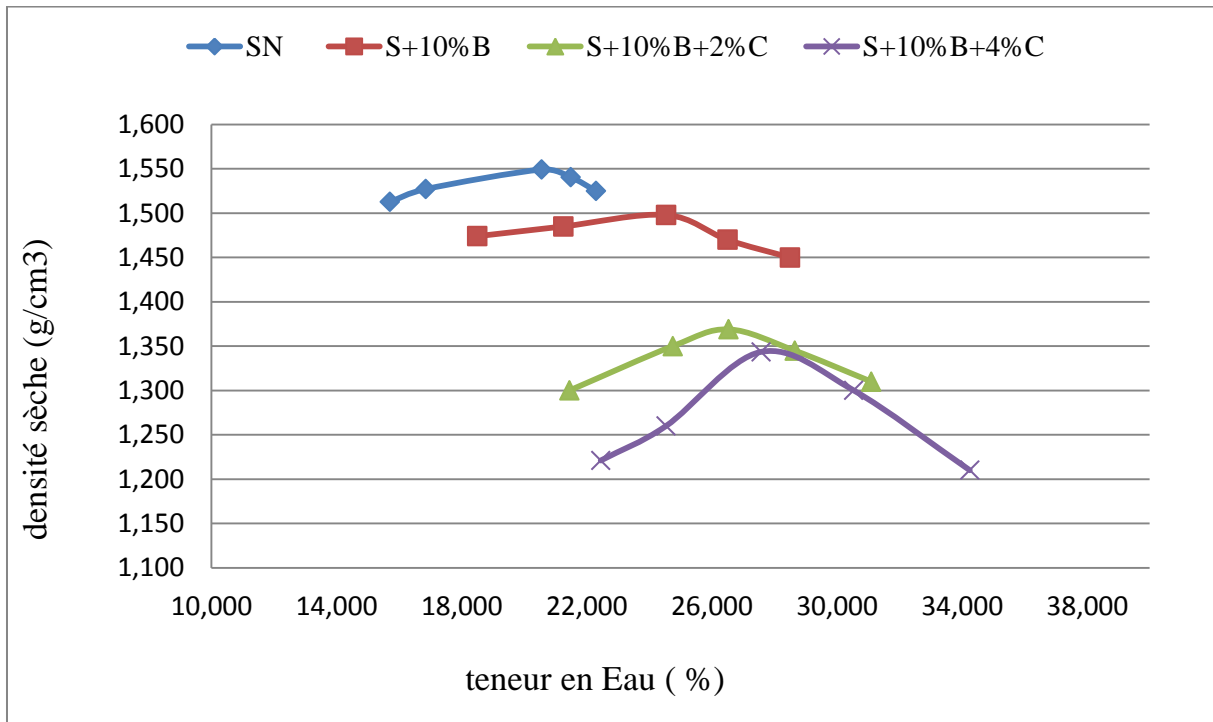


Figure V.10 : Influence de l'addition de chaux sur les courbes de compactage

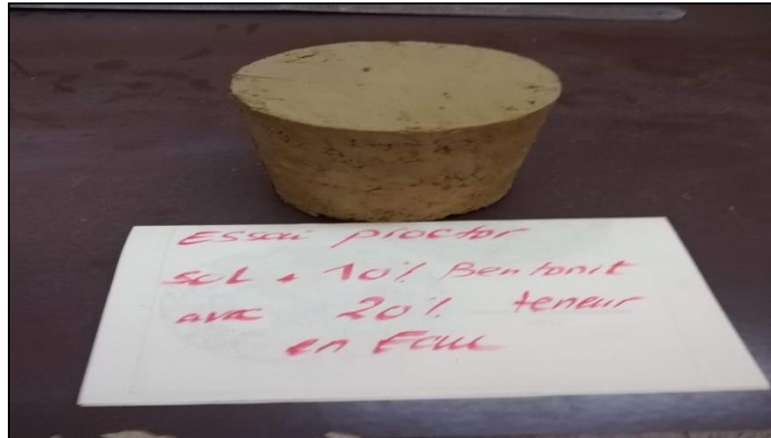


Figure V.11 : préparation des sols pour essai de compactage (Proctor)

Tableau V.5: Relation entre ρ_{dOPN} , W_{opt} et pourcentage en chaux

	% Chaux	ρ_{dOPt} (g/cm ³)	W_{opt} (%)
SN	0	1,549	20,55
Sol+10%B	0	1,498	24,54
	2	1,368	26,54
	4	1,233	38,97

On constate que la chaux fait diminuer le poids volumique sec maximal et augmenter la teneur en eau optimale (w_{OPN}) chose observée par d'autres études (Ormsby, 1973; Brandl, 1981; Osula, 1996).

