

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة غرداية
Université de Ghardaïa

N°d'enregistrement

/...../...../...../...../.....



كلية العلوم والتكنولوجيا
Faculté des Sciences et de la Technologie

قسم الري والهندسة المدنية
Département de Hydraulique et Génie civil

Mémoire de fin d'étude, envue de l'obtention du diplôme

Master

Domaine: Sciences et de la Technologie

Filière: Génie civil

Spécialité: Structures

Thème

**STABILISATION DES ARGILES GONFLANTES PAR AJOUT DE
SABLE CALCAIRE
CAS: Argile EL MENIA (TAGHIT).**

Réalisé par :

FENNICHE Mohamed El Fateh

SOUDANI KOUTAIBA

Déposé le 29/06/2022.

le jury composé de:

DAHEUR Elhadj Guesmia	M.C.A	Université Ghardaïa	Examineur
Nessil abd el hamide	M.A.A	Université Ghardaïa	Examineur
M. CHERIF Miloud	Ecole doctorale	Université Laghouat	Encadrant

Année universitaire 2021 / 2022

Dédicaces

À l'âme pure de mon père

A ma chère maman et mes frères

A toute ma famille

A tous ceux qui ont contribué à ce travail

A mon collègue dans ce travail et à tous les professeurs

Et à tous ceux qui croient en Dieu.

FENNICHE Mohamed EL Fateh

À mon père

A ma chère maman et mes frères

A toute ma famille

A tous ceux qui ont contribué à ce travail

A mon collègue dans ce travail et à tous les professeurs

Et à tous ceux qui croient en Dieu.

SOUDANI KOUTAIBA

REMERCIEMENTS

Avant tout, louange à "**Allah**", notre créateur et mètre de l'univers, de toutes ces boutés, s'avoir envoyé à nous tous le prophète "**Mohamed**" (I) qui doit être notre premier éducateur, puis de nous avoir donné tout de courage pour terminer ce travail de recherche.

Un très grand merci à:

Notre encadreur Mr **CHERIF MILOUD** pour nous avoir encadrés et sa confiance durant la période de préparation de cet mémoire.

Nos parents qui nous ont suivis pendant nos études.

Nous tiens également remercions toute l'équipe de **Laboratoire des Travaux Publics du Sud(LTPS) -Ghardaïa** à sa tête le maître **TAYEB BOUABDALI.AMIEUR ABD AL NASSER** et **Bouzid Bachir** pour leur accueil et aide durant nous période de travail.

Nous remercions chaleureusement nos familles respectives pour toute l'aide et soutien, moral et économique, qu'ils nous ont apporté tout au long de nos études .Nous espérons être à la hauteur de leurs espérances et nous montrer dignes de leurs confiances et de leurs encouragements.

Nous adressons nos remerciements chaleureusement tous les professeurs qui nous ont enseignés au cours des études primaires jusqu'aux années du cursus universitaire pour l'obtention du diplôme de licence.

Toute personne ayant contribué de près ou de loin à achever ce travail.

Et bien sûr, merci à tous les travailleurs de L'Universitaire Ghardaïa et à tous nos amis avec qui nous avons gardé des souvenirs très agréables des bons moments vécus ensemble.

Enfin, no vifs remerciements aux membres de jury et à son président avec qui nous allons soutenir ce la thèse et juger de sa qualité.

Et pour finir, un dernier remerciement à toute la promotion 2021-2022 de génie civil de l'université de Ghardaïa, tout en leurs souhaitons un avenir plein de réussite.

Résumé

Les sols argileux sont constitués de différents minéraux connus pour attirer l'eau. La saturation de ces sols en eau laisse dans un certain cas des gonflements importants résultant du remplissage progressif des vides dans le sol.

De nombreuses études ont été menées sur le phénomène de gonflement des sols, phénomène incontrôlable, visant à réduire la sévérité de ces dommages, à comprendre le comportement des sols et à en maîtriser les facteurs.

Une étude bibliographique a été menée afin d'obtenir le plus grand nombre d'informations liées au phénomène de gonflement d'un sol argileux, ainsi que de présenter quelques résultats de pour les chercheurs qui ont traité le phénomène de gonflement, de pression de gonflement en mentionnant les différentes techniques pour le processus de stabiliser le gonflement.

Cette étude a été menée sur le sol de la zone EL MENIA (Tagit).

Nous avons conclu notre travail par une étude empirique concernant l'effet de plusieurs concentrations de sable calcaire sur la pression de gonflement pour en déduire une méthode scientifique simple, économique et efficace pour réduire le phénomène de gonflement et améliorer les propriétés des sols argileux.

Mots-clés:Sol argileux, pression de gonflement, stabilisation, effet sablecalcaire.

Abstract

Clay soils are made up of different minerals known to attract water. The saturation of these soils with water leaves in some cases significant swelling resulting from the progressive filling of the voids in the soil.

Many studies have been carried out on the phenomenon of soil swelling, an uncontrollable phenomenon. Several studies have been carried out aimed at reducing the severity of this damage, understanding soil behavior and controlling its factors.

A bibliographic study was carried out in order to obtain the greatest amount of information related to the phenomenon of swelling of a clay soil, as well as to present some bibliographic results for researchers who have dealt with the phenomenon of swelling, pressure of swelling by mentioning the different techniques for the process of stabilizing the swelling.

This study was conducted on the soil of the EL MENIA (Tagit) area.

We concluded our work with an empirical study on the effect of several concentrations of calcareous sand on the swelling pressure to deduce a simple, economical and effective scientific method to reduce the phenomenon of swelling and improve the properties of clay soils.

Keywords: Clay soil, swelling pressure, stabilization, calcareous sand effect.

ملخص

تتكون الأتربة الطينية من معادن مختلفة المعروفة بقوة جذبها للماء. إن تشبع هذه الأتربة بالماء في حالة معينة يخلف انتفاخات معتبرة ناجمة الى الامتلاء التدريجي للفراغات الموجودة بالترربة ومن جهة أخرى الى امتصاص جزيئات الماء على السطح الخارجي لجزيئات الطين والى انتقال جزيئات المياه بين الطبقات الرقيقة للترربة الطينية.

العديد من الدراسات قد أجريت حول ظاهرة انتفاخ التربة. هذه الظاهرة لا يمكن السيطرة عليها تم اجراء عدة دراسات تهدف لتخفيف من شدة هذا الضرر وفهم سلوك التربة والتحكم في العوامل.

تم اجراء دراسة مكتبة لتحصيل اكبر قدر من المعلومات التي تتعلق بظاهرة انتفاخ التربة الطينية وكذلك عرض بعض النتائج المكتبية لباحثين عالجا ظاهرة الانتفاخ, ضغط الانتفاخ ,بذكر مختلف التقنيات لعملية تثبيت الانتفاخ.

اجريت هذه الدراسة على تربة منطقة المنبوعة (تاغيت).

اختتمنا عملنا بدراسة تجريبية تخص تأثير عدة تراكيز للرمل الجيري على ضغط الانتفاخ لاستخلاص طريقة علمية سهلة, اقتصادية وفعالة للتقليل من ظاهرة الانتفاخ وتحسين خصائص التربة الطينية .

الكلمات المفتاحية: التربة الطين ، ضغط الانتفاخ ، التثبيت ، تأثير الرمل الجيري.

Sommaire

Dédicaces.....	I
REMERCIEMENTS.....	II
Résumé.....	III
Abstract.....	IV
ملخص.....	V
LISTE DE FIGURE.....	IX
LISTE DE TABLEAUX.....	XI
LISTE DES SYMBOLES.....	XII
INTRODUCTION GENERALE.....	2
CHAPITRE I: ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE.....	2
I.1 Introduction.....	4
I.2 Minéralogie et propriétés des Argiles :.....	4
I.2.1 Minéralogie des argiles :.....	4
I.2.2 Minéraux argileux :.....	4
I.2.3 Structure des argiles :.....	5
I.2.4 Principaux groupes de minéraux argileux :.....	7
I.2.5 Propriétés spécifiques des particules argileuses :.....	9
I.2.5.1 Surface spécifique d'une particule argileuse :.....	9
I.2.5.2 Activité des argiles :.....	10
I.3 Phénomène du Gonflement :.....	12
I.3.1 Description du phénomène de gonflement :.....	12
I.3.2 Facteurs affectant le gonflement :.....	14
I.3.2.1 Propriétés du sol in situ et conditions de site :.....	14
I.3.2.1.1 Facteurs intrinsèques :.....	14
I.3.2.1.2 Facteurs externes :.....	16
I.4 Stabilisation des sols gonflants :.....	21
I.4.1 Stabilisation par ajout de la chaux :.....	21
I.4.2 Stabilisation par ajout du ciment :.....	25
I.4.3 Stabilisation chimique par solutions salines :.....	29
I.4.4 Traitement par des polymères :.....	30
I.4.5 Stabilisation thermique :.....	30

I.4.6 Stabilisation mécanique :	30
I.5 Conclusion :	31
II.PROCEDURE ET TECHNIQUES EXPERIMENTALES	36
II.1 Introduction :	34
II.2 Mesure des paramètres de gonflement :	34
II.2.1 Mesure indirecte du potentiel de gonflement :	34
II.2.1.1 Généralité	34
II.2.1.2 Classification :	35
II.2.2 mesure directe des paramètre de gonflement :	36
II.2.2.1 Mesure du gonflement libre :	36
II.2.2.2 Mesure de la Pression de gonflement :	38
II.3 Essais d'identification :	42
II.3.1 Essais granulométrique :	45
II.3.2 Limites d'Atterberg :	44
II.3.3 Essais de bleu de mithylène :	50
II.3.4 Essais de Proctor :	54
III. CARACTERISTIQUES DES MATERIAUX ETUDIES	62
III.1 Introduction :	55
III.2 Caractérisation des matériaux :	55
III.2.1 Argile:	55
III. 2.1.1 Origine de l'argile utilisée :	55
III. 2.1.2 Essais de caractérisations :	56
III.2.2 Sable calcaire :	64
III 2.2.1- Définition :	64
III 2.2.2- Origine de la Sable calcaire utilisée :	65
III 2.2.3- Essais de caractérisations :	65
III 2.2.4 - Caractérisation physique :	71
III.3 Conclusion :	71
IV. ETUDE DE GONFLEMENT ET DE STABILISATION DES ARGILES UTILISEES	82
IV.1 Introduction :	73
IV.2 Etude du gonflement des argiles :	73
IV.2.1 Estimation du potentiel de gonflement (mesure indirecte) :	73
IV.2.1.1 Classification selon un paramètre :	73
IV.2.1.2 Classification selon de deux paramètres :	74

IV.2.2 Pression de gonflement :	75
IV.2.2.1 Appareils d'essais pour mesurer la pression de gonflement :	75
IV.2.2.2 Photod'appareillages utilisés :	76
IV.2.2.3 Préparation des échantillons :	77
IV.2.2.4 Résultats :	78
IV.3 Etude de la stabilisation des argiles utilisées :	79
IV.3.1 Introduction :	79
IV.3.2 Effet d'usage calcaire sur les limites de consistances des argiles :	79
IV.3.2.1 Argile:	79
IV.3.2.2 Influence de l'ajout de sable calcaire sur la pression de gonflement :	81
IV.3.2.3 Influence de sable calcaire :	81
IV.4 Conclusion :	84
CONCLUSION GÉNÉRALE	85
<i>Références</i>	87

LISTE DE FIGURE

CHAPITRE I

FIG. I- 1. — STRUCTURE DU TETRAEDRE, (A): TETRAEDRE DE SILICE (GRIM, 1959), (B): VUE ISOMETRIQUE D'UN FEUILLET DE SILICE EN TETRAEDRE (GRIM, 1959), (C): SCHEMA DU FEUILLET DE SILICE (LAMBE, 1953).....	5
FIG. I- 2. — STRUCTURE DU TETRAEDRE, (A): OCTAEDRE D'ALUMINIUM (OU DE MAGNESIUM) (GRIM, 1959), (B): VUE ISOMETRIQUE D'UN FEUILLET EN OCTAEDRE (GRIM, 1959), (C): SCHEMA DU FEUILLET EN OCTAEDRE D'ALUMINIUM (OU DE MAGNESIUM) (LAMBE, 1953).....	6
FIG. I- 3. — REPRESENTATION DE LA STRUCTURE MINERALOGIQUE D'UNE PARTICULE D'ARGILE....	7
FIG. I- 4. — SCHEMA DE LA STRUCTURE ATOMIQUE D'UNE KAOLINITE, (GRIM, 1959).....	8
FIG. I- 5. — SCHEMA DE LA STRUCTURE ATOMIQUE D'UNE MONTMORILLONITE, (GRIM,1959).	8
FIG. I- 6. — SCHEMA DE LA STRUCTURE ATOMIQUE D'UNE ILLITE (GRIM, 1959).....	9
FIG. I- 7. — ABAQUE POUR IDENTIFICATION DES SOLS GONFLANTS	11
FIG. I- 8. — ABAQUE D'EVALUATION DE POTENTIEL DE GONFLEMENT.....	15
FIG. I- 9. — VARIATION D'INDICE DE PLASTICITE EN AJOUT DE LA CHAUX.	23
FIG. I- 10. — INFLUENCE DE LA CHAUX SUR LES CARACTERISTIQUES DE COMPACTAGE.	23
FIG. I- 12. — SYSTEME D'HOMOGENEISATION DE SOL AVANT D'AJOUTER UN LIANT HYDRAULIQUE.	25
FIG. I- 13. — APPAREIL D'INCORPORATION.....	30
FIG. I- 14. — SYSTEME D'EPANDAGE DE CIMENT ET	26
FIG. I- 15. — EPANDEUR DES LIANTS.....	32
FIG. I-16. — APPAREIL DE COMPACTAGE DU SOL.....	27

CHAPITRE II

FIG.II- 1. —DIFFERENTES PROCEDURES D'ESSAIS DE GONFLEMENT.	41
FIG.II- 2. —ÉTAT DE TENEUR EN EAU.....	45
FIG.II- 3. —BOIT DE CASAGRANDE.....	50
FIG.II- 4. —COUPELLE AVEC QUTIL A.....	45
FIG.II- 5. —PLAQUE DE VITRAIL..	45
FIG.II- 6. —MOULE PROCTOR NORMAL.	51
FIG.II- 7. —DAME PROCTOR.....	51
FIG.II- 8. —COURBE DE COMPACTAGE.	53
FIG.II- 9. —ÉPROUVETTE.	43
FIG.II- 10. —APPAREIL D'ANALYSE GRANULOMETRIQUE.....	43
FIG.II- 11. —DENSIMÈTRE	43
FIG.II- 12. —PRINCIPE DE DOSAGE.....	50

CHAPITRE III

FIG. III-1. —LOCALISATION DE L'ARGILE EL MENIA.	56
FIG. III- 2. — COURBE GRANULOMETRIQUE D'ARGILE DE MENIA.	57
FIG. III- 3. —CLASSIFICATION DES SOLS FINS SUR LE DIAGRAMME DE CASAGRANDE.....	60

FIG. III- 4. —ESSAI DE PROCTOR POUR L'ARGILE D'EL MENIA.	61
FIG. III- 5. —ESSAI AU BLEU DE METHYLENE.	64
FIG. III- 6. —LOCALISATION DES MATERIAUX UTILISES.	65
FIG. III- 7. — COURBE GRANULOMETRIQUE DE SABLE CALCAIRE.....	66
FIG. III- 8. —CLASSIFICATION DES SOLS FINS SUR LE DIAGRAMME DE CASAGRANDE.....	68
FIG. III- 10. —ESSAI DE PROCTOR DUSABLE CALCAIRE.....	69
FIG. III- 11. —ESSAI AU BLEU DE METHYLENE.	70