La diminution de $\rho_{d_{OPN}}$ s'explique par la réorganisation des particules argileuses causée par le phénomène de floculation/agrégation. L'ampleur de ces modifications dépend de la quantité de chaux ajoutée : plus la quantité de chaux ajoutée est importante, plus la teneur en eau optimale est décalée vers les fortes teneurs en eau et plus $\rho_{d_{OPN}}$ est faible. La teneur en eau optimale est passée de 20,55 % à 38,97 % (tableau V.5) et figure V.12;

Mtallib et Bankole (2011) attribuent l'augmentation de w_{OPN} à l'addition de la chaux dans le sol qui exige plus d'eau pour les réactions (l'hydratation, pouzzolanique) avec la chaux, ces réaction génèrent une chaleur provoquant l'effet de séchage et par conséquent une demande en eau.

La teneur en eau optimale du sol traité augmente avec le dosage (figure V.13) permettant au sol d'obtenir une compacité satisfaisante à l'état relativement humide. Grâce au traitement à la chaux, la capacité portante du sol est améliorée immédiatement.

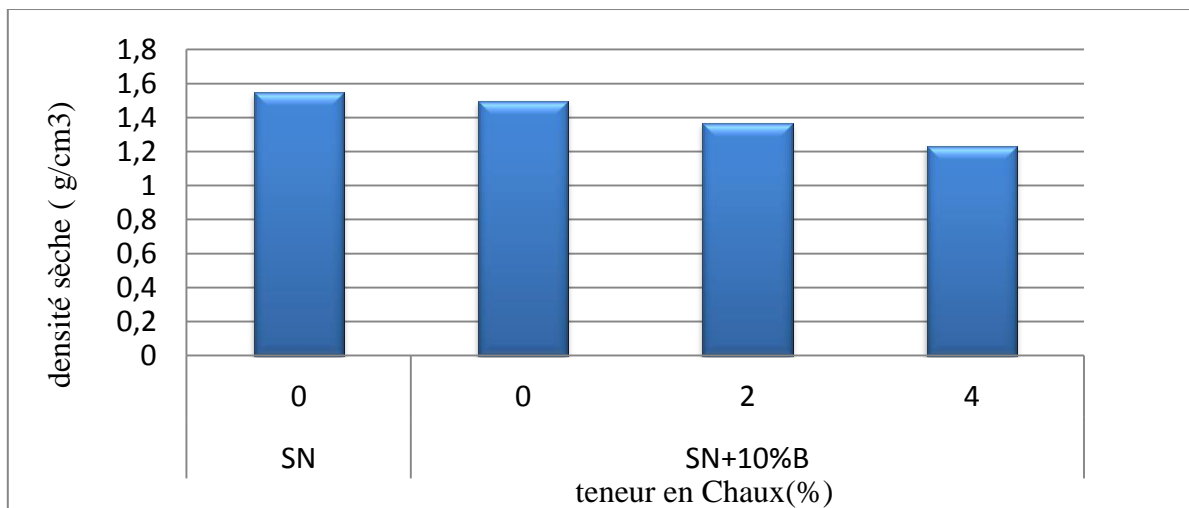


Figure V.12 : histogramme Relation entre la densité sèche et le pourcentage en chaux

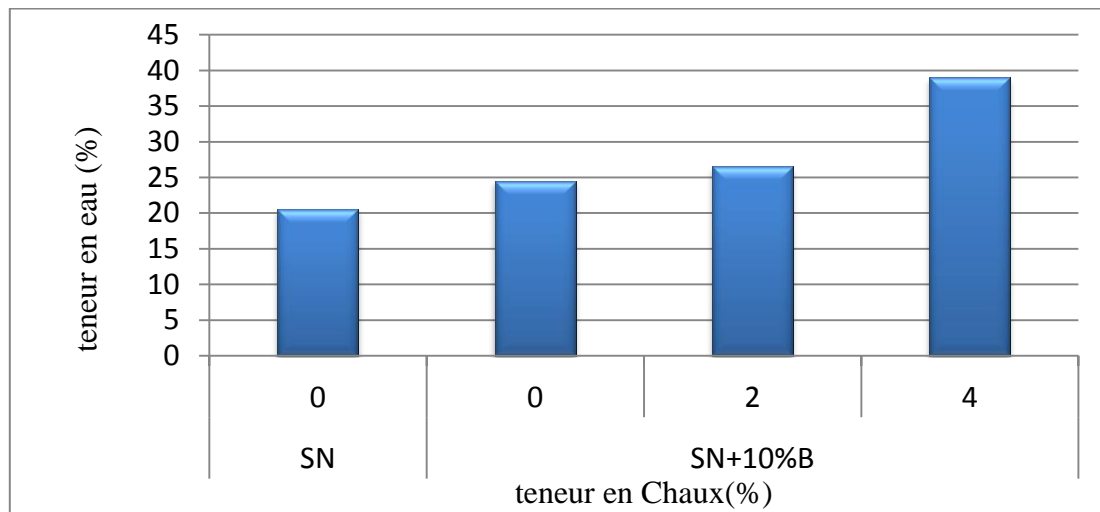


Figure V.13 : histogramme Relation entre $W_{opt}(\%)$ et pourcentage en chaux

L'agglomération par floculation des particules argileuses sous l'action de la chaux modifie très rapidement les paramètres géotechniques du sol considéré :

- Diminution de l'indice de plasticité
- Augmentation de l'indice portant immédiat
- Diminution de la densité de l'optimum Proctor et augmentation de la teneur en eau optimale.

V.9 Essai œdométrique

Dans un sol avec une teneur en argile élevée, le gonflement des particules d'argile peut s'opposer à la diminution du volume, or une augmentation de la contrainte verticale appliquée est nécessaire pour réduire ce gonflement.

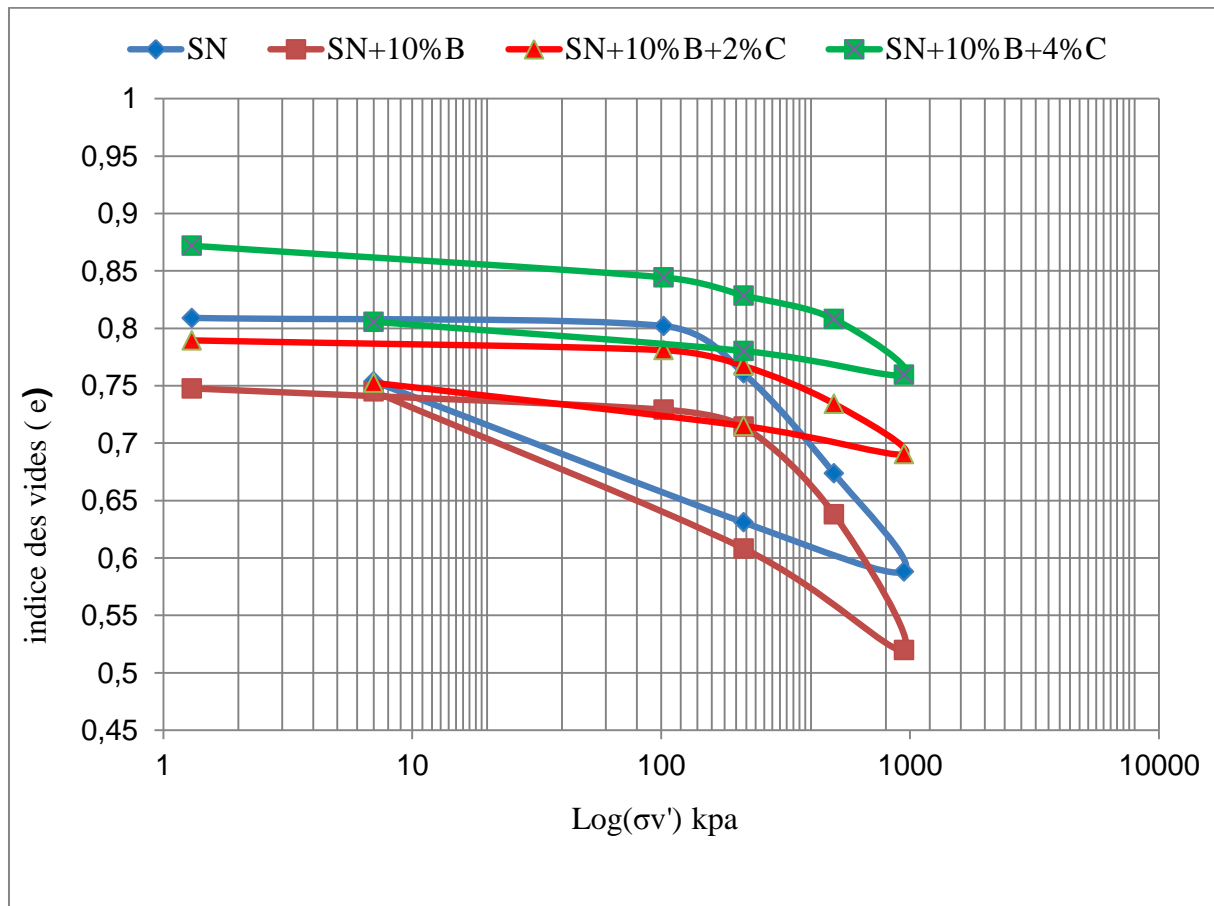
Les éprouvettes de sol pour l'essai œdomètre sont taillées des éprouvettes préparées pour essai Proctor mélangées chacune à leur optimum en eau et densité séché ; la figure qqq présente la courbe œdométrique des sols.

A partir de ces courbes (figure V.14), on peut déterminer les coefficients de gonflements et de compressibilités des sols et la pression de consolidation. Le tableau V.6 regroupe toutes valeurs calculées pour les différents pourcentages de chaux.

Tableau V.6: résultats d'essai de compressibilité

	SN	SN+10%B	SN+10%B+2%C	SN+10%B+4%C
Cc	0,304	0,421	0,157	0,173
Cg	0,083	0,092	0,025	0,017
σ_v' (kpa)	164,60	256	329	502

On peut remarquer que la pression de pré-consolidation augmente avec l'augmentation de la teneur de chaux. Ceci est le résultat d'une réaction pouzzolanique avec la chaux. Cela implique que le sol stabilisé sera capable de résister à une pression accrue sans se tasser à une teneur plus élevée. Cette pression a augmenté de près 22 % pour 2% et 49 % pour 4% de chaux, par rapport au sol mélangé avec bentonite.