CHAPITRE IV

FIG.IV- 1. —ABAQUE D'EVALUATION DE POTENTIEL DE GONFLEMENT	74
FIG.IV- 2. —ODOMETRE UNI AXIAL.....	76
FIG.IV- 3. —TAMISAGE.....	76
FIG.IV- 5. —BALANCE	76
FIG.IV- 4. —COMPARATEUR	76
FIG.IV- 8. —PLATEAU	77
FIG.IV- 7. —SPATULE	77
FIG.IV- 6. —MOULE.....	77
FIG.IV- 9. —ETUVE.....	77
FIG.IV- 10. —PRESSE UTILISEE POUR LE COMPACTAGE STATIQUE.....	77
FIG.IV- 11. —COURBE DE LA PRESSION DE GONFLEMENT PAR ESSAI OEDOMETRIQUE.	78
FIG.IV- 12. —VARIATION DE WL EN FONCTION DE POURCENTAGE DE SABLE CALCAIRE.	80
FIG.IV- 13. —VARIATION DE Wp EN FONCTION DE POURCENTAGE SABLE CALCAIRE.	80
FIG.IV- 14. —VARIATION DE Ip EN FONCTION DE POURCENTAGE DE SABLE CALCAIRE.	81
FIG.IV- 15. —COURBE DE LA PRESSION DE GONFLEMENT PAR ESSAI OEDOMETRIQUE	82
FIG.IV- 16. —COURBE DE LA PRESSION DE GONFLEMENT PAR ESSAI OEDOMETRIQUE.....	82
FIG.IV- 17. —COURBE DE LA PRESSION DE GONFLEMENT PAR ESSAI OEDOMETRIQUE.....	83
FIG.IV- 18. —VARIATION DE LA PRESSION DE GONFLEMENT PG EN FONCTION	84

LISTE DE TABLEAUX

CHAPITRE I

TAB. I- 1. — ACTIVITE DE DIFFERENTS MINERAUX (SKEMPTON, 1953. ET MITCHELL.1976)..	11
TAB. I- 2. — TAUX DE GONFLEMENT ET LA PRESSION DE GONFLEMENT POUR PLUSIEURS TYPE DU SOL A DIFFERENTES ENERGIES DE COMPACTAGE.....	17

CHAPITRE II

TAB.II- 1. —CLASSIFICATION DU POTENTIEL DE GONFLEMENT.	35
TAB.II- 2. — CLASSIFICATION DU TAUX DE GONFLEMENT	35
TAB.II- 3. —ÉVALUATION DU DEGRE DE GONFLEMENT	36
TAB.II- 4. —RELATION ENTRE L'INDICE D'EXPANSION ET LE POTENTIEL DE GONFLEMENT.	38
TAB.II- 5. —MODALITES D'EXECUTION DES ESSAIS PROCTOR NORMAL ET MODIFIE.....	51

CHAPITRE III

TAB. III- 1. —ANALYSE CHIMIQUE D'ARGILE - EL MENIA.	56
TAB. III- 2. —RESULTATS DE L'ANALYSE GRANULOMETRIQUE D'ARGILE D'EL MENIA.....	58
TAB. III- 3. —LES DENSITE SAPPARENTES DES SOLS.....	59
TAB. III- 4. —PARAMETRES PHYSIQUES DES ARGILES ETUDIEES.	59
TAB. III- 5. —PRESENTATION DES RESULTATS PORTES SUR LE DIAGRAMME DE CASAGRANDE.	60
TAB. III- 6. —ACTIVITE DE L'ARGILE D'EL MENIA.....	60
TAB. III- 7. —RESULTATS DE L'ESSAI DE PROCTOR.....	62
TAB. III- 8. —QUELQUES VALEURS INDICATRICES DU VBS (CLASSIFICATIONS DES SOLS D'APRES PHILIPPONNAT(1997).	63
TAB. III- 9. —LA VALEUR DE BLEU VB.....	64
TAB. III- 10. —ANALYSES CHIMIQUES DE SABLE CALCAIRE.	65
TAB. III- 11. —RESULTATS DE L'ANALYSE GRANULOMETRIQUE DE SABLE CALCAIRE.	67
TAB. III- 12. —LES LIMITES DE CONSISTANCE.	67
TAB. III- 13. —CLASSIFICATION DES SOLS EN FONCTION DE L'INDICE DE PLASTICITE.	68
TAB. III- 14. —RESULTATS DE L'ESSAI DE PROCTOR.....	69
TAB. III- 15. — ÉQUIVALENT DE SABLE DES ECHANTILLONS TUF ET SABLE CALCAIRE.	71

CHAPITRE IV

TAB.IV- 1. —ÉVALUATION DU POTENTIEL DE GONFLEMENT A PARTIR DE L'INDICE DE PLASTICITE.	73
TAB.IV- 2. —CLASSIFICATION DU POTENTIEL DE GONFLEMENT A PARTIR DE L'INDICE DE PLASTICITE.	74
TAB.IV- 3. —CLASSIFICATION DU TAUX DE GONFLEMENT A PARTIR DE LA LIMITE DE LIQUIDITE ET L'INDICE DE PLASTICITE. (D'APRÈS O'NELL ET POORMOAYED, 1980).....	74
TAB.IV- 4. —CLASSIFICATION DU POTENTIEL DE GONFLEMENT DE L'ARGILE DE EL MENIA PARTIR DE LA LIMITE DE LIQUIDITE ET DE L'INDICE DE PLASTICITE (D'APRES O'NELL ET POORMOAYED, 1980).	75
TAB.IV- 5. —CLASSIFICATION DU POTENTIEL DE GONFLEMENT DE L'ARGILE D'EL MENIA A PARTIR DE L'ACTIVITE ET POURCENTAGE DES PARTICULES < 2 MM . (D'APRÈS SEED ET AL, 1962.).....	75
TAB.IV- 6. —RESULTAT DE LA PRESSION DE GONFLEMENT.	78

TAB.IV- 7. —LIMITES DE CONSISTANCES DES DIFFERENTS MELANGES :	79
TAB.IV- 8. —VARIATIONDE PRESSION DE GONFLEMENT EN FONCTION DE POURCENTAGE DE SABLE CALCAIRE.	83

LISTE DES SYMBOLES

Nous donnons ci-dessous les principales notations utilisées dans ce mémoire.

A_1 : Activité de Skempton.

A_2 : Argile Seed.

C_2 : teneur en particules de dimensions inférieures à 2 μm .

e_0 : indice des vides initial.

e_f : indice des vides final.

H : Hauteur.

IP : indice de plasticité.

P_g : pression de gonflement.

VB : Valeur du bleu.

W_n : Teneur en eau naturelle

WL : limite de liquidité.

WP : limite de plasticité.

γ_s : Densité spécifique.

γ_d : Densité sèche.

γ_h : Densité humide.

INTRODUCTION GENERALE

Le problème de gonflement est rencontré dans beaucoup de pays ; l'analyse des résultats obtenus en 1978 par la fondation nationale de science 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.

Ce phénomène très complexe qui fait intervenir un grand nombre de paramètres environnants et intrinsèques, se produit dans les sols plastiques partiellement saturés. Le gonflement des sols se manifeste quand le régime hydraulique se trouve changé ou que l'état d'équilibre des contraintes est perturbé. Mais, selon la nature minéralogique de l'argile, le gonflement diffère par son amplitude et par les mécanismes de son développement.

La stabilisation des sols gonflants a été étudiée par un grand nombre de chercheurs. Beaucoup de méthodes et d'appareillages ont été mis au point, pour connaître l'influence de l'efficacité d'une solution ou d'un produit sur la stabilisation d'un sol argileux. Parmi les techniques les plus anciennes, on cite celles qui s'opèrent par stabilisation mécanique des sols telles que le procédé de compactage, de la substitution et celui de la préhumidification.

Actuellement et avec la disponibilité des moyens de mise en œuvre, de nouvelles techniques de stabilisation sont apparues et continuent à se développer, parmi ces techniques, nous citons : la stabilisation chimique, thermique et par additifs tel que (le sable calaire).

Nous avons utilisé cette technique de stabilisation (apport de sable calcaire) avec des sols argileux naturels situés dans la région EL MENIA. Des résultats ont été tirés qui sont proches avec les résultats trouvés par d'autres chercheurs qui ont travaillé avec des sols artificiels comme la bentonite, cette technique aussi a donné des résultats semblables concernant la diminution de gonflement à celles trouvés avec des techniques mixtes mais restent toujours en cours de développement et vont connaître beaucoup de progrès dans l'avenir.

L'injection de lait de sable calaire dans le sol argileux, sous pression, à une profondeur courante de 1.50 mètre mais qui peut aller jusqu'à 6 et même 12 mètres. Cette technique américaine est très utilisée pour stabiliser des remblais ou des terrains naturels destinés à la construction des bâtiments. Elle est également employée pour la stabilisation des plates –formes de voies ferrées existantes lorsqu'elles sont composées de matériaux plus ou moins argileux.

Ce mémoire s'inscrit dans le cadre d'une étude expérimentale, le plan de travail de cette thèse est organisé en quatre chapitres répartis en deux parties : bibliographique et expérimentale.

La première partie est bibliographique, elle est constituée de trois chapitres ;

Le premier chapitre consiste à décrire les argiles et leurs minéralogies.

Le deuxième chapitre est consacré à la description du mécanisme de gonflement et retrait ainsi que préciser les désordres rencontrés et l'importance d'étudier de tels phénomènes.

La deuxième partie est expérimentale, elle est composée de deux chapitres 3 et 4 ;

Le troisième chapitre nous caractérise dans une première étape nos matériaux par des analyses minéralogiques et chimiques pour identifier les minéraux argileux susceptibles de provoquer des déformations volumiques importantes (notamment la montmorillonite) et par des essais d'identification classiques (limites d'Atterberg, granulométrie, valeur de bleu...). Ces essais sont complétés par des mesures directes de gonflement et de pression de gonflement et des résistances de compression et cisaillement.

Le quatrième chapitre porte sur l'effet de différents dosages de sable calcaire sur le taux, la pression et la cinétique de gonflement afin d'en déduire l'efficacité de cette technique dans nos argileuses de MENIA et déterminer les paramètres de gonflement des argiles différents pourcentage.

Une conclusion générale est donnée à la fin de notre travail qui résume les principaux résultats obtenus dans le programme expérimental.

CHAPITRE I: ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

I.1 Introduction

Les argiles peuvent être gonflantes, notamment celles de la famille des Montmorillonites lorsqu'elles absorbent de l'eau et, au contraire, diminuer de volume sous l'effet de la sécheresse. Par ailleurs, sous l'effet d'une charge, par exemple celle d'une construction, une partie de l'eau absorbée contenue entre les grains d'argile est chassée, ce qui a pour conséquence de provoquer un tassement sensible du sol.

Les argiles appartiennent à un sous-groupe de sols fins dont leurs diamètres moyens maximal correspond à 2 μm fortement sensible à l'eau d'où les sols plastiques et cohérents en raison de leurs structures feuilletées et fibreuses.

Cette configuration confère à certains types d'argiles une augmentation du volume en présence d'une quantité d'eau appropriée d'une part, d'une autre part un retrait lorsque ces derniers subissent une sécheresse.

I.2 Minéralogie et propriétés des Argiles :

Avant d'analyser le phénomène de gonflement proprement dit, il est essentiel de rappeler certaines notions minéralogiques et physico-chimiques relatives aux interactions entre l'eau et les particules argileuses

La minéralogie des argiles étudie la taille, la forme, la structure de surface. Ces facteurs contrôlent le taux de gonflement résultant des mécanismes physico-chimiques.

I.2.1 Minéralogie des argiles :

Les minéraux argileux sont l'un des plus importants composants de la croûte terrestre environ de 95% de silicates. Ces argiles sont négativement chargés font apporter aux argiles une forte sensibilité à l'eau qui induit le phénomène de gonflement. Elles engagent un empilement de micro cristaux nommés feuillets selon leurs apparences ressemblantes à celle d'une plaquette ou d'une feuille infiniment mince.

I.2.2 Minéraux argileux :

Selon Hafsi (1993) [2], ces feuillets sont eux-mêmes formés d'unités cristallines que l'on appelle structures fondamentales dont leurs compositions chimiques est comme suit :

$(\text{SiO}_2)_m (\text{Al}_2\text{O}_3)_n (\text{H}_2\text{O})_p$

D'après Grim (1959) [3], les argiles sont issues de la dégradation des minéraux suite à l'altération qui appartient à la famille des phyllosilicates. Ces minéraux argileux sont caractérisés par leur structure en feuillets. Le réseau cristallographique des phyllosilicates est basé sur un assemblage de tétraèdres (SiO_2), chaque tétraèdre partageant trois sommets avec les tétraèdres voisins.

L'ensemble des sommets partagés constitue un assemblage plan hexagonal. Le sommet du tétraèdre qui n'est pas dans le plan est partagé avec un octaèdre $\text{Al}(\text{OH})_6$. C'est l'association de couches tétraédriques et de couches octaédriques qui constituent le motif (ou feuillet) du réseau cristallin de chaque argile.

I.2.3 Structure des argiles :

Les particules d'argile sont formées d'un empilement de feuillets qui sont constitués par l'association de deux unités structurales de base, ces feuillets sont formés par la juxtaposition des couches structurales tétraédriques (silice) et octaédriques (aluminium). Les couches structurales sont à leurs tours formées d'unités structurales de base par empilement d'ions ou d'hydroxyles en disposition hexagonale ou compacte.

3.a)- Unité structurale tétraédriques :

Le feuillet en tétraèdre est une combinaison d'unités tétraédriques de silice composées de quatre atomes d'oxygène aux sommets entourant un atome unique de silicium (Lambe, 1953) [4]. Le réseau est formé par l'arrangement hexagonal des tétraèdres (Fig. I- 1).

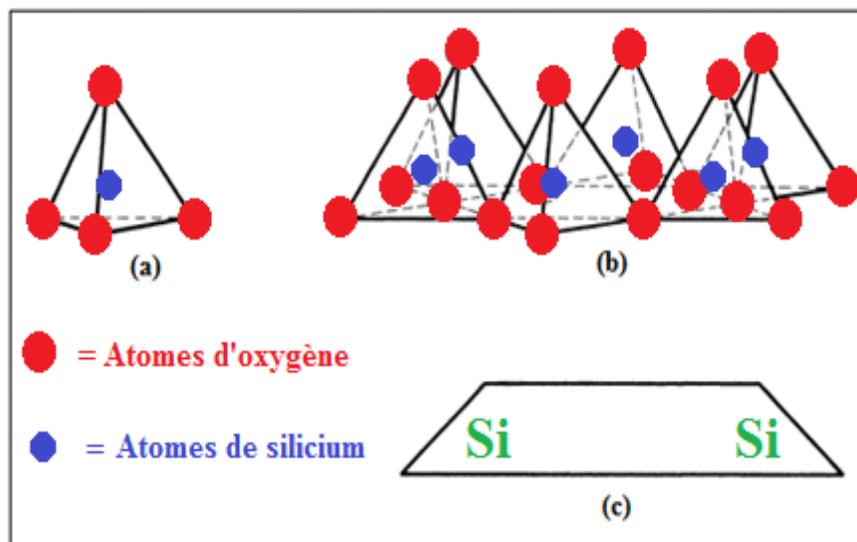


Fig. I- 1.— structure du tétraèdre, (a): Tétraèdre de silice (Grim, 1959), (b): vue isométrique d'un feuillet de silice en tétraèdre (Grim, 1959), (c): schéma du feuillet de silice (Lambe, 1953).

3.b) Unités structurales octaédriques :

Le feuillet en octaèdre est une combinaison d'unités octaédriques composées de six atomes d'oxygène ou d'hydroxyle entourant un atome d'aluminium, de magnésium, de fer ou d'un autre élément. Le réseau est formé par l'arrangement linéaire des octaèdres (Fig.I-2). La microstructure des phyllosilicates est basée sur les anions O²⁻ et OH⁻ qui occupent les sommets d'assemblages octaédriques (O²⁻ et OH⁻) et tétraédriques O²⁻ (Caillère et al. 1982) [5].

Dans les cavités de ces unités structurales élémentaires viennent se loger des cations de tailles variables (Si⁴⁺, Al³⁺, Fe³⁺, Fe²⁺, Mg²⁺) en position tétraédrique ou octaédrique. Ces éléments s'organisent suivant un plan pour constituer des couches octaédriques et tétraédriques dont le nombre détermine l'épaisseur du feuillet.

L'espace entre deux feuillets parallèles s'appelle espace interfoliaire. Lorsque deux cavités sur trois de la couche octaédrique sont occupées par Al³⁺ (ou un autre ion métallique trivalent), la structure est dénommée dioctaédrique. Quand la totalité des cavités octaédriques est occupée par des ions métalliques bivalents, la structure s'appelle trioctaédrique.

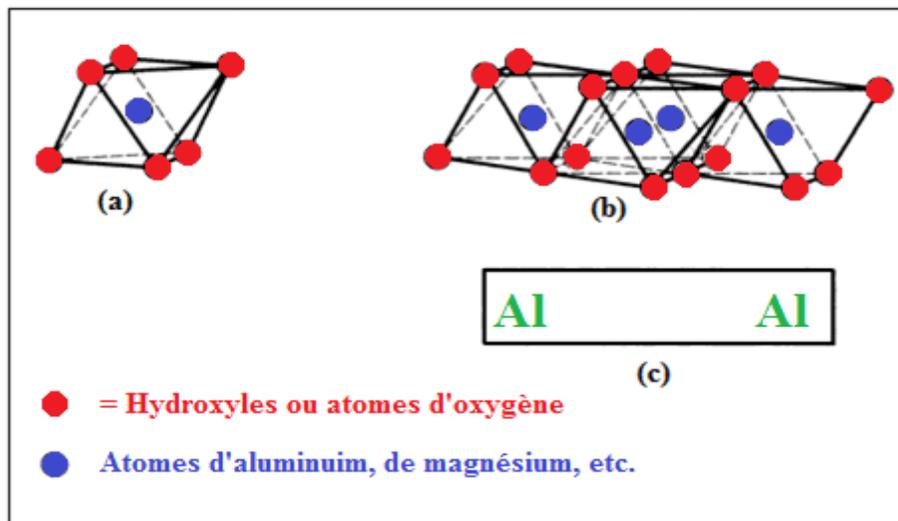


Fig. I- 2.— Structure du tétraèdre, (a): octaèdre d'aluminium (ou de magnésium) (Grim, 1959), (b): vue isométrique d'un feuillet en octaèdre (Grim, 1959), (c): schéma du feuillet en octaèdre d'aluminium (ou de magnésium) (Lambe, 1953).

D'après Kouloughli (2007) [6], il existe encore des substitutions isomorphiques dans les couches tétraédriques (Si⁴⁺ -- Al³⁺, Fe³⁺) et /ou octaédrique (Al³⁺ -- Mg²⁺, Fe²⁺, ou Mg²⁺ -- Li⁺). Ces substitutions entraînent un déficit de charge qui est compensé, à l'extérieur du feuillet, par des cations compensateurs.

La représentation de la structure minéralogique d'une particule d'argile est donnée par l'organigramme suivant (figure I-3) :

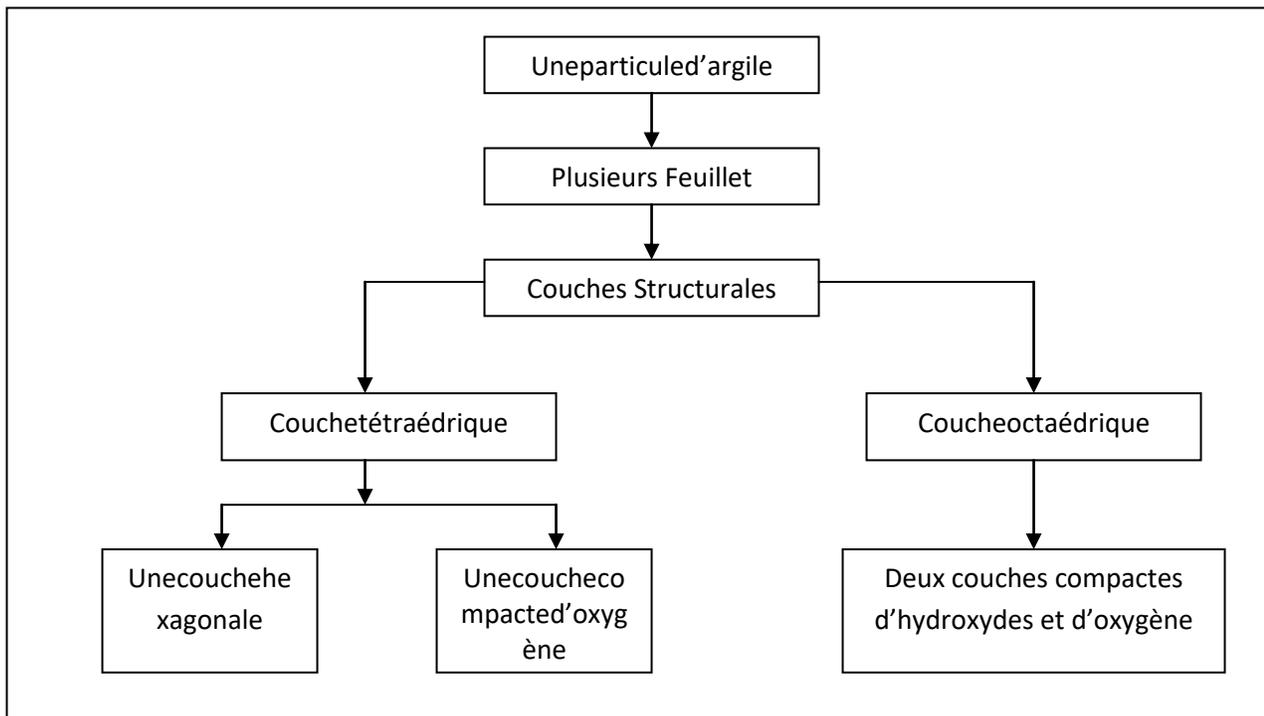


Fig. I- 3.—Représentation de la structure minéralogique d'une particule d'argile

(Holtz et al, 1991).

1.2.4 Principaux groupes de minéraux argileux :

Les minéraux argileux sont formés de deux feuillets de base qui sont empilés d'une façon caractéristique et qui comportent certains cations dans les feuillets en tétraèdre et en octaèdre. Trois principales familles (ou groupes) des minéraux argileux peuvent être distinguées qui sont les plus importantes et les plus dominantes.

4.a) Kaolinite

Selon Holtz and Kovacs (1981)[7], la kaolinite est constituée d'une succession de couches alternées de feuillets (silice) et de feuillets en octaèdre d'aluminium ou de gibbsite (Fig. I- 4).

A cause de l'empilement d'une couche de chacun des deux feuillets de base, on considère la kaolinite comme un minéral argileux 1:1 sachant que son épaisseur est de 7 Å. Chaque feuillet est relié à l'autre par l'intermédiaire des liaisons labiles de type hydrogène. La propriété de cette liaison est de permettre la cohésion du cristal tout en laissant la possibilité de clivage des différents feuillets. La kaolinite est connue par la formule chimique suivante : $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$ (Cabane, 2004)[8].

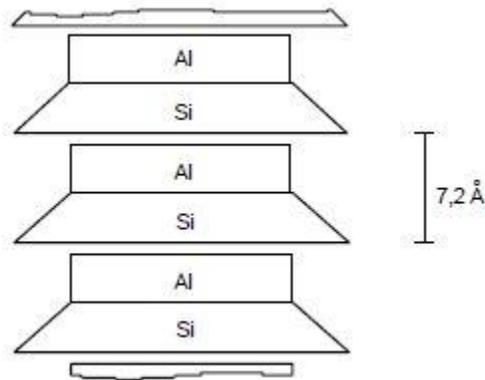


Fig. I- 4.— Schéma de la structure atomique d'une kaolinite, (Grim, 1959).

4.b) La montmorillonite :

D'après Holtz and Kovacs (1981)[7], la montmorillonite est un minéral argileux important, composé de deux feuillets de silice et d'un feuillet d'alumine (gibbsite). Elle est désignée comme un minéral 2:1 (Fig. I-5). Une partie des atomes d'aluminium de la couche octaédrique est remplacée par des atomes de magnésium voire de fer.

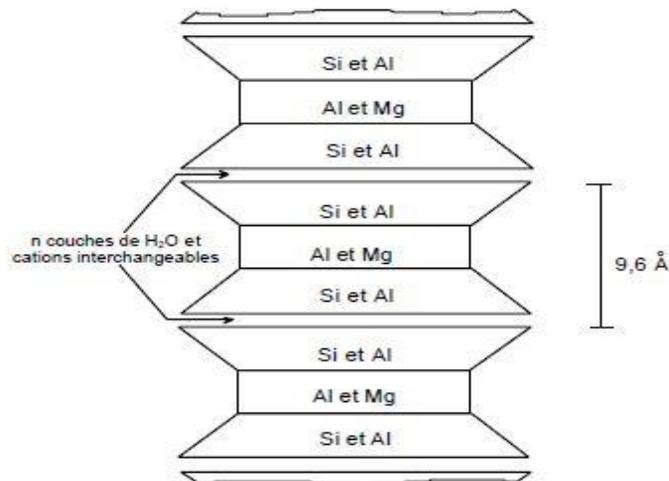


Fig. I- 5.— Schéma de la structure atomique d'une montmorillonite, (Grim, 1959).

La compensation des charges négatives excédentaires s'effectue par l'introduction dans l'espace interfoliaire (espace séparant deux triplets consécutifs T:O:T) d'un cation (Ca^{2+} , Na^+). Ces cations interfoliaires ont la particularité de pouvoir être solvatés par des molécules d'eau qui provoquent le gonflement du cristal, l'espace interfoliaire passe de 14 à 17 Å en présence de Ca^{2+} et de 13 Å jusqu'à l'infini en présence de Na^+ . Il existe plusieurs minéraux argileux dans le groupe des smectites, entre autres, la montmorillonite a pour une formule chimique $[(\text{Al}_{1.67}\text{Mg}_{0.33}) \text{Si}_4\text{O}_{10} (\text{OH})_2]$ (Cabane,

2004)[8] , (Gadouri, 2017)[9]. D'après Luckham and Rossi (1999), le phénomène d'hydratation interfeuillet est responsable de l'augmentation de la distance entre les feuillets (distance basale).

4.c) L'illite

Selon Holtz and Kovacs (1981) [7], l'illite est une autre composante importante des sols argileux. Comme la montmorillonite, elle a une structure 2:1. En effet, la seule différence entre cette composante et celle de la montmorillonite c'est que l'espace interfoliaire de l'illite est rempli par un cation de potassium qui crée un lien très fort entre les couches qui la constitue. Un quart des atomes de silicium dans les tétraèdres est remplacé par des atomes d'aluminium. La compensation des charges négatives s'effectue par l'introduction dans l'espace interfoliaire d'un cation K^+ . On peut aussi rencontrer, dans le feuillet de silice, certaines substitutions isomorphes de silicium par l'aluminium (Fig. I-6).

La composition minéralogique de l'illite a pour formule chimique $[K_{2-x} (Al, Fe)_{4-y} (Fe, Mg)_y (Si_{6+x} Al_{2-x})O_{20} (OH)_4]$.

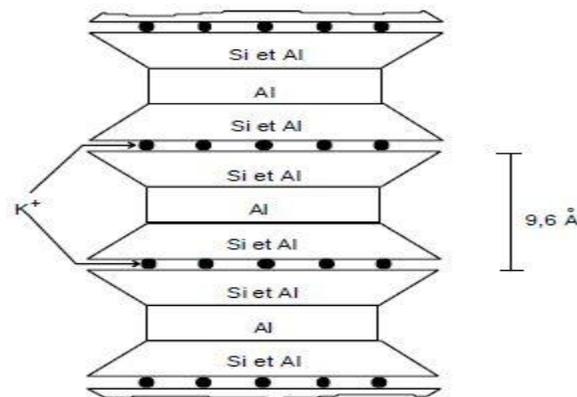


Fig. I- 6.— Schéma de la structure atomique d'une illite (Grim, 1959).

I.2.5 Propriétés spécifiques des particules argileuses :

I.2.5.1 Surface spécifique d'une particule argileuse :

Les particules d'argiles présentent des surfaces spécifiques très importantes et peuvent de ce fait attirer un grand nombre de molécules d'eau et d'ions, et exercer entre eux d'importantes forces d'interactions. Ces forces influent amplement sur le comportement mécanique des argiles. L'intensité de la charge électrique est liée à la surface spécifique de la particule. Dans le cas des argiles, cette surface varie entre 10 à 20 m^2/g et peut atteindre 800 m^2/g dans le cas de la montmorillonite sodique. Warkentin et

Bozozuk (1961)[10], ont noté que le gonflement est d'autant plus fort que la surface spécifique de l'argile est grande.

I.2.5.2 Activité des argiles :

Skempton (1953)[11], a considéré que les valeurs des limites d'Atterberg sont liées à la quantité d'eau retenue à la surface des particules et donc à la quantité d'argile présente dans le sol. Cet auteur a défini l'activité d'une argile par le rapport de l'indice de plasticité (I_p) et du pourcentage des éléments inférieurs à deux microns ($C_2 < 2 \mu m$).

$$A_1 = \frac{I_p}{C_2}$$

Skempton a proposé la nomenclature suivante:

Argile inactives : les argiles qui ont une activité inférieure à 0.75. Ces argiles sont à base de Kaolinite, ou des argiles contenant peu de minéraux argileux.

Argile normale : qui a une activité comprise entre 0.75 et 1.25.

Argile active : qui a une activité comprise entre 1.25 et 2.

Argile très actives : qui a une activité supérieure à 2.

En ce qui concerne les argiles compactées, Seed et al (1962) ont introduit une modification à la définition de Skempton sous la forme suivante :

$$A_2 = \frac{I_p}{C_2 - n}$$

$n = 5$ cas des sols naturels ; $n = 10$ cas des sols reconstitués.

Le tableau I.1 présente le minéral prédominant dans la matrice argileuse basant sur l'activité, proposé par Skempton et al (1953)[11] et Michel, (1976)[12].

L'activité d'un sol dépend essentiellement de sa composition minéralogique : le type et la quantité du minéral argileux, de la teneur d'argile et des ions échangeables (El Sohby et al 1986)[13].

Les deux définitions citées ci dessus indiquent que l'activité est proportionnelle à l'indice de plasticité et inversement proportionnelle à la teneur en éléments inférieurs à deux microns (figure I-7).

D'autre part, Seed et al (1962) ont proposé un abaque permettant d'évaluer le potentiel de gonflement à partir de l'activité et du pourcentage de particules fines ($C_2 < 2\mu\text{m}$), (Figure I-8).

Tableau I- 1.— Activité de différents minéraux (Skempton, 1953. et Mitchell.1976)

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

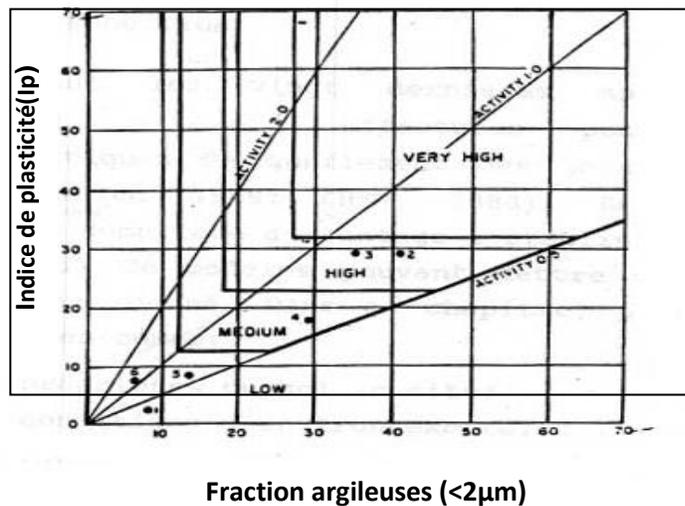


Fig. I- 7.—Abaque pour identification des sols gonflants

(D'après Williams et Donaldson, 1980).