**Figure V.14 :** Courbes graphiques d'essai de compressibilité des sols

La figure V.15 représente l'évolution des indices de compressibilité et de gonflement. Comparativement au sol non traité, la compressibilité du sol traité à la chaux est plus faible. On constate une diminution immédiate de l'indice de compressibilité et de gonflement avec l'ajout de chaux. Pour l'échantillon traité avec 2% de chaux, l'indice de compressibilité subit une diminution d'environ 37,5 % par rapport au sol (SN+10%B), avec une très légère réduction de l'indice de compressibilité pour 4%. Parallèlement, l'indice de gonflement à son tour une réduction d'environ 72,8 % et 81,5 % pour un dosage en chaux de 2% et 4%, respectivement. Cela est dû principalement à la réaction d'échange cationique.

Tableau V.7: Classement des sols traités selon leurs indices de compressibilités et indices des vides

	Cc	e₀	Cc/ (1+e₀)
SN	0,304	0,819	0,167
SN+10%B	0,421	0,785	0,236
SN+10%B+2%C	0,157	0,763	0,089
SN+10%B+4%C	0,173	0,766	0,098

En effet, le calcium libre de la chaux s'échange avec les cations adsorbés du minéral argileux permettant aux particules d'argile de se rapprocher les unes des autres, entraînant une floculation/agglomération des particules d'argile qui transforme l'argile en un matériau plus granulaire (Basma et Tuncer , 1990) ; Khattab ,2002 ; Bourokba et al ,2015).

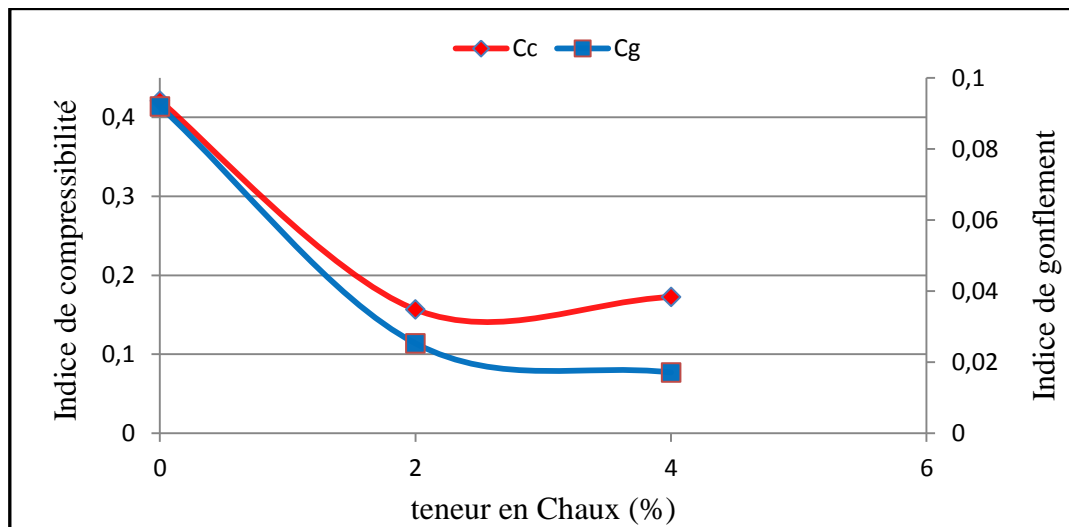


Figure V.15 : évolution des indices de compressibilité et gonflement

On conclusion de cet essai, on note que chaux conduit d'abord à la formation d'agglomérats (floculation et agrégation des argiles), puis à la précipitation de phases hydratées qui cimentent les agglomérats déjà formés pour donner une masse plus rigide conduisant également à réduire le gonflement.

V.10 Conclusion

Il ressort des résultats présentés à travers les différents essais fait, que le sol prélevé répondait peu aux conditions exigées au départ de ce travail , à savoir un sol très gonflant qui nous permettrai d'évaluer l'effet d'addition de la chaux sur la stabilité ; sur ceux nous avons reconstitué un sol avec 10% de bentonite , les résultats obtenus ont montré que l'ajout de bentonite a modifié le sol de peu compressible à très compressible.

Du fait, l'utilisation de la chaux (2 et 4 %) a montré l'efficacité de procédé de traitement et 4% chaux est mieux adapté pour stabiliser le sol reconstitué.

Conclusion générale

Plusieurs méthodes d'amélioration des sols gonflants ont été développées ces dernières définies ; elles sont devenues le procédé essentiel dont dispose l'ingénieur pour résoudre les problèmes de stabilité ou de déformations qu'il rencontre lors de l'élaboration d'un projet. Nous citons comme exemple la stabilisation mécanique (compactage , sable) , chimiques(ajout de ciment , chaux , cendre volante..) et par injection.