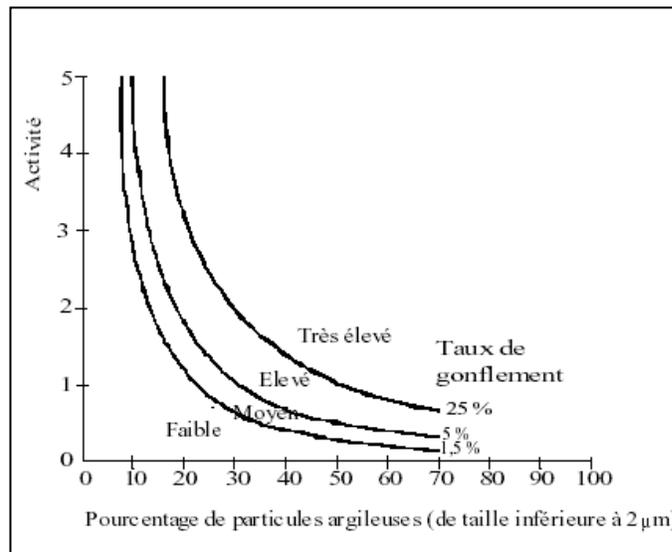


Fig. I- 8.— Abaque d'évaluation de potentiel de gonflement
(D'après Seed et al, 1962.)

I.3 Phénomène du Gonflement :

Le gonflement des argiles a fait l'objet de très nombreuses études qui font apparaître des domaines d'intérêt particuliers, parmi les principales préoccupations des chercheurs dans l'étude des argiles gonflantes, c'est de comprendre et de déterminer les facteurs responsables de ce phénomène. Dans cette partie, on s'attachera à présenter les différents mécanismes de gonflement et de mettre en évidence les facteurs influant sur ce phénomène.

I.3.1 Description du phénomène de gonflement :

Plusieurs auteurs ont expliqué le phénomène du gonflement de diverses manières, on va citer quelques approches : cité par Gueddouda (2005)[14].

Seed et al (1961) [15] travaillant sur les argiles reconstituées, ont attribué le gonflement à deux phases, une phase mécanique et une phase physico-chimique. Ces auteurs ont observé que les échantillons d'argile reconstituée à la même densité par le compactage statique ont donné un gonflement approximativement le double de celui donné par les échantillons reconstitués par malaxage.

Donc les différences dans le mode de préparation des échantillons résultent en des structures différentes (contribution des effets mécaniques).

Van Olphen (1963)[3] a expliqué le processus de gonflement par deux étapes :

La première étape serait due à la capacité d'absorptions monocouche successives d'eau à la surface des particules.

La seconde étape serait quant à elle due aux forces de répulsion qui sont dominant dans ce stade.

Chang et Warkentin (1966)[17] a divisé le gonflement en deux composantes:

Un gonflement structural, les pores ne sont pas totalement remplis d'eau.

Un gonflement normal, l'échantillon est totalement saturé.

Wong et Yong (1973) [18] ont montré expérimentalement que l'évolution de la pression de gonflement est rapide au début de l'essai et s'atténue avec le temps.

L'accroissement rapide est dû à l'hydratation des feuillets d'argiles et des cations échangeables et à la tendance des feuillets d'argiles à se redresser (gonflement mécanique de Terzaghi). Après obturation des pores capillaires, l'accroissement devient graduel, lequel est attribué au gonflement osmotique.

Popescu (1986)[20] a suggéré deux types de gonflement, un gonflement intercrystallin (interparticule) et un gonflement intracrystallin.

Le gonflement intercrystallin peut affecter tous les types de minéraux argileux, ce gonflement est engendré par relâchement des tensions capillaires, après mouillage d'un sol non saturé.

Le gonflement intracrystallin est une caractéristique des minéraux de type montmorillonite, dans ce cas de gonflement, l'eau pénètre non seulement entre les cristaux mais aussi entre les couches individuelles qui forment le cristal.

Serratrice et al (1996)[21] ont subdivisé le gonflement en deux phases qui peuvent exister simultanément et agir l'une sur l'autre, le gonflement primaire et le gonflement secondaire.

Le gonflement primaire est relativement rapide et commence immédiatement au contact du sol avec l'eau, ce gonflement est dit macroscopique et est contrôlé par la perméabilité, il est lié au degré de saturation (S_r). Ce premier processus est associé avec l'écoulement de l'eau au sens de la loi de Darcy.

La seconde phase du gonflement dite microscopique, résultant de l'hydratation progressive des minéraux actifs, est lente. Ce gonflement est affecté par le type des minéraux présents dans le fluide interstitiel, et il est influencé par la pression de confinement.

I.3.2 Facteurs affectant le gonflement :

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

Les facteurs intrinsèques et Les facteurs externes.

I.3.2.1 Propriétés du sol in situ et conditions de site :

I.3.2.1.1 Facteurs intrinsèques :

1.a)- Influence Compositions minéralogiques :

Ce facteur est très important pour déterminer le gonflement d'un sol. Les propriétés gonflantes du matériau seront d'autant plus marquées que le pourcentage d'éléments argileux est grand. C'est ainsi que pour une même nature d'ions, les montmorillonites gonfleront plus que les kaolinites.

Plus les substitutions sont proches de la surface du feuillet, plus les interactions avec les cations compensateurs sont fortes. C'est notamment le cas du mica, dont les substitutions sont situées dans la couche tétraédrique et qui présente une très faible aptitude au gonflement en milieu aqueux, donc à l'échange cationique.

Pour la montmorillonite, les substitutions sont situées dans la couche octaédrique, les interactions avec les ions compensateurs sont atténuées par la couche tétraédrique, ce qui permet le gonflement des feuillets en milieu aqueux.

1.b)- Influence du type de cations compensateur :

Le type de cation qui doit être substitué a aussi une importance sur le taux d'ions échangés. Plus le cation est gros et peu hydraté, plus il crée une attraction forte entre les feuillets. C'est ainsi que les feuillets de montmorillonites comportant des ions K^+ , Rb^+ , NH_4^+ , et Cs^+ sont collapsés en milieu aqueux, alors que ceux compensés par des ions Na^+ , Li^+ , Ca^{+2} et Mg^{+2} se dissocient facilement.

La taille de l'ion substituant va également avoir un rôle sur la capacité d'échange, car plus cet ion est volumineux, plus il va perturber les couches d'hydratation.

1.c)- Influence de la Capacité d'échange en cations (CEC) :

La capacité d'échange cationique a évidemment un rôle important, car plus les feuillets possèdent des sites compensables, plus ils peuvent adsorber des ions. Cependant, lorsque la densité de site est trop élevée,

comme dans le cas de la vermiculite, les Feuilletés sont liés par de trop fortes interactions pour pouvoir être gonflés, et donc Pour être échangés.

La capacité d'échange cationique est une quantité qui se mesure par saturation de l'argile par un premier type de cations, ensuite on la met en présence d'autres cations qui vont prendre la place des premiers. Selon le nombre des cations récupérés, on estime la valeur de CEC qui s'exprime en mille équivalents par 100 g d'argile (meq/100 g. d'argile). Cette aptitude des argiles à libérer leurs cations dépend de la valence et la masse Atomique du cation présent dans la solution, selon l'ordre croissant suivant : $\text{Li}^+ < \text{Na}^+ < \text{K}^+ < \text{H}^+ < \text{Mg}^{++} < \text{Ca}^{++} < \text{Al}^{+++}$.

Exemple : $\text{Na argile} + \text{CaCl}_2 \rightarrow \text{Ca argile} + \text{NaCl}$.

Les surfaces des particules d'argiles sont chargées négativement, afin d'équilibrer la charge négative, les particules d'argiles attirent les ions positifs contenus dans les solutions de sel.

1.d)- Influence de la surface spécifique :

Les particules d'argiles, présentent des surfaces spécifiques très importantes et peuvent de ce fait attirer un grand nombre de molécules et d'ions ; et exercer ainsi entre eux, d'importantes forces d'interactions. Ces forces, influent amplement sur le comportement mécanique de ces argiles. L'augmentation de la surface spécifique entraîne la diminution de la densité en charge, et par conséquent favorise le gonflement. Les argiles dont les particules ont des surfaces spécifiques grandes sont très gonflantes. La surface spécifique s'exprime en m^2/g .

1.e)- Influence de la structure du sol :

Pour des sols qui se sont déposés naturellement, l'arrangement des particules sera fonction de leur nature, leur dimension et leur environnement durant leur dépôt.

Un matériau intact à configuration dispersée présentera des caractéristiques de gonflement plus importantes qu'un matériau remanié à configuration floclée.

1.f)- Influence de la quantité de minéraux non argileux :

Deux sols formés des mêmes argiles gonflantes et ayant les mêmes densités et teneur en eau, mais différents par la quantité des matériaux non gonflants contenus dans les sols.

I.3.2.1.2 Facteurs externes :

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

2.a)- Conditions de compactage (statique ou dynamique) :

Pour les essais de gonflement réalisés sur des échantillons reconstitués au laboratoire, l'étude de l'influence du mode de compactage a été abordée par certains chercheurs comme Guiras – Skandaji.H (1996)[22]. Les différentes méthodes de compactage aboutissent à des structures différentes de l'échantillon, ce qui peut influencer le résultat du gonflement. Edil et Alanazi (1992) [23], constatent qu'il n'y a pas un consensus sur le type de structure obtenue par les différentes méthodes de compactage.

Seed et al, affirment que le compactage statique donne une structure plus flocculante que le compactage par pétrissage et ceci à teneur en eau initiale et densité sèche initiale égale. Dans ce cas, l'échantillon compacté statiquement aboutit à un gonflement plus fort.

Alors que Perches & Lu (1965) [24] et Seed & Chen (1961) [16] affirment que le compactage statique donne une structure orientée en parallèle beaucoup plus marquée que le compactage par pétrissage et aboutit donc à un gonflement plus important.

Hachichi et Fleureau (1999) [25] ont observé un gonflement final plus faible pour des échantillons reconstitués par compactage statique que pour des échantillons intacts.

2.b)- Influence de l'énergie de compactage :

A. Sridharan, Y. Gurtug (2004) [26] ont étudié l'influence de l'énergie de compactage, ils ont fait avec de la kaolinite et l'argile de montmorillonite fortement plastique. Ils ont trouvé l'effet de cette énergie sur le taux et la pression de gonflement (tableau. I-2).

Le tableau suivant récapitule les résultats des essais effectués pour voir l'effet de cette énergie sur le taux et la pression de gonflement.

Tableau. I- 2.— taux de gonflement et la pression de gonflement pour plusieurs type du sol à différentes énergies de compactage.

Sol	Energie de compactage					
	Standard proctor, SP		Proctor modifié réduit, RMP		Proctor modifié, MP	
	%Gonflement	Pression de gonflement (kpa)	%Gonflement	Pression de gonflement (kpa)	%Gonflement	Pression de gonflement (kpa)
Kaolinite	0,26	8,5	2,96	135,7	4,19	126,7
Degimenlik	0,84	115,0	4,18	175,0	9,34	430,0
Akaderniz	3,61	184,2	10,48	466,7	15,26	866,7
Tuzla	5,63	150,0	14,27	650,0	24,32	1900,0
Montomorillonite	10,73	466,7	19,86	1000,0	27,49	5000,0

2.c)- Influence de la teneur en eau initiale:

Lorsque les argiles ne sont pas saturées, par suite d’une dessiccation, les forces d’attraction dues aux charges électriques, les forces dérivant de l’énergie d’hydratation des cations échangeables et les forces capillaires ont la primauté.

Succinctement, plus le matériau argileux est sec, plus il a tendance à gonfler par saturation. Pareillement, la pression de gonflement diminue avec l’augmentation de la teneur en eau initiale et cela a été vérifié sur des essais de gonflement empêché effectués sur des marnes.

Barden et Al (1969)[27] pensent que la teneur en eau initiale détermine la Structure initiale du sol par conséquent des échantillons à la même teneur en eau initiale aboutissent à la même variation de volume indépendamment du chemin de contrainte suivi, alors qu’une différence de 0,5 à 1 % donne des variations de volume différentes pour le même chemin de contraintes Karalis (1977) montre qu’il y a une variation presque linéaire du taux de gonflement en fonction de la teneur en eau.

Edil et Alnazi (1992)[28] trouvent que la teneur en eau initiale des échantillons compactés à la même densité sèche a une influence considérable sur les caractéristiques du gonflement , le gonflement latéral et vertical augmente lorsque la teneur en eau initiale diminue.

Les essais réalisés par Al-Mukhtar et al Sur l'argile (Laponite) à différentes humidités initiales montrent que la pression de gonflement est invariable avec le degré d'humidité initial tandis que le gonflement augmente avec la diminution de ce degré.

Des résultats observés par Alonso et al (2005)[22] montrent que le gonflement pour différentes teneurs en eau initiales suit une loi linéaire, La nature de cette relation autorise la définition d'une teneur en eau critique (égale à 22 %) qui donnerait lieu à un gonflement apparent nul. Pour ce cas critique, la variation de la teneur en eau volumique fournirait une mesure de gonflement qui se produit dans les pores.

Des résultats établis par Hachichi et Fleureau (1999)[25].ont établi qu'en fait la teneur en eau exerce un effet négligeable sur la pression du gonflement tant qu'elle est inférieure à la limite du retrait du sol. Pour des teneurs en eau au-delà de la limite de retrait l'effet devient marqué.

Sturatman a aussi effectué des essais sur la montmorillonite, l'illite, et la kaolinite et il a trouvé que tant que la teneur en eau diminuait le gonflement augmentait.

2.d)- Influence de la densité sèche :

De multiples travaux, notamment ceux de Chen ont permis de montrer que le gonflement et la pression de gonflement varient considérablement avec la densité du sol Suratman (1985)[30] a réalisé des essais sur la montmorillonite, l'illite et la kaolinite et a trouvé les mêmes résultats que Chen (1988)[31], Sridharan et al (2000)[26] ont mené 32 essais de gonflement à volume constant avec quatre teneurs en eau initiale.

Komine et Ogata (1994) [32] ont effectué des essais de gonflement sur 4 bentonites Na compactées à différentes densités sèches initiales. Ils ont pu voir que le taux de gonflement croît linéairement avec la densité sèche initiale.

2.e)- Effet d'échelle :

L'effet d'échelle consiste à examiner l'influence de la hauteur ou du diamètre de l'échantillon sur le gonflement libre ou sur la pression de gonflement. Cet effet est fréquemment observé en mécanique des sols.

Dans des conditions œdométrique de déformations, les essais effectués par Chen sur l'argile de Denver et par Vayssade sur l'argile verte ne montrent aucune influence de la hauteur sur le gonflement libre.

Cependant, les essais réalisés par Khaddaj sur l'argile de Flandre présentent une diminution du potentiel de gonflement de 20 % quand l'épaisseur de l'échantillon passe de 12 à 24 mm.

En ce qui concerne la pression de gonflement, Khaddaj montre une augmentation de cette dernière avec la hauteur de l'échantillon. La pression varie de 116 à 275 KPa, lorsque la hauteur de l'échantillon passe de 12 à 54 mm.

D'un autre côté, les essais réalisés par Duilio sur les bentonites montrent que la pression de gonflement ne dépend pas de la hauteur de l'échantillon.

2.f)- Influence du régime de contraintes :

Le gonflement par saturation décroît lorsque la pression appliquée augmente. On arrive ainsi à la notion de pression de gonflement qui correspond à un gonflement nul.

A l'échelle microscopique, la contrainte mécanique appliquée est compensée par les pressions physico-chimiques et osmotique inter particulaires de nature répulsive dépendant de la distance inter feuillet. Plus la pression appliquée est élevée, plus l'espacement inter feuillet est réduit. Pour une pression supérieure à la pression de gonflement, le matériau argileux a tendance à se tasser ou à s'effondrer.

2.g)- Influence du frottement latéral :

Le frottement latéral contre les parois des cellules de mesure du gonflement est non négligeable. Il dépend principalement des dimensions des éprouvettes et des conditions de mise en place des échantillons, dans sa thèse a cité que Suratman (1985)[30].

Hachichi et Fleureau (1999) [25] ont remarqué que le gonflement diminue lorsque la hauteur de l'échantillon augmente et ceci est dû au frottement latéral entre l'anneau volumétrique et l'échantillon.

Aussi Mehmit (1982) [33] a remarqué l'influence du fluide hydratant sur les paramètres du gonflement, ces paramètres du gonflement qui varient avec le type des ions présents dans le fluide hydratant. L'hydratation avec de l'eau pure donne un gonflement plus important tandis que l'hydratation avec une eau déminéralisée conduit à surestimer l'activité de gonflement et à sous-estimer son taux de gonflement Didier et col (1973)[34]. Bouroukba et col (2001)[35] ont pu montrer l'efficacité de diverses solutions salines pour réduire le gonflement d'un sol avec des concentrations salines différentes.

2.h)- Influence de la température

La température intervient pour accélérer les échanges d'ions et ainsi augmenter les capacités d'échange Mouroux (1969)[36] et Mehmit et Ishibashi (1982)[33] ont trouvé que la température affecte le taux de gonflement, et les expériences menées ont montré une réduction de 17% à 28% quand la température diminue de 66°C jusqu'à 24 °C.

2.i)- Influence des Cycles retrait- gonflement :

Si le retrait d'un sol de surface se poursuit au delà de sa limite de retrait (WR dans la symbolique des limites d'Atterberg), cela peut entraîner sa fissuration jusqu'à une profondeur pouvant atteindre plus de 2 m et avoir pour conséquences :

Le développement de très fortes pressions de succion de l'eau d'une nappe vers les couches de terrains qui lui sont sus-jacentes créant ainsi un fort potentiel de gonflement ; l'apport direct d'eau à travers les fissures sur une épaisseur importante de sol. De ces deux conséquences, un gonflement d'ensemble important peut se produire et s'accompagner d'une perte totale de consistance en surface. L'état très lâche de ces sols les rendra, par la suite, encore plus sensibles au retrait et à la fissuration, donc plus sensibles encore une hydratation brutale et massive, et à un gonflement conséquent.

Cette alternance de cycles retrait- gonflement ne connaît pas de fatigue dans la pratique et peut facilement perdurer plusieurs dizaines d'années si aucune mesure n'est prise pour empêcher soit la déshydratation, soit l'hydratation des sols.

Ce sont, soit des cycles de compression-décompression, soit des cycles d'humidification- dessiccation. Lorsque ces cycles ont le même état initial et le même état final, ils diminuent généralement le gonflement d'après les résultats de Chen (1965)[37].

Chen et al (1985) [38], Chen & Ma (1987) [39], Subba Rao et Satydas (1987) [40], Dif et Bluemel (1991) [41] ont conclu qu'après chaque cycle d'humidification et de la dessiccation, la teneur en eau initiale des échantillons diminue ce qui induit à la diminution de potentiel de gonflement des argiles.

Cependant, d'autres auteurs Poposco (1980)[42], Osipov et al (1987)[43] et Day (1994)[44] disent que la teneur initiale en eau augmente qu'après chaque cycle de (humidification- dessiccation) répétitif ce qui induit à l'augmentation de potentiel de gonflement.

2.k)- Influence de la durée des essais :

La durée d'essai est aussi un facteur influant sur l'estimation du gonflement. Il a été constaté que le gonflement est rapide durant les premiers jours d'essais, puis devient de plus en plus lent, et après une semaine le phénomène se stabilise. Cette constatation n'est pas toujours vraie par ce que nous avons trouvé des essais qui durée 15 jours ou plus pour atteindre la stabilisation. Suivant la nature des sols étudiés, la stabilisation du gonflement peut être obtenue après plusieurs jours.

2.1)- Influence de l'épaisseur :

Le gonflement résultant à la surface d'un sol croît avec l'épaisseur du sol concerné. Les courbes de variation des déformations relatives $\Delta H/H$ (%) en fonction de la profondeur. Cette courbe est à rapprocher des courbes de calcul de tassement habituellement rencontré en mécanique des sols.

La pression du gonflement en surface va croître avec l'épaisseur du sol concerné par les variations de la teneur en eau ou des pressions de succion.

Dans le cas des variations saisonnières de la teneur en eau, et donc de l'état d'humidité du sol, on remarque que la pression de gonflement sera soumise à des une tentative de relier la variation de la pression de gonflement à la diffusion des contraintes dues aux fondations dans le sol pour des constructions légères et lourdes est présentée. La distance qui sépare les courbes de diffusion des contraintes à celle de la pression de gonflement représente le potentiel de gonflement, ce dernier est plus élevé dans le cas des constructions légères.

I.4 Stabilisation des sols gonflants :

Plusieurs chercheurs ont étudié la stabilisation des sols expansifs. Le gonflement des sols argileux est un phénomène très complexe qui fait intervenir un grand nombre de paramètres intrinsèques et environnants. Cette complexité est due principalement à la structure minéralogique de l'argile (mélange d'illites et montmorillonites).

Au début des années 80, beaucoup d'auteurs se sont intéressés aux problèmes des sols gonflants et leur stabilisation.

D'une manière générale, les procédés les plus utilisés dans le domaine géotechnique pour stabiliser les sols argileux sont les suivantes :

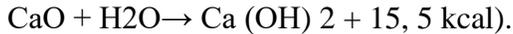
I.4.1 Stabilisation par ajout de la chaux :

La chaux provoque deux actions différentes dans le sol: une action immédiate, qui se produit directement après que la chaux soit mélangée au sol et une action à long terme, qui peut durer entre plusieurs mois et quelques années après la mise en œuvre .

1)-La chaux vive :

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

L'hydratation de la chaux vive: une partie de l'eau «disparaît» via la réaction exotherme avec la chaux vive :



Chaux vive + eau = Chaux éteinte + Chaleur

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

L'apport de matière sèche qui diminue le rapport de la masse d'eau à la masse de solide (teneur en eau).

La diminution attendue est de 1 % de teneur en eau par pourcent de chaux vive introduite.

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

On utilise la chaux aérienne 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 a les mêmes effets que 4% de chaux éteinte) :

2)- La chaux éteinte :

2.a)- Action à court terme :

La chaux éteinte diminue également la teneur en eau mais uniquement via l'apport de matière sèche dans le sol. La 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'argile et modifie ainsi les champs électriques entre ces particules. Ceci entraîne leur floculation, ce qui a des conséquences non négligeables sur les caractéristiques géotechniques du sol. La limite de plasticité augmente (wP), mais la limite de liquidité (wL) reste presque inchangée. Il en découle que l'indice de plasticité ($IP = wL - wP$) diminue.

La (figure. I-9) montre que les phénomènes combinés de la diminution de la teneur en eau naturelle du sol traité et de la diminution de l'indice de plasticité peuvent faire passer un sol de l'état plastique (déformable, collant -donc difficilement compactable) à l'état sec (rigide, frottant, friable - donc beaucoup plus facile à travailler). Le traitement à la chaux réduit donc la valeur maximale de la masse volumique apparente sèche et augmente la valeur de la teneur en eau permettant de l'obtenir.

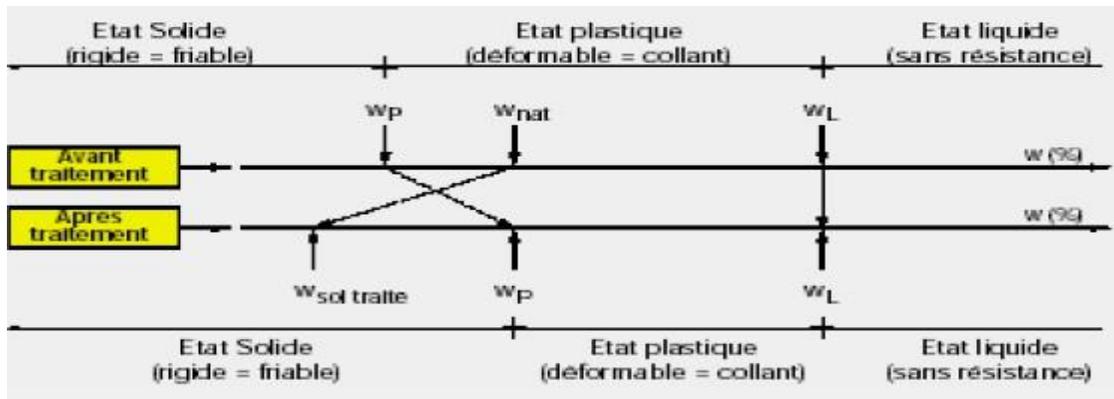


Fig. I- 9.—Variation d’indice de plasticité en ajout de la chaux.

La (figure. I-10) montre que la courbe Proctor d’un sol traité est déplacée vers la droite et vers le bas par rapport à la courbe du sol naturel. Ce déplacement est d’autant plus marqué que le sol réagit bien avec la chaux.

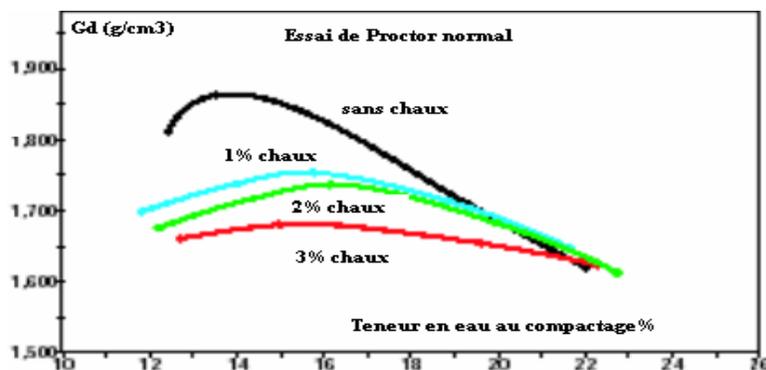


Fig. I- 10.—Influence de la chaux sur les caractéristiques de compactage.

2.b)- Action à long terme:

C'est une action pouzzolanique qui se produit. Elle est due à la mise en solution en milieu de pH élevé (supérieur à 12) de la silice, de l'alumine et des oxydes de fer présents dans les minéraux argileux sous des formes cristallisées plus ou moins altérées. Ces éléments en solution réagissent ensuite avec la chaux pour former des ferro-silico-aluminates de calcium insolubles qui précipitent et cristallisent en présence d'eau, créant ainsi des liaisons de même nature que celles produites avec les liants hydrauliques.

Ces phénomènes se développent en général très lentement (plusieurs mois, voire des années) dans nos climats. Ils sont influencés par la température du milieu, la quantité et la nature de la fraction argileuse

du sol et la teneur en eau du sol. Cette action a lieu à partir de pourcentages de chaux ajoutés de 3 à 4 %, en fonction des caractéristiques du sol.

Si, à court terme, une certaine résistance est également souhaitée, un traitement complémentaire avec un liant hydraulique est nécessaire. La préparation d'un sol argileux à la chaux entraîne la formation de grumeaux qui rend ce sol bien apte à recevoir un traitement au ciment par exemple.

La réaction de ce ciment avec le sol traité à la chaux consiste surtout en une hydratation de silicates et aluminates de calcium (ajoutés sous forme anhydride). Ils passent en phase liquide, après quoi les produits hydratés durcissent (liaison hydraulique).

Par la croissance, l'imbrication et la - ramification de plus en plus grande des microcristaux qui apparaissent, les grains de sols sont soudés et liés. De cette manière, ils forment des liaisons de plus en plus nombreuses et dures. Le mélange durcit et atteint des résistances mécaniques élevées, une grande résistance au gel et une bonne imperméabilité.

Galloway et Buchanan (1951) [45] ont montré que la relation de la chaux avec l'argile est le résultat de deux processus :

Une réaction d'échange ainsi qu'une adsorption d'ions calcium non échangé, le résultat est une diminution de la capacité d'échanger.

Un agent cimentant se forme, il lie les particules entre elles, la chaux peut en effet stabiliser également les sols non gonflants.

Des expériences faites par Golbet et Klein (1987) [45] ont montré que de faibles pourcentages de chaux (2 à 6%) entraînaient une réduction importante du gonflement. Des conclusions équivalentes furent données par Jones, Michell et Spangler (1984) [46].

Abdeljawad et al (1994)[47] ont étudié l'influence de la variation de volume des constituants sur les caractéristiques des argiles gonflantes. L'étude a été effectuée sur des échantillons d'argiles anhydride. Il a été trouvé pour les deux types de mélanges à différentes le pourcent (0, 5, 10,20).des ajouts de anhydride ou de gypse.

La stabilisation par la chaux des est affectée par les cycles mouillage -séchage. En d'autres termes, l'effet principal de la chaux sur le potentiel de gonflement est partiellement perdu, si le sol est soumis à cycles de mouillage - séchage. Ces résultats amènent à déconseiller ce genre de traitement dans régions à saisons variables (humidification /séchage).

2.c)- Épandage de la chaux :

Indiqué par le laboratoire en poids au m², le pourcentage de chaux à épandre in-situ se situe entre 2 et 4% du poids du sol sec. Le débit de l'épandeur doit être correctement réglé. La vérification du dosage est possible avec une méthode simple : faire passer l'épandeur sur une toile de 1 m² posée sur le sol et peser la quantité de chaux étendue sur celle-ci. Le résultat doit correspondre, à plus ou moins 10 %, aux normes du laboratoire. Lorsque le sol est trop sec, il peut être nécessaire de répandre de l'eau afin de permettre à la chaux de réagir convenablement (ou arrosage au lait de chaux).

3.d)- Malaxage de la chaux :

Le nombre de passages du malaxeur à déterminer sur chantier, dépend à la fois de la nature du sol et de la puissance de l'engin. Trois catégories de malaxeurs sont utilisées :

Pour les sols caillouteux ou graveleux, les malaxeurs à axes verticaux. Ils sont équipés de Rotors comprenant trois lames d'inclinaisons différentes (parfois à angles réglables pour mieux s'adapter à la nature du sol). Certains modèles récents peuvent recevoir, à l'avant, des socs qui effectuent un défonçage préalable. Leur rendement est de l'ordre de 1 000 à 3 000 m²/jour.



Fig. I- 11.— Système d'homogénéisation de sol avant d'ajouter un liant hydraulique.

I.4.2 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, auxquels il apporte cohésion, résistance mécanique, stabilité à l'eau et au gel.

L'action, de stabilisation par les ciments, est complexe et dépend de la nature du sol, de la teneur en ciment, de la teneur en eau et des conditions de température Johnson (1960)[48]. De plus, la présence de la chaux dans les ciments provoque des réactions d'échange.

Les pourcentages utilisés varient, comme pour la chaux, de 2 à 6%. Le ciment est parmi les liants les plus fréquemment utilisés dans le traitement de sols de surface dans la même étude, des valeurs de CEC de capacité (d'échange) cationique ont été mesurées pour indiquer les changements de la minéralogie des cendres volantes des sols traités et ce pour expliquer la réduction du potentiel de plasticité et d'absorption de l'eau. Les faibles valeurs de CEC indiquent que le traitement par les cendres volantes change la minéralogie du sol traité et produit de nouveaux minéraux secondaires.

La stabilisation de sols au ciment trouve son application tant pour les couches de surface que pour la zone supérieure de la couche de fondation ou de la sous-couche de fondation ou de la sous-couche de routes et chemins de toute nature.

On l'utilise également pour d'autres surfaces de circulation, telles que : chemins ruraux, pistes cyclables ou chemins pour piétons, aires de trafic sur les aéroports, sites industriels, sols de halls, dalles de fondation, terrains de sport, etc. Dans le secteur de la construction ferroviaire, la stabilisation des sols au ciment se pratique par exemple pour réaliser une plate-forme ou une couche portante sous le ballast.

Le plus souvent, le ciment est répandu préalablement par des épandeurs automoteurs. Bien que le dosage du ciment répandu s'effectue avec précision, il peut arriver qu'une partie s'envole sous l'action du vent. Si le taux d'humidité du sol est insuffisant, la manière la plus simple d'effectuer l'adjonction d'eau consiste à asperger à partir d'un camion citerne.

Cette méthode manque toutefois de précision, provoque souvent l'apparition de flaques, ce qui peut, le cas échéant, retarder le bon déroulement des opérations sur le chantier.

Il est plus recommandé d'utiliser un dispositif intégré qui injecte directement l'eau nécessaire à la stabilisation dans la chambre de malaxage.