IL faut noter que la stabilisation chimique est la plus utilisée , notamment avec ajout de chaux qui a donné des résultats très prometteurs, néanmoins ; il reste que ces derniers restent plus au moins différents en ce qui concerne le pourcentage de chaux à ajouter pour avoir une meilleure stabilisation, cette variance vient du fait que les minéraux argileux étudiés sont très différents vis-à-vis de leurs paramètres géotechniques.

L'application de la chaux peut améliorer considérablement les propriétés mécaniques. Il y a essentiellement deux formes d'amélioration : la modification et la stabilisation. L'utilisation de la chaux peut modifier presque tous les sols à grain fin, dans une certaine mesure, mais l'amélioration la plus spectaculaire se produit dans les sols argileux de plasticité modérée à élevée.

Ce travail a pour but d'étudier en marge des études faites, l'influence d'ajout de chaux vive sur un sol proprement reconstitué au laboratoire. La méthodologie suivie pour réaliser cette étude se divise en trois parties :

- Etude du sol prélevé du site à Sidi-Belattar (w Mostaganem) : identification des paramètres géotechniques : limite, texture , minéralogie , compressibilité et potentiel de gonflement,
- Reconstitution d'un sol au laboratoire : la condition de reconstitution d'un sol se pose sur les résultats trouvés et qui devaient répondre aux exigences ultimes posées à savoir : un sol ayant une plasticité, potentiel de gonflement et indice de compressibilité très élevé. Sur ceux; nous avons trouvé que 10 % de bentonite est le pourcentage idéal pour y arriver
- Etude de l'effet d'ajout de chaux à 2,4 et 6% sur le sol reconstitué

D'après les résultats obtenus, nous avons trouvé ; que ajout de chaux modifie les caractéristiques physico-chimiques des argiles traitées et réduit leur capacité d'adsorption. Le traitement réduit l'indice de plasticité. La densité sèche maximale diminue en fonction de l'augmentation du pourcentage ajouté,

La modification survient principalement en raison de l'échange de cations calcium apportés par la chaux et des cations normalement présents absorbés à la surface de l'argile. La modification découle aussi la minéralogie de la surface argileuse est altérée lorsqu'elle réagit avec les ions de calcium pour former des produits cimentaires. Il en résulte une réduction de la plasticité et du gonflement ainsi que de la capacité de rétention de l'humidité, et une plus grande stabilité.

En conclusion L'utilisation de la chaux est un moyen efficace pour modifier les sols. Elle améliore à la fois la maniabilité et les capacités portantes tout en augmentant la stabilité et l'imperméabilité.

Perspectives

A la lumière des conclusions exposées précédemment, nous recommandons quelques perspectives et axes de recherches suivants

- Utilisation d'autres types d'ajouts disponibles en Algérie dans la stabilisation des sols gonflants.
- Pour l'utilisation de l'une ou de l'autre méthode de stabilisation, il faut penser à des techniques pratiques de mise en œuvre sur le site afin d'assurer la continuité entre les recherches faites aux laboratoires et leurs réalisations in situ.

Références Bibliographiques

- **ALLAM.O, (2011)** : «Etude au laboratoire de l'influence des sels sur la pression de gonflement des marne», mémoire de magister université de TLEMCCEN, Algerie.
- **Al-Mukhtar, M., Khattab, S. and Alcover, J. (2012)**, Microstructure and geotechnical properties of lime-treated expansive clayey soil, *Engineering Geology.*, Vol. 139-140, pp. 17–27.
- **ALSHAWABKEH, A. N. (2001)**. Basics and application of electro kinetic remediation. Handouts prepared for a short course. Federal University of Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.
- **AZZOUZ F.Z(2006)**. « Contribution à l'étude de la stabilisation chimique de quelques argiles gonflantes de la région de Tlemcen ». Thèse de magister, université Aboubakr Belkaid, Tlemcen, Algérie.
- **BASMA A.A, TUNCER E.R. (1990)**. « Effect of lime on volume change and compressibility of expansive clays ». *Transportation research record*. n° 1295, pp 52 – 61.
- **BATOUCHEK H., (2010)**. Intercalation de liquides ioniques dans les argiles. Pour l'obtention du diplôme de magistère Université de constantine.p8.
- **BENGRAA.L (2004)**. « Contribution à l'étude de la stabilisation du gonflement par ajout de sable, application aux sols d'Oran ». Mémoire de magister .U.S.T.Oran, soutenue le 21.06.2004.102p.
- **BENGUENEB . A (2009)** ; thèse de magister en génie civil : Etude du gonflement des sols actifs sous différentes conditions de salinité.
- **BOLT, G.H., (1956)** *Physico-Chemical Analysis of the Compressibility of Pure Clays*. *Géotechnique* 6, 86-93.
- **BOUROKBA, S. A., HACHICHI, A., SOULI, H., TAIBI, S., AND FLEUREAU, J.-M. (2015)**. « Effect of lime on some physical parameters of a natural expansive clay from Algeria ». *European Journal of Environmental and Civil Engineering*. 10.1080/19648189.2015.1093963.