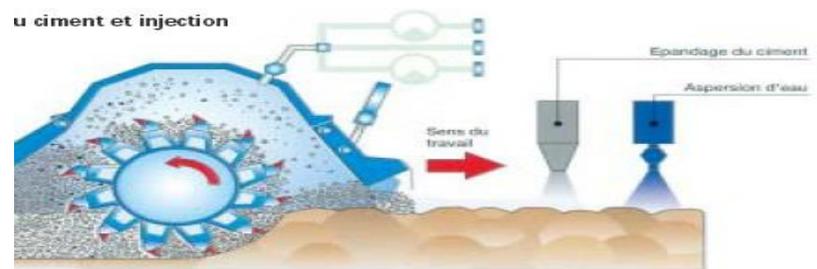


Fig. I- 12.— Appareil d'incorporation Fig. I- 13.— Système d'épandage de ciment



Fig. I- 14.—Epandeur des liants Hydrauliques. Fig. I.— Appareil de compactage du sol.

Plusieurs auteurs ont étudié l'influence de l'ajout de sable sur le gonflement. Nous citerons certaines d'entre elles :

Satyanarayana (1969)[49], a étudié le comportement de l'argile de Black Cotton au sud de l'Inde sous forme de mélange avec le 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 (différence marquée à partir 50% de sable).

L'insertion de couches de sables (différentes positions avec l'argile), réduit la pression du gonflement en proportion appréciable due principalement à la capacité du sable à absorber le gonflement de l'argile. Cette capacité du sable dépend de la facilité de la couche de sable avec laquelle elle se déforme par compression ou, par mouvement latéral.

Komornik et Livneh (1969)[50] ont étudié l'influence de la granularité des constituants sur les caractéristiques des argiles gonflantes. Pour cela, ils ont utilisé des mélanges argile - sable et argile-marbre à différents pourcentages. Il a été constaté que la diminution du taux du gonflement des différents mélanges est due à la faible densité sèche de l'argile et à l'augmentation du matériau inerte dans les mélanges. Ainsi, ils ont constaté qu'il y a une influence du taux de l'humidité de l'argile sur la valeur de la pression du gonflement.

Mouraux (1969)[51], a montré dans sa thèse que, si la couche gonflante est d'une grande épaisseur, de manière à ne pas pouvoir l'excaver complètement alors, il faut excaver jusqu'à une certaine profondeur puis, remblayer pour rétablir les conditions de pression initiale. Pour cela, souvent c'est le sable qui est utilisé. Le bas du remblai est faiblement compacté et ce pour deux raisons :

Le haut du sol gonflant serait très compact, et par conséquent son potentiel de gonflement est élevé.

Le bas du remblai peut alors « encaisser » un gonflement éventuel.

Seed, Woodward et Lugren (1969) [52] ont retenu trois paramètres significatifs de l'aptitude au gonflement d'un sol : Le pourcentage d'éléments argileux inférieur à $2\mu\text{m}$ et leur nature minéralogique, l'indice de plasticité et l'indice de retrait.

Les auteurs ont mesuré le potentiel de gonflement de sols artificiels préparés en mélangeant des minéraux argileux avec diverses quantités de sables. Ce mélange permet de diminuer le pourcentage. L'influence sur la pression de gonflement et, sa relation avec le pourcentage des éléments inférieurs à $2\mu\text{m}$ dans l'échelle bi logarithmique est linéaire.

Myondo (1979)[53] a étudié l'effet du compactage et de la résistance au cisaillement de deux argiles de composition minéralogique différente mélangées avec le sable grossier à différents pourcentages. Il a obtenu les résultats suivants :

La granularité et la minéralogie influent sur la compactibilité des sols.

Mise en évidence d'une limite granulométrique à 30% d'argile (70% de sable) correspondant à la meilleure compacité obtenue sous l'effet de l'énergie de compactage Proctor modifié.

Les résultats des essais de cisaillement sont :

La cohésion augmente avec le pourcentage d'argile.

Le coefficient de frottement (t_g) diminue avec l'augmentation de la quantité des fines dans les mélanges argile-sable et la variation est presque linéaire.

Une partie de l'étude d'El Sayed et El Sohby (1981)[13] a porté sur le traitement d'un sol argileux gonflant par ajout de sable et de limon à différentes concentrations. Ils ont constaté que la grosseur de la fraction non argileuse a une influence sur le gonflement. C'est-à-dire, que les particules fines provoquent un gonflement important. En plus, la pression de gonflement pour les mélanges argile-limon était plus importante que celle des mélanges argile-sable.

Mehmit et Ishibashi (1982)[33] ont mené une investigation expérimentale sur 8 mélanges argile-sable. Ils ont étudié la variation du gonflement en fonction de la température (à 24°C , 38°C et à 66°C). Ils ont constaté que plus le pourcentage du sable augmente, plus le gonflement diminue. Ils ont remarqué aussi, une réduction de 17% à 28% du gonflement quand la température diminue.

Suratman (1985) [30] a étudié la variation du gonflement d'un mélange de montmorillonite et de sable à différents pourcentage (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.

Louafi.B (1997)[54], Bougraa. H et col (2004)[55], ont été tenté de réduire le potentiel de gonflement et sa pression par ajout du sable a des argiles étudiées ces sables à granulométrie et à pourcentages différents. Aussi ont été observé l'évolution du gonflement dans le temps, où ils ont remarqué que les résultats obtenus étaient satisfaisants et conformes aux recherches déjà établies.

I.4.3 Stabilisation chimique par solutions salines :

Cette technique est semble-t-il préconisée en Afrique du Nord Bekkouche et al (2002)[56] mais s'avère discutable quant a son efficacité. En effet, elle présente des résultats très variables selon les sols et les sels employés (CaCl_2 , KCl ...). Leur principe d'action est basé sur les propriétés d'échanges cationiques des argiles. A priori toute adjonction d'un sel comportant un cation monovalent (NaCl , KCl , LiCl) est a proscrire étant donne le caractère dispersant induit par ces cations sur les propriétés des argiles.

De plus, d'après Tessier (1984) [57] leur action est temporaire, dans la mesure où l'eau d'infiltration contribue a lessiver les sels et a augmenter le gonflement .De nombreux travaux ont montré que la stabilisation par les sels pouvait réduire considérablement le gonflement des argiles. Nous citerons quelques exemples de ces travaux.

Peele (1937)[58] a remarqué que le carbonate de calcium augmente la résistance du sol à l'érosion. Il permet d'augmenter le potentiel floculé des argiles.

Haxaire (1956)[59] a déterminé la quantité du molécule organique pouvant se fixer sur la montmorillonite en essayant de relier cette fixation avec la structure, la nature et l'ionisation de ces molécules. Des familles de molécules organiques ont été ainsi étudiées. Il a montré aussi que certaines molécules telles que la guanidine et la benzine se fixent irréversiblement en quantités supérieures à la capacité d'échange de base sur la montmorillonite.

Itis (1979)[60] a étudié plusieurs ses types de gonflement en présence de plusieurs types de sels. Cette étude a mis en évidence deux agents stabilisants, le chlorure de potassium et le chlorhydrate de guanidine.

I.4.4 Traitement par des polymères :

Des polymères de type Carboxyle Méthyle Cellulose (CMC), peuvent être injectés dans les sols afin d'augmenter leur résistance et ainsi diminuer leur capacité gonflante. Cette méthode, coûteuse, est à priori le meilleur des traitements, à ceci près qu'elle est extrêmement nocive pour l'environnement et provoque une stérilisation.

I.4.5 Stabilisation thermique :

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

I.4.6 Stabilisation mécanique :**6.a)- Méthode de substitution :**

Il s'agit de remplacer le sol gonflant par un sol non gonflant, c'est la solution la plus évidente. Si la couche a une grande épaisseur, la suppression totale ne peut être envisagée. Elle consiste à excaver jusqu'à une certaine profondeur puis remblai avec des sable ou autres matériaux graveleux ; cette solution est très coûteuse.

6.b)- Méthode de compactage :

Elle consiste à baisser la densité en place du sol. Chen (1988)[31] à suggérer pour les sols très expansifs un compactage à faible densité. L'argile expansive se développe très peu lorsqu'elle est compactée à une basse densité et une grande teneur en eau, contrairement à ce qui se produit pour un compactage à une grande densité et une faible teneur en eau.

6.c)- Méthode de préhumidification :

Elle consiste à augmenter la teneur en eau du sol jusqu'à saturation, nous aurons donc le maximum de gonflement, d'après Chen, cette méthode est basée sur les hypothèses suivantes :

le sol permet un gonflement par humidification précédant la construction réalisant ainsi un état de non soulèvement, il faut donc compter sur la permanence de la teneur en eau artificiellement créée deux techniques sont utilisées : Simple arrosage par jet. Création de bassins au-dessus du sol gonflant, et c'est beaucoup plus utilisé.

6.d)- Utilisation de fondations et d'édifices spéciaux :

Elles sont utilisées, soit pour réduire le gonflement, soit pour dissiper les pressions du gonflement. L'étude la plus intéressante était faite par Jennings et Evans (1962)[62] elle donne, en effet, plusieurs types de construction suivant le soulèvement estimé. Elle comprend :

Des renforcements en acier des murs pour assurer une plus grande rigidité.

Des « constructions Split », c'est-à-dire, conçues pour assurer le déplacement éventuel sans dommage d'une partie de l'édifice. Des reports de charges sur des semelles isolées. Des pieux fondés sur une couche peu gonflante.

Par ailleurs, on peut placer un tapis graveleux entre l'argile et la construction pour amortir l'effet du gonflement.

6.e)- Drainage :

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

6.f)- Méthode de traitement mixte :

On utilise d'abord la chaux à faible dose (0,5 à 2 %) ensuite le ciment ces deux liants ayant une action complémentaire, la chaux par son action immédiate amène le sol à un état optimal pour le traitement au ciment, cette technique convient à un sol pas trop plastique < 30 à cause de la difficulté du malaxage qui ne contient pas les cailloux, cette technique est préférable pour les régions soumises aux phénomènes de gel dégel, plusieurs chercheurs ont travaillé avec cette technique tel que Lamara et Gueddouda (2005)[63].

I.5 Conclusion :

Face à un tel problème géotechnique d'interaction sol-structure qui est assez complexe, il y a nécessité de réfléchir à une solution efficace et surtout économique dans le but de minimiser ou inhiber les effets de gonflement-retrait sur les ouvrages. On dispose pour cela de plusieurs classes de solutions :

Solutions visant à éviter aux fondations les effets du gonflement comme par exemple; la méthode de préhumidification (technique ancienne) mais elle est lente.

Remplacement du sol gonflant par un autre matériau non expansif présentant de meilleures qualités géotechniques. Cette solution peut s'envisager dans le cas où la couche du sol gonflant n'est pas importante et le matériau de remplacement est disponible à proximité du site.

Solutions visant la stabilisation du sol gonflant en vue de modifier ses propriétés et d'améliorer ses performances techniques en ajoutant un additif ; comme la stabilisation par des sels qui est une méthode très répandue au Etats- unis qui donne de très bonnes résultats mais elle est considérée coûteuse par rapport à des pays en cours de développement comme l'Algérie.

Le choix des techniques de stabilisation 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.

Parmi tous les techniques de stabilisation des sols gonflants , on a choisit dans notre programme expérimental, une technique simple et économique qui est la technique de stabilisation par l'ajout de la sable calcaire puisque l'Algérie est un pays connu par sa production à la sable calcaire, en plus les nombreux avantages de cette technique de traitement tel que l'amélioration des résistances mécaniques ,diminution de la plasticité ,du gonflement seulement avec des faibles dosages en sable calcaire par rapport aux autres techniques qui demandent un dosage important comme le ciment ou des techniques coûteuses comme la stabilisation thermique ou par ajout des sels ou sinon des techniques qui demandent une distribution uniforme de w_n avec un temps d'opération très long comme la technique de préhumidification ou le compactage.

Mais par contre, le problème qui réside dans la technique de l'ajout de sable calcaire pour former de faibles agents de cimentation comme les carbonates de calcium, ce phénomène on le réduit par un compactage rapide qui suit directement le malaxage.

Le deuxième problème de cette technique est la profondeur, sur chantier la technique est adoptée quand il s'agit d'un projet routier mais quand le sol gonflant se trouve à une profondeur de plus de 50cm par exemple, maintenant les chercheurs ont pensé à travailler avec lait de chaux qu'on injecte au sol sous pression, à une profondeur courante de 1.50 mètre et qui peut aller jusqu'à 6 et même 12 mètres. Cette technique américaine est très utilisée pour stabiliser des remblais ou des terrains naturels destinés à la construction des bâtiments.

Mais avant de penser à cette méthode, il faut d'abord s'assurer des résultats qui donnent cette technique de traitement avec les différents sols argileux. C'est ce qu'on va aborder nous dans les chapitres qui suivent.

CHAPITRE
II. PROCEDURE
ET TECHNIQUES
EXPERIMENTALES

II.1 Introduction :

Ces dernières années plusieurs méthodes de prédiction de gonflement ont été établies. Elles se basent sur les propriétés géotechniques des sols.

Les limites de consistance, la teneur en eau initiale, la densité sèche initiale (ces deux paramètres correspondent à ceux pris au moment de l'échantillonnage), la limite de retrait et la fraction argileuse.

Ces mêmes paramètres sont utilisés pour prédire la pression de gonflement. La prévision du gonflement a été basée selon certains sur des comparaisons avec les essais œdométrique.

Les résultats obtenus indiquent, pour la majorité des cas traités, que le potentiel de gonflement obtenu est plus grand par rapport aux mesures prises in-situ.

II.2 Mesure des paramètres de gonflement :

L'essai œdométrique permet de mesurer de manière directe la pression et l'amplitude du gonflement.

Un essai œdométrique de gonflement libre a été réalisé permettant de déterminer l'amplitude du gonflement et d'autres essais ont été réalisés en imposant une charge à l'échantillon au départ de l'essai dans le but d'observer de quelle manière le gonflement était contrecarré par une contrainte.

Les méthodes indirectes permettent, à l'aide de certains paramètres géotechniques simples comme les limites de consistance d'Atterbeg, le pourcentage d'argile, la teneur en carbonate de calcium, la limite de retrait, d'estimer le potentiel de gonflement d'un sol argileux.

II.2.1 Mesure indirecte du potentiel de gonflement :

II.2.1.1 Généralité

De nombreuses méthodes ont été proposées dans la littérature pour évaluer le potentiel de gonflement d'un sol à partir de la mesure des paramètres de plasticité et de granulométrie. Pour les argiles présentées dans cet étude, le potentiel de gonflement est analysé à l'aide des méthodes de BRE, Chen (1988)[31], Seed & al. (1962)[14], Snethen (1984)[64].

Certaines approches sont basées sur un seul paramètre, et d'autres sur la combinaison de deux ou trois paramètres. Plus le nombre combiné est grand, plus l'évaluation du potentiel de gonflement est meilleure.

Dans ce qui suit, nous allons présenter trois classifications établies par différents auteurs, et utilisées pour évaluer le potentiel de gonflement des sols expansifs.

II.2.1.2 Classification :

2.a)- Classifications selon un seul paramètre :

Tous les sols très gonflants ont un très grand indice de plasticité I_p mais la réciproque n'est pas vraie. On peut évaluer le gonflement possible en fonction de I_p de la manière suivante :

Tab.II- 1.—Classification du potentiel de gonflement d'un sol en fonction de son indice de plasticité.
(D'après Mouroux et al, 1988)[65].

Potentiel de gonflement	Indice de plasticité I_p (%)
Faible	0-15
Moyen	10-35
Elevé	35-55
Très élevé	> 55

2.b) Combinaison de deux paramètres :

Tab.II- 2.— Classification du taux de gonflement à partir de la limite de liquidité et l'indice de plasticité (d'après O'neil et Poormoayed, 1980) [66].

WL %	I_p	Classification
20-49	15-24	faible à moyen
50-70	24-46	élevé
>70	>46	très élevé

2.c) Combinaison de trois paramètres :

Tab.II- 3.—Evaluation du degré de gonflement en terme de la teneur en argile, de l'indice de plasticité et de la limite de retrait (d'après Holtz et Gibbs, 1956)[67].

Données de base			Soulèvement probable % variation de volume	Potentiel de gonflement
des fines <1 μ Pourcentage	Indice de plasticité	Limite de retrait		
>28	>35	<11	>30	Très important
20-13	25-41	7-12	20-30	Important
13-10	15-28	10-16	10-20	Moyen
<5	<18	>15	<10	Faible

II.2.2 mesure directe des paramètre de gonflement :

Dans la mesure directe, trois paramètres sont utilisés pour qualifier le gonflement : le taux de gonflement ou gonflement libre, défini par $A_g = dh/ho$, la pression de gonflement P_g , pression qu'il faut appliquer à l'échantillon de sol pour empêcher son gonflement lors de l'hydratation et l'indice de gonflement C_g qui traduit l'importance de la déformation de gonflement induit par un déchargement par rapport à un état de contraintes donné.

II.2.2.1 Mesure du gonflement libre :

L'essai de gonflement unidimensionnel en fonction du temps est effectué à l'oedomètre. L'échantillon est placé dans une trousse entre deux pierres poreuses qui permettent le drainage et la saturation complète de l'échantillon. Le sol est ensuite inondé et est libre de gonfler verticalement, sous la pression du piston.

$$G = (\Delta H / H) \cdot 100$$

Le gonflement libre correspond pour l'ingénieur à celui observé au contact de l'eau (encore une fois à la pression atmosphérique). L'essai de gonflement dit « à volume constant » : dans ce cas, la contrainte mécanique initiale est nulle (au poids du piston près ; il s'agit de la contrainte en excès par rapport à la pression atmosphérique) ; lors de l'humidification, au contact d'une eau distillée, et si on interdit toute

déformation, il se développera une pression sur le piston, qui atteindra, à l'équilibre une valeur σ_g appelée pression de gonflement à volume constant.

Seed (1962) [14] a défini le potentiel de gonflement comme le pourcentage de gonflement d'un échantillon inondé, sous la charge du piston après avoir été compacté à l'optimum proctor.

Snethen (1977) [64] a défini le potentiel de gonflement comme l'équilibre du changement de volume, ou la déformation est exprimée en pourcentage de la hauteur d'un échantillon non remanié à la saturation, sous une charge équivalente à la pression in situ.

Les normes ASTM (1986)[68] définissent le pourcentage de soulèvement comme le pourcentage d'augmentation ou de diminution dans le rapport du changement vertical de la hauteur de la colonne de sol in situ. Pour un échantillon testé le potentiel de gonflement est lié à la surcharge appliquée, à la teneur en eau initiale et à la densité sèche initiale.

L'indice d'expansion a été proposé par les normes ASTM (1986)[68]. Cet indice est donné par :

$$IE = (\Delta H / H_0) \cdot 100 \%$$

L'échantillon de sol est tamisé avec un tamis de 4mm, de l'eau lui est ensuite rajoutée jusqu'à ce que le degré de saturation soit compris entre 49 et 51%. l'échantillon est ensuite compacté en deux couches jusqu'à ce que sa hauteur soit égale à 5cm.

Chaque couche est compactée sous une énergie de 15 coups avec une dame de 12,128 kg, tombant d'une hauteur de chute de 30,48cm. l'échantillon est ensuite consolidé sous une pression de 0,2048 kg pour 10mn, puis inondé et autorisé à gonfler.

Avec : $\Delta H = H_f - H_0$

H_0 : Hauteur initiale.

H_f : Hauteur finale après stabilisation.

Tab.II- 4.—Relation entre l'indice d'expansion et le potentiel de gonflement.

(D'après les normes ASTM, 1986).

Indiced'expansionIE (%)	Potentiel de gonflement
0-20	Trèsfaible
21-50	Faible
51-90	Moyen
91-130	Fort
>130	Très fort

II.2.2.2 Mesure de la Pression de gonflement :

2.a) Définitions:

La pression de gonflement n'est pas une caractéristique intrinsèque du sol, elle est fonction de son état d'humidité au moment de l'essai. La mesure de cette pression n'a de sens que si le sol testé est à l'état naturel.

La procédure couramment utilisée pour la détermination de la pression de gonflement est de placer un échantillon de sol non remanié dans un oedomètre est d'appliquer une surcharge qui est le poids du piston pendant 24 heures, saturer ensuite l'échantillon et mesurer le taux de changement de volume. L'échantillon gonflera jusqu'à équilibre, puis il sera chargé jusqu'au retour à son volume initial, la pression nécessaire pour ce faire est désignée comme pression de gonflement.

La pression de gonflement est affectée par plusieurs facteurs, essentiellement la densité du sol. La teneur en eau initiale du sol exerce un effet négligeable tant qu'elle est inférieure à la limite de retrait du sol, pour des teneurs en eau supérieure, l'effet est significatif.

Kassiff et Shalom (1971)[69] ont montré que pour des sols dont la teneur en eau est supérieure à l'optimum, la pression de gonflement est égale à la diminution de la succion suite à l'hydratation, et pour des teneurs en eau est au delà de l'optimum la pression de gonflement est égale à une fraction de la variation de la succion.

Par ailleurs on connaît plusieurs autres définitions de la pression de gonflement. D'après Agarwall et Shama (1973)[70] la pression de gonflement est :

La pression nécessaire pour maintenir le sol à son volume initial, quand le sol charger est inondée.

La pression nécessaire pour qu'aucun changement de volume ne soit possible lorsque le sol est inondé.

la pression nécessaire pour recomprimer le sol à son volume initial, quand le sol est inondé et laissé pour gonfler librement sous une surcharge très petite 0,01 kg/cm², la pression de gonflement peut aussi être affectée par :

Le type du minéral argileux

Le pourcentage d'argile présent dans le sol et l'épaisseur de la couche gonflante.

A partir d'une étude statistique sur 200 échantillons, David et Komornik ont déduit une relation

Qui permet d'estimer la pression de gonflement:

$$\text{Log}(P_g) = 2,08.WR + 0,006688y_d - 2,69w + 0,132 \quad (2.2)$$

La pression de gonflement P_z est donnée en kPa : la limite de liquidité W_L et la teneur en eau naturelle w sont en chiffre décimal tandis que le poids volumique sec y_d est en kN/m³.

En se basant sur les résultats de 270 essais de gonflement réalisés sur divers sols, Vijayvergiya et Ghazzaly ont proposé deux modèles qui permettent d'obtenir la pression de gonflement.

$$\text{Log } P_g = 1/12(OA_w - w + 23.6) \quad (2,3)$$

Dans ces modèles, la pression de gonflement P_g est donnée en kPa ; le poids volumique sec est en kN/m³, la limite de liquidité W_L et la teneur en eau naturelle w sont en chiffre décimal.

2.b) Méthode de mesure de la pression de gonflement :

Plusieurs méthodes permettent de mesurer la pression de gonflement, nous allons citer trois méthodes les plus utilisées :

2. b.1) Méthode du volume constant :

Cette procédure a la particularité de nécessiter au moins trois cellules oedométriques. En effet, trois échantillons provenant de la même carotte sont placés dans trois cellules oedométriques différentes et soumis chacun à une contrainte verticale différente.

Les échantillons sont ensuite humidifiés et les déformations verticales suivies jusqu'à la stabilisation (Bigot et col, 2000) [71]. Par définition la contrainte de gonflement verticale est celle qui correspond à

une déformation verticale nulle, elle est déterminée par interpolation. Dans ce cas aussi, il existe une procédure analogue utilisant l'appareil triaxial.

Le principe consiste à soumettre trois échantillons identiques placés dans des cellules triaxiales distinctes à des contraintes de confinement « $03-C_p$ » différentes. Les variations volumiques sont suivies jusqu'à la stabilisation. La pression de gonflement isotrope, qui est par définition celle qui correspond à une déformation volumique nulle est obtenue en traçant la courbe des variations volumiques en fonction des contraintes de confinement appliquées.

2. b.2) Méthode de gonflement libre :

Dans cet essai, le gonflement est dit libre puisque l'échantillon n' est soumis qu'à la charge du piston, ceci d'ail leurs pour des raisons de commodité. L'es sai consiste à placer l'échantillon dans la cellule oedométrique et de lui appliquer la charge due au piston. L'échantillon est ensuite mis en contact avec de l' eau, ce qu i va provoquer son gonflement.

Ce dernier est suivi à l'aide de comparateurs jusqu'à la stabilisation des déformations verticales. Après cette phase, des contraintes croissantes sont appliquées par palier sur j'échantillon jusqu'à le ramener à sa hauteur initiale.

La déformation maximale obtenue entre le début et la fin de l'imbibition représente l'amplitude de gonflement. La contrainte verticale nécessaire pour ramener l'échantillon à son état initial de déformation définit la pression de gonflement. Il existe une procédure semblable à celle-ci, elle utilise l'appareil triaxial et définit donc une pression de gonflement isotrope.

Dans ce cas, l'échantillon est placé dans la cellule triaxiale et soumis à une faible pression isotrope de confinement « $03-C_p$ », 03 est la pression de la cellule alors que C_p est une contre pression utilisée généralement pour améliorer la saturation.

Le gonflement de l'échantillon se produira lors de la saturation. La variation de volume de l'échantillon et la quantité d'e au absorbée sont lues directement sur les burettes prévues à cet effet. L'échantillon est ensuite ramené à son volume initial par l'application de pressions isotropes croissantes. La pression isotrope appliquée à la fin de cette phase définit la pression de gonflement isotrope.

2. b.3) Méthode de gonflement sous différentes pressions :

Appelé aussi essai de gonflement en parallèle ou encore essai gonflement-effondrement, qui consiste à placer plusieurs éprouvettes d'un même matériau dans différentes cellules œdométriques, chaque

éprouvette est chargée par une contrainte axiale constante après inondation, les résultats obtenus après stabilisation des déformations (gonflement ou tassement) seront représentés sous forme d'une courbe en ordonnée les déformations et en abscisse les contraintes axiales. L'intersection de la courbe avec l'axe des abscisses ou les déformations sont nulles représente la pression de gonflement (Philipponnat.G, 1991)[72]. Figure II.1.

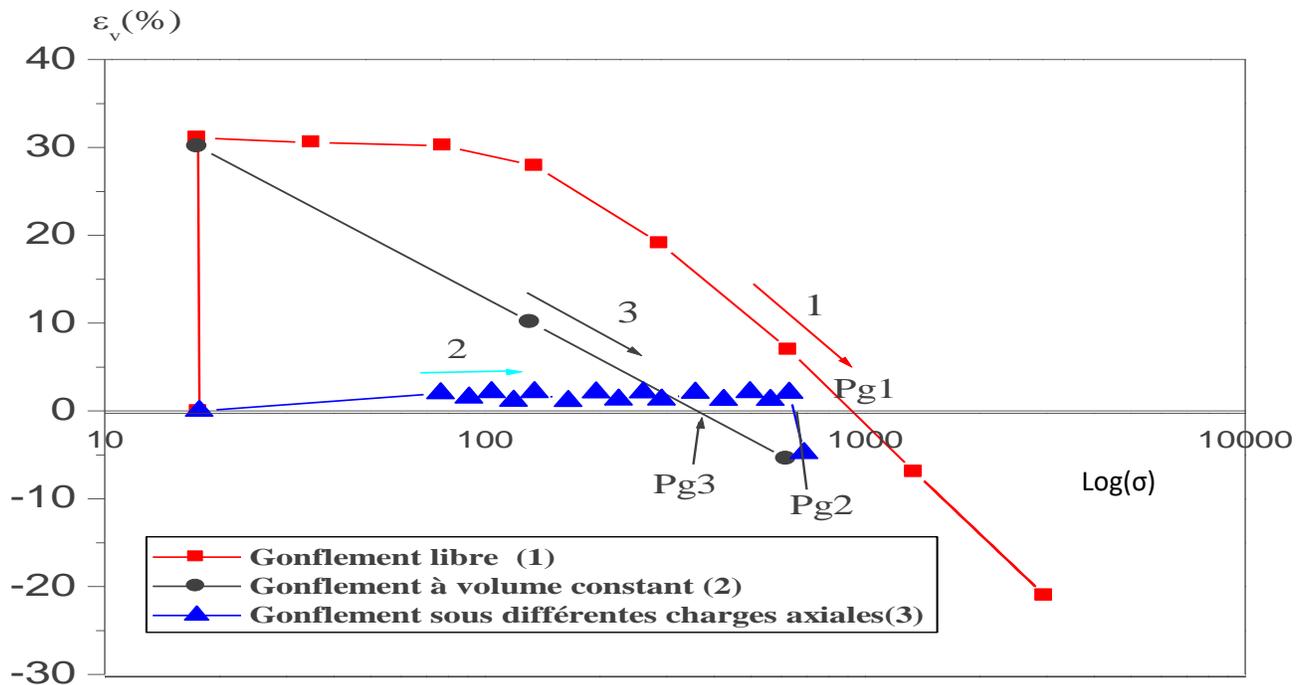


Fig.II- 1.—Différentes procédures d'essais de gonflement (Sridharan et al. 1986)[72].

2.c)- commentaire :

Armi les diverses méthodes d'essai du gonflement rapportées dans la littérature, la méthode la plus représentative est celle qui simule le plus adéquatement possible les conditions sur le site.

Dans notre étude, on a utilisé la première méthode pour mesurer la pression de gonflement :

1er méthode : méthode d'inondation de l'échantillon à volume constant, les incréments de chargement doivent se faire avec beaucoup de précautions pour maintenir le volume constant sans aucun risque de compression, toute fois les petites variations sont inévitables.

II.3 Essais d'identification :

II.3.1 Essais granulométrique :

3.a)- Le but d'essai :

Le but est déterminé en poids la distribution des particules des sols suivant leurs dimensions (diamètres).

L'analyse granulométrique s'obtient par deux opérations successives :

- + Le tamisage pour les particules des dimensions supérieures ou égales à 0,08mm.
- + La sédimentométrie pour les particules des dimensions inférieures à 0,08mm.

Remarque :

Le tamisage peut être effectué soit à sec, soit sous l'eau.

- + Tamisage à sec :

Le matériau est versé le plus souvent en plusieurs fois pour ne pas surcharger les tamis supérieurs le tamisage à sec est recommandé pour les sols sableux ou renfermant surtout des cailloux et des graviers.

- + Tamisage sous l'eau :

Ce mode de tamisage est indisponible lorsque le sol comprend des éléments argileux ou limoneux.

3.b)- Appareillage :

- + Balance
- + Les tamis
- + Agitateur mécanique
- + Eau distillée ou déminéralisée.
- + Eprouvette
- + Densimètre
- + Thermomètre
- + Chronomètre
- + Thermomètre de la salle d'essai.

3.c)- Photo d'appareillages utilisés :



Fig.II- 3.—Appareil d'analyse granulométrique.



Fig.II- 2.—Eprouvette.



Fig.II- 4.—Densimètre

3.d)- Mode opératoire :

- ✚ Tamis de 80 μm de l'échantillon de sol préparé selon la norme NF P 94-056, avec son eau de lavage dans un bac.
- ✚ On prélève une prise d'essai de 80 g.
- ✚ Introduire la prise dans le récipient utilisé avec l'agitateur mécanique, ajouter 500cm³ de la solution d'hexamétaphosphate de sodium (NaPO₃)₆, et laisser le mélange pendant au moins 15h.
- ✚ La prise d'essai est dispersée dans la solution d'eau et de défloculant au moyen de l'agitateur mécanique qui doit fonctionner pendant 3 min.
- ✚ On mise de partie de l'échantillon dans l'éprouvette, et compléter la partie vide de l'éprouvette par de l'eau distillée jusqu'à 2000 cm³, et mélanger le tout par agitateur manuel et déclencher au même moment le chronomètre (il s'agit le début de l'essai).
- ✚ Plonger le densimètre avec précaution dans la suspension immédiatement après le déclenchement du chronomètre.
- ✚ Faire la lecture depuis de début de l'essai ansai longtemps qui nécessaire aux temps suivant :

(0.5,1,2,5,10,20,40,80,240,1440)min, et noter à chaque lecture la densité de la solution et la température de l'eau se trouvant dans l'éprouvette .

- ✚ Procéder aux trois premières lectures à 0.5, 1 et 2 min, sans retirer le densimètre de la solution, à partir de la troisième lecture retirer le densimètre de la solution après chaque mesure.