- **BRANDL, H. (1981).** Alteration of soil parameters by stabilization with lime. Actes de la 10^{ème} Conférence Internationale sur la Mécanique des Sols et les Fondations, Stockholm, Suède, 587-594
- **BRE Building Research Establishment, (1980).** The effect of a roof on a fire within a building. IP 3/80.
- **CAILLERE, S., HENIN, S., RAUTUREAU, M. (1982).** Minéralogie des argiles: Structure et propriétés physico-chimiques, Masson, 2^e Ed., 184p
- **CHEN.F.H (1988).** Foundations on expansive soils». Developments in Geotechnical Engineering, Vol 54, Elsevier Publishing Co. Amsterdam, 464 pages.
- **CHOSSET, J. C. (2005).** La mesure de la conductivité hydraulique dans les sols. Choix des méthodes. Ed, Lavoisier TEC et Doc, 713p.
- **COLL C , (2005)** « Endommagement des roches argileuses et perméabilité induite au voisinage d'ouvrages souterrains». Thèse de doctorat, université Joseph Fourier, Grenoble, France.
- **DARDAINE M., LAJUDIE A. (1985).** Gonflement et pression de gonflement d'argiles compactées, Note technique C.E.A, SESD/85.18
- **DELAGE P., CUI Y.J. (2000).** Comportement mécanique des sols non saturés, Techniques de l'ingénieur, traité construction, C 301-1, 20 pp.
- **DJEDID. A (2005)** « L'identification des sols gonflants : pour une démarche unifiée. 2^{ème} JESG.
- **DIAMOND, S., ET KINTER, E. B. (1965).** Mechanism of soil-lime stabilization. An interpretative review, Presentation at the 44th Annual Meeting, Highway Research Board. Washington.
- **DIAMOND, S., WHITE, J. L., ET DOLCH, W. L. (1964).** Transformation of clay minerals by calcium hydroxide attack. Proceedings, 12th National Conference on Clays and Clay Minerals, 359- 379.
- **DUCHAUFOR, P. (1983).** Pédologie 1 : Pédogenèse et classification : Constituants et propriétés du sol. Éditions Masson, Paris., 459p.
- **DUPRAZ J., ZOHRY M.(2007),** Apports de la technique de traitement de sols argileux et limoneux à la chaux. 7^{ème} édition du Congrès National de la Route, 9-10 novembre 2007, Ouarzazate, Maroc.

- **EADES, J. L., ET GRIM, R. E. (1966).** A quick test to determine lime requirements for lime stabilization. Highway Research Board Bulletin , n°139, 61-72.
- **ESLINGER, E., Pevear, D.R. (1988).** Clay minerals for petroleum geologists and engineers (No. 22). Sepm Society for Sedimentary.
- **BELL F. G; (1996),** Lime stabilization of clay minerals and soils. Engineering Geology, Vol. 42, (1996), pp 223-237
- **FERRAH. F. (2006).** Prise en compte du gonflement pour le dimensionnement des fondations superficielles. Thèse de magister, Université de Batna, Batna, Algérie.
- **GOOGLE :** Source : http://tice.inpl-nancy.fr/modules/sciences_techniques/Proprietes-Meca-Sols/chap7/formes.html
- **GOUY G. (1910) :** « Sur la constitution de la charge électrique à la surface d'un électrolyte >>. Annue physique, Paris, vol. 9, pp. 457-468.
- **GUEDDOUDA.K. (2005).** « Stabilisation des argiles gonflantes par ajout de sable de dunes; Cas : Région de Laghouat ». Thèse Magister soutenu le 14/06/2005. 136 pages
- **GUEDDOUDA.K ET AL(2007).**«Caractérisation et stabilisation des sols expansifs. Colloque. Tunisie pp 27-34
- **HACHICHI.A. (2006).** « Étude du comportement hydromécanique et de la stabilisation des sols gonflants de la région d'Oran. » Thèse Doctorat d'état 129 p.
- **HACHICHI. A, BOUROKBA .S.A, BENAÏSSA A., J.M, M. HATTAB, HATTAB**
- **HAFSI. A (1993).** « Théories de la double couche et gonflement des argiles non saturées » Euromech colloquium N°209: Mechanics of swelling, Rhodos, Greece, August 23- 27 .1993.
- **HARAS NATIONAUX (2004).** Fiche techniques génie hippique. Novembre 2004
- **Hilt, G. H., et Davidson, D. T. (1960).** Lime fixation on clayey soils. Highway Research Board Bulletin 262, 20-32.
- **HUIDI, JI., HASHEM, M., Eliot, F., John, D., (2006).** «Kinetics of thermally induced swelling of hydrogels». International Journal of Solids and Structures 43.pp: 1878–1907.
- **HERZOG, A., ET MICHELL, J. K. (1963).** Reactions accompanying stabilization of clays with cement. Highway Research Record, No. 36, 146-171.
- **H. VAN OLPHEN (1977):** An Introduction to Clay Colloid Chemistry, 2nd Ed. John Wiley & Sons, New York, London, Sydney, Toronto 1977. 318

- **JENNINGS J.E.B & KNIGHT K (1957)** : « The prediction of total heave from double oedometre tests ». Symposium on Expansive Clays, South African Institute of Civil Engineers, Johannesburg, vol. 9, pp. 13-19.
- **JUMIKIS, A.R. (1984)**, 'Soil Mechanics', Robert E. Publishing Company, Florida Krieger.
- **KANOURI R et LABIDE A., 2013**. Adsorption du phénol sur la bentonite de Maghnia. Pour l'obtention du diplôme de magistère, université kasdi merbah ouargla.p7.
- **KHATTAB S. A. (2002)**. « Etude multi-échelles d'un sol argileux plastique traité à la chaux ». Thèse de doctorat Université d'Orléans, 224 pages.
- **LEFEVRE I. & LAJUDIE A. (1987)** : « Détermination des capacités d'échange des argiles. Corrélation avec certaines propriétés physico-chimiques ». Note technique C.E.A., SESD/87.11.
- **LUCKHAM, P.F., Rossi, S., (1999)** «Colloidal and rheological properties of bentonite suspensions». Adv. Colloid Interface Sci, 82, 43-92.
- **Mtallib, M., et Bankole, G. (2011)**. The Improvement of the Index Properties and Compaction Characteristics of Lime Stabilized Tropical Lateritic Clays with Rice Husk Ash (RHA) Admixtures. EJGE Vol. 16 [2011], Bund. I, 983-996.
- **MENAD Kamal (2008)**: thèse de magister en génie civil 2008, traitement des barrières hydraulique par la chaux (investigation hydraulique).
- **MITCHELL, J.K., Soga, K. (2005)**. Fundamentals of soil behavior, (3rd Edition).John Wiley & Sons Inc, New York,USA
- **MOREL, R. (1996)**. Les sols cultivés. 2eme édition. Edition Lavoisier. Paris, France.
- **MOURROUX P., MARGON P. et PINTE J.C. (1988)** : « La construction économique sur les sols gonflants : Manuels et méthodes ». Vol. 14, BRGM, France.
- **Ormsby, W. C. (1973)**. Strength Development and reaction products in lime treated montmorillonite water system. Public Road Research , vol. 37, n°4, 136-148.
- **Osula DOA (1991) Lime modification of problem laterite. Eng Geol 30:141–154**
- **PARCEVAUX, P. (1980)**. Etude microscopique et macroscopique du gonflement des sols gonflants. Thèse de docteur-ingénieur en géologie de l'ingénieur, Université Pierre et Marie - Curie et École nationale Supérieure des Mines de Paris.
- **PHILIPPONNAT, G. (1979)**. Fondations et ouvrages en terre. Éditions Eyrolles, Paris, 401 pages.

- **PROBSTEIN, R.F., Hicks, R.E. (1993).** Removal of contaminants from soils by electric field. *Science*, 260, 498–503.
- **RAHAMAN, M.A. (1976),** “Review of the Basement Geology of Southwestern Nigeria”, In “Geology of Nigeria”, Elizabeth Publishing Company, Nigeria: pp. 41-58
- **RAHMAN M. A.,** Effects of cement-lime mixes on Lateritic soils for use in highway construction. *Building and Engineering*, Vol. 22, No.2, pp141-145.
- **ROBERT. A et D. FABRE. (1987) :** « Rapport sur le gonflement ». Comité Français de Mécanique des Roches, Groupe de travail : Rupture en souterrain.
- **Sakr, M.A., Shahin, M.A. and Metwally, Y.M. (2009),** Utilization of Lime for Stabilizing Soft Clay Soil of High Organic Content, *Geotech Geol Eng.*, N° 27, pp.105-113.
- **SAIYOURI N. (1996).** Approche microstructurale et modélisation des transferts d’eau et du gonflement dans les argiles non saturées, Thèse doctorat, Ecole Centrale Paris, 228 pp
- **SEED, H.B, R.J.WOODWARD ET R.LUNDGREN. (1962).** « Prediction of swelling potential for compacted clays ». *Journal of the soil Mechanics and foundations division*, ASCE, vol.88, n° SM4, 1962, p.107-131.
- **SHARMA, L.K., SIRDESAI, N.N., SHARMA, K.M. AND SINGH, T.N. (2018),** Experimental study to examine the independent roles of lime and cement on the stabilization of a mountain soil: A comparative study, *Applied Clay Science.*, Vol. 152, pp. 183-195.
- **S.TAIBI (2009) :** 19 ème Congrès Français de Mécanique Marseille, 24-28 août 2009: Etude des phénomènes retrait- gonflement et stabilisation des sols gonflants de la region d’Oran.
- **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.
- **TERZAGHI, K. AND PECK, R.B. (1948)** *Soil Mechanics in Engineering Practice.* John Wiley.
- **TESSIER D. (1990).** Organisation des matériaux argileux en relation avec leur comportement hydrique, dans *Decarreau A : Matériaux argileux, structure, propriétés et applications*, Paris, Soc. Fr. Min. Cristall., pp. 387-445