II.3.2 Limites d'Atterberg :

Les argiles forment des pâtes dans lesquelles chaque grain est relié aux grains voisins par des forces de cohésion dues à la présence des couches d'eaux adsorbées. La consistance qui en résulte dépend en grande partie de la teneur en eau du matériau.

On distingue alors trois états de la consistance des argiles : états liquide, plastique et solide.

A l'état liquide, les grains sont indépendants les uns des autres, le mouvement relatif entre les particules est aisé.

A l'état plastique, les grains sont plus rapprochés et ont mis en commun leurs couches d'eau adsorbées. Lorsqu'il y a mouvement, les grains restent attachés les uns aux autres sans s'éloigner.

A l'état solide, les distances inter-granulaires sont encore plus petites. Les grains arrivent même au contact en quelques points chassant ainsi l'eau adsorbée.

Les frottements internes sont alors importants. La transition d'un état à l'autre est très progressive. Néanmoins, on utilise de façon pratique les limites d'Atterberg.

Limite de liquidité W_L :

Elle sépare l'état liquide de l'état plastique.

Limite de plasticité W_P :

Elle sépare l'état plastique de l'état solide.

Indice de plasticité I_P :

Il mesure l'étendu du domaine de plasticité du sol. Il s'exprime par :

$$I_P = W_L - W_P$$

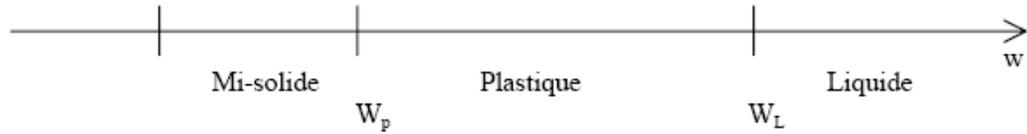


Fig.II- 5.—Etat de teneur en eau.

1.a)- Appareillage :

- + Boit de casagrandé.
- + Coupelle.
- + Qutil à rainurer.
- + Les tares

1.b)- Photo d'appareillages utilisés :



Fig.II- 6.—Boit de casagrandé.



Fig.II- 7.—Coupelle avec QutilàRainurer.



Fig.II- 8.—plaque de vitrail..

1.c)- Préparation de l'échantillon :

- ✚ Tamiser 200g de sol (argile) au tamis de 400 μ m.
- ✚ Malaxée afin d'obtenir une pate homogène et presque fluide.
- ✚ Garder l'échantillon dans un sachée de plastique à durée de 12h.

1.d)- Réalisation de l'essai :**1. d.1)- Détermination de la limite de liquidité :****Mode opératoire :**

- ✚ L'argile bien homogénéise à la spatule est place dans la coupelle d'une façon que la couche d'argile ait une épaisseur de 15 à 20 mm au centre.
- ✚ Réglage de la coupelle de Casagrandé à hauteur de 10mm.
- ✚ Partager la pate en deux.
- ✚ Actionner la came de façon à soumettre la coupelle à une série de chocs à cadence de 2 coups par seconde.
- ✚ Noter le nombre N de chocs nécessaires.
- ✚ L'essai n'est poursuivi que lorsque N est compris entre 15 et 35.
- ✚ Prélever dans la coupelle, à l'aide d'une spatule, environ 5g de pate des chaque coté des lèvres de la rainure et au voisinage de l'endroit ou elles se sont refermées, afin d'en déterminer la teneur en eau.
- ✚ L'opération complète est effectuée au moins quatre fois sur la même pate.

1. d.2)- Détermination de la limite de plasticité :**Mode opératoire :**

- ✚ On utilise une boulette du sol (argile).
- ✚ On la malaxe et on l'étale sur une plaque de marbre (où d'un matériau non absorbant, ni réactif).
- ✚ Avec la paume de la main on forme un rouleau tel que le diamètre du sol soit de 3 mm et sa longueur de 10 à 15 cm.
- ✚ La limite de plasticité W_p est obtenue lorsque le rouleau se fissure et que son diamètre atteint 3 mm.

- ✚ une fois les fissures apparues, on prend une partie du rouleau et la placer dans un tare de masse connue et on prend le poids humide totale (tare + partie du rouleau), après on pose les toute dans l'étuve.
- ✚ La limite de plasticité W_p représente la teneur en eau.

II.3.3 Essais de bleu de méthylène :

4.a)- Le but d'essai :

L'essai consiste à mesurer par dosage la quantité de bleu de méthylène pouvant être adsorbée par le matériau mis en suspension dans l'eau. Cette quantité est rapportée par proportionnalité directe à la fraction 0/50 mm du sol. La valeur de bleu du sol est directement liée à la surface spécifique des particules constituant le sol ou le matériau rocheux.

Le dosage s'effectue en ajoutant successivement différentes quantités de bleu de méthylène et en contrôlant l'adsorption après chaque ajout. Pour ce faire, on prélève une goutte de la suspension que l'on dépose sur un papier filtre (voir article 7), ce qui provoque la création d'une tache. L'adsorption maximale est atteinte lorsqu'une auréole bleu clair persistante apparaît à la périphérie de la tache.

4.b)- Appareillage et matériel d'essai :

b.1)- Appareillage spécifique :

L'appareillage spécifique comporte :

- ✚ un dispositif de dosage permettant d'injecter par pas de 10 cm³, 5 cm³ et 2 cm³ des volumes de solution de bleu et de connaître la quantité totale injectée à 1 cm³.
- ✚ un agitateur mécanique à ailettes ayant une vitesse de rotation couvrant au moins la plage de 400 tr/min à 700 tr/min. Le diamètre des ailettes est compris entre 70 mm et 80 mm. La forme et les dimensions des ailettes doivent permettre une mise en mouvement de la totalité des particules du sol.
- ✚ un récipient cylindrique (en verre, plastique, métal inoxydable) d'une capacité minimale de 3000 cm³ et de diamètre intérieur (155 -10) mm.
- ✚ une baguette de verre de (8 -1) mm de diamètre.
- ✚ des tamis de maille 80 µm, 5 mm et 50 mm.
- ✚ du papier filtre blanc de masse surfacique (95-5) g/m², d'épaisseur (0,2 - 0,02) mm, de vitesse de filtration (75 -10) s pour 100 ml (selon la méthode ASTM) et de diamètre de rétention (8 -5) µm.

4.c)- Appareillage courant :**L'appareillage courant comporte :**

- ✚ balances dont les portées sont compatibles avec les masses à peser et permettent de faire les pesées avec une incertitude relative de 0,2 % de la valeur mesurée.
- ✚ thermomètre gradué en degrés (de 0 °C à 100 °C).
- ✚ chronomètre ou équivalent indiquant la seconde.
- ✚ enceinte thermique réglable à 90 °C.
- ✚ appareil de séchage permettant de déterminer la teneur en eau des sols selon une méthode normalisée.
- ✚ sacs ou récipients hermétiques permettant de conserver la teneur en eau des échantillons.

4.d)- Produits :**Les produits à utiliser sont les suivants :**

- ✚ solution de bleu de méthylène à (10-0,1) g/l fabriquée depuis moins de un mois et conservée dans un flacon bouché à l'abri de la lumière (le mode de préparation est décrit en annexe A du présent document).
- ✚ eau déminéralisée ou distillée.

4.e)- Mode opératoire

La prise d'essai étant mise en suspension comme décrit précédemment, procéder au dosage de bleu de méthylène comme indiqué ci-après.

Pendant toute la durée du dosage, l'agitation permanente (vitesse 400 tr/min - 100 tr/min) doit être telle que toutes les particules de sol en suspension soient mises en mouvement.

À l'aide du dispositif de dosage, introduire dans la suspension 5 cm³ à 10 cm³ de solution de bleu selon l'argilosité estimée du matériau (10 cm³ pour les matériaux les plus argileux) ; au bout de 1 min - 10 s, procéder à l'essai de la tache sur papier filtre de la manière suivante :

Poser le papier filtre sur un support adapté non absorbant.

Prélever à l'aide de la baguette de verre une goutte de suspension et la déposer sur le papier filtre. La tache ainsi formée se compose d'un dépôt central de matériau coloré bleu sombre entouré d'une zone humide incolore.

la goutte prélevée doit former un dépôt central compris entre 8 mm et 12 mm de diamètre.

Procéder à des injections successives par pas de 5 cm³ à 10 cm³ (selon l'argilosité du matériau) de solution de bleu jusqu'à ce qu'apparaisse une auréole périphérique bleu clair, de largeur millimétrique, dans la zone humide de la tache. L'essai est dit alors positif. À partir de ce moment, laisser se poursuivre l'adsorption du bleu dans la solution et effectuer des taches, de minute en minute, sans ajout de solution.

Si l'essai redevient négatif à la cinquième tache ou avant, procéder à de nouvelles injections de bleu avec des pas de 2 cm³ à 5 cm³, selon l'argilosité du matériau, en lieu et place des pas de 5 cm³ à 10 cm³ introduits précédemment.

En effet, il est nécessaire de réduire les quantités injectées, car à ce stade de l'essai la suspension est en voie de saturation.

Chaque addition est suivie des taches effectuées de minute en minute. Ces opérations sont renouvelées jusqu'à ce que l'essai reste positif pour cinq taches consécutives. Le dosage est alors terminé et l'on détermine le volume total (V) de la solution de bleu qui a été nécessaire pour atteindre l'adsorption totale.

Dans tous les cas, le volume V doit être supérieur à 10 cm³. Si le volume V est inférieur à 10 cm³, l'essai doit être recommencé avec une prise d'essai de masse supérieure.

Le récipient et les accessoires en contact avec la suspension de sol et de bleu sont lavés et abondamment rincés à l'eau claire.

Si en vidant le récipient sur le tamis de 80 μ m, on observe des agglomérats de particules non colorés on recommencera l'essai avec la troisième prise d'essai en augmentant la durée de mise en suspension du sol ou en adoptant toute disposition permettant de minimiser la formation de ces agglomérats (exemple : séchage à 50 °C maximum, émiettement manuel, puis imbibition de durée suffisante pour favoriser le délitage des éléments argileux).

4.f)- Calculs et expression des résultats :

Les calculs à exécuter sont :

Teneur en eau de l'échantillon soumis à l'essai (0/5 mm) :

$$W = \frac{m_{h2} - m_{s2}}{m_{s2}}$$

Masse sèche de la prise d'essai :

$$m_h = \frac{m_{h1}}{1 + w}$$

Masse de bleu introduite (solution à 10 g/l) ;

$$B = V \times 0,01$$

Pour les matériaux dont le Dmax est inférieur à 5 mm, l'expression du résultat est :

$$VBS = \frac{B}{m_0} \times 100$$

VBS est exprimée en grammes de bleu pour 100 g de matériau sec.

Pour les matériaux dont le Dmax est supérieur à 5 mm, l'expression du résultat est :

$$VBS = \frac{B}{m_0} \times C \times 100$$

VBS est exprimée en grammes de bleu pour 100 g de matériau sec.

C étant la proportion de la fraction 0/5 mm dans la fraction 0/50 mm du matériau sec.

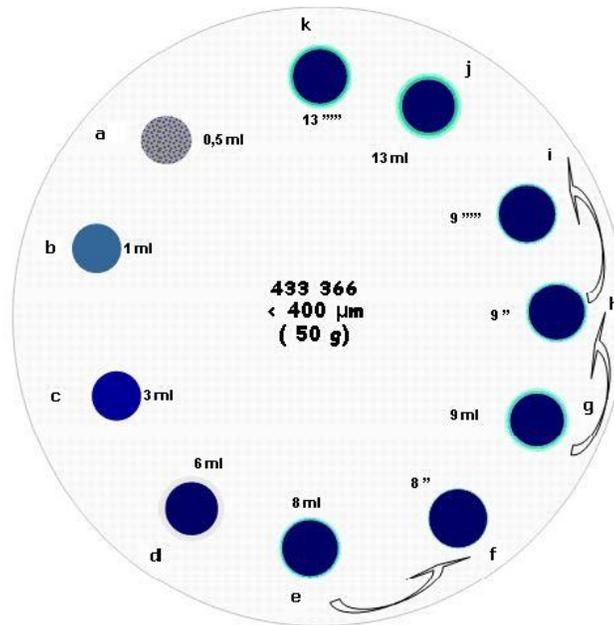


Fig.II- 9.—Principe de dosage.

II.3.4 Essais de Proctor :

2.a)- Le but d'essai :

Déterminer les caractéristiques de compactage d'un sol qui sont la teneur en eau optimale (wop %), et masse volumique sèche maximale γ_d .

Les caractéristiques de compactage Proctor d'un sol sont déterminées à partir deux essais :

- + Essai de Proctor normale (standard).
- + Essai de Proctor modifié.

2. b) -Appareillage:

- + Tamis de diamètre de 5 mm.
- + Balance
- + Moule Proctor normale.
- + Dame
- + Une règle en acier.
- + Etuve
- + Les tares
- + Photo de Moule Proctor avec la dame:



Fig.II- 10.—Moule Proctor normal.



Fig.II- 11.—Dame Proctor.

Tab.II- 5.—Modalités d'exécution des essais Proctor normal et modifié.

Nature de l'essai	Caractéristiques de l'essai	Moule Proctor	Moule CBR

Essai Proctor Normal	Masse de la dame	2490g	2490g
	Diamètre du mouton	51mm	51mm
	Hauteur de chute	305mm	305mm
	Nombre des couches	3	3
	Nombre de coupe par couche	25	55
	Masse approximative d'une couche	650g	1700g
Essai Proctor Modifié	Masse de la dame	4535g	2490g
	Diamètre du mouton	51mm	51mm
	Hauteur de chute	457mm	457mm
	Nombre des couches	5	3
	Nombre de coupe par couche	25	55
	Masse approximative d'une couche	400g	1050g

2.c)- Préparation d'échantillon :

La quantité des échantillons à prélever pour exécuter l'essai varie entre 15 Kg et 100Kg. Il s'agit de quantité minimale nécessaire à la détermination de la courbe Proctor en cinq points car il n'est pas autorisé de réutiliser le même matériau pour la détermination de plusieurs points de la courbe Proctor.

2.d)- Mode opératoire :

- ✚ Essais de Proctor normal pour élément $< 5 \text{ mm}$.
- ✚ Le sol est désagrégé et malaxé avec une teneur en eau précise.
- ✚ Puis placé dans le moule en 3 couches, et recevant chacune 25 chocs donnés par une dame.
- ✚ Après compactage de la dernière couche, retirer la rehausse, le matériau doit alors dépasser de moule d'une hauteur de 1cm au maximum. Cet excédent est arasé soigneusement au niveau de mole avec la règle.

On déterminé :

- ✚ le poids de sol contenu dans le moule par pesées.

- ✚ La teneur en eau du sol (séchage à l'étuve).

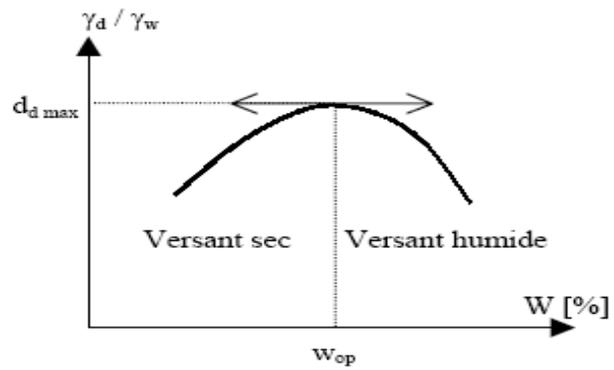


Fig.II- 12.—Courbe de compactage.

CHAPITRE III.
CARACTERISTIQUES
DES MATERIAUX ETUDIES

III.1 Introduction :

Quelques soient les objectifs recherchés dans une étude géotechnique, il est de règle d'effectuer initialement l'identification des sols concernés. Cette procédure permet d'orienter les analyses géotechniques ultérieures, et surtout d'effectuer une classification des minéraux rencontrés. Les paramètres de cette classification sont aussi bien de nature physico-chimique que granulométrique.

III.2 Caractérisation des matériaux :

Le programme expérimental consiste à effectuer une série d'essais pour déterminer un bon nombre de paramètres et d'indices permettant l'identification des matériaux et la prédiction du comportement des sols gonflants.

Concernant