- **VELDE, B., (2013)** «Origin and mineralogy of clays: clays and the environment». Springer Science & Business Media.
- **VITALE, E., DENELEE, D., PARIS, M AND RUSSO, G. (2017)**, Multi-scale analysis and time evolution of pozzolanic activity of lime treated clays, Applied Clay Science., Vol. 141, pp. 36–45
- **WAKIM. J. (2005)** : « influence des solutions aqueuses sur le comportement mécanique des roches argileuses ». Thèse de doctorat, Ecole des mines de paris, Paris, France.
- **WILLIAMS A.B, Donaldson G.W. (1980)** Developments related to building on expansive soils inSouth Africa: 1973-1980. Proceedings of the 4th International Conference on Soil Mechanics and Foundations Engineering, Denver, vol. 2, 834-844
- **YONG, R.N., Warkentin, B.P. (1966)**. Introduction to soil behavior. 1st edition. Macmillan, New York, USA, 451p.
- **ZENKHRI. A, (2010)**, « Solutions de construction sur sol potentiellement gonflant application à la région d’In-Aménas », Thèse présentée pour obtenir le diplôme de magister en Génie Civil spécialité géotechnique, Université Houari Boumediene.

Annexe 1

Fiche technique de la Bentonite

- Densité : 2.4 g/cm³
- Humidité : 9.5 %
- Capacité d'échange cationique : CEC : 63.5 (meq/100g)
- PH 25°C : 8.5
- Indice de gonflement IG : 17.2 ml de gel
- Caractéristique minéralogique par diffraction RX :

Minéraux argileux		Minéraux non argileux				
Illite	Montm.	Quartz	Calc.	Dolm.	Felds	Sidér.
19.6	78.4	02	Tr	-	Tr	Tr

- Caractéristique chimique élémentaire :

SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	Na ₂ O ₂	K ₂ O	MgO	MnO
49.30	11.25	1.70	2.29	1.45	0.50	0.028

- Fluorescence des rayons X :

Elément en TS :

SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	MnO	Na ₂ O ₂	K ₂ O	P ₂ O ₅	TiO ₂	Cr ₂ O ₃	SO ₃
67.14	11.65	1.96	1.54	1.51	0.018	2.01	1.55	0.032	0.142	0.007	0.06

Elément en T1 :

ZrO ₂	SrO	Rb ₂ O	PbO	ZnO	CaO	NiO	BaO	Cl	PAF
0.0463	0.0419	<0.001	0.0017	0.0147	0.0036	0.0064	0.1111	-	13.50

- Paramètre rhéologique et de filtration :

VA (cP)	VA (cP)	YV (Lb/100ft ²)	YP/VP	Filtrat (cc/30mn)
7.5	5	5	1	29

Source : Laboratoire du CRD SONATRACH Boumerdès, Janvier 2001

Echantillon de référence MOS10

Annexe 2

Fiche technique de la chaux

Caractéristique	Spécification
Forme	Poudre
Couleur	Blanc
Odeur	Inodore
Point de fusion	> 1000°C
Masse volumique absolue à 20°C	2.5 à 2.8 g/cm ³
Masse apparente absolue à 20°C	0.6 à 0.8 g/cm ³
% de chaux en CAO	90 : 95
Solubilité dans l'eau	Jusque 1.5 g/l à 20°C
Acide insoluble %	1.0 (max)
Magnésie MGO %	1.0 (max)
Oxydes métalliques Fe ₂ O ₃ et Al ₂ O ₃ %	0.15 (max)
Perte au feu	3.0 (max)
Réactivité	400 ml
Luminosité	> 80
Densité	≤ 3.350 g/ml
PH	8.0-10.0
Activité	360-420ml
Taux de combustion	> 90%
Les tailles	0 - 10mm 10 - 25mm 25 - 60mm 60 -150mm
Inflammabilité	Ce produit n'est pas inflammable
Propriétés explosives	Non explosif
Granulométrie	
De 20 à 30% de fines < 5µm	

Annexe 3

LES NORMES

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

NF EN 12879-2000 : « Détermination de la teneur en matière organique. Méthode de perte au feu ».

NF P94-050 (décembre 1995) : « Détermination de la teneur en eau pondérale des matériaux. Méthode par étuvage ».

NF P94-051 (mars 1993) : « Détermination des limites d'Atterberg. Limite de liquidité à la coupelle- limite de plasticité au rouleau ».

NF P94-056 (mars 1996) : « Analyse granulométrique des sols. Méthode par tamisage à sec ».

NF P94-057 (mai 1992) : « Analyse granulométrique des sols. Méthode par sédimentation ».

NF P94-068 (octobre 1998) : « Détermination de la valeur de bleu de méthylène ».

NF P94-093 (octobre 1999) : « Détermination des références de compactage d'un matériau. Essai Proctor normal ».

XP P 94-090-1 (décembre 1997) : « Essai Œdométrique. Essai de compressibilité sur matériaux fins quasi-saturé avec chargement par palier »

XP P94-041 (décembre 1995) : « Identification granulométrique. Méthode de tamisage par voie humide ».

NF P94-054 :L'essai de pycnomètre.

NFP94-048 : Teneur en calcaire (CaCO₃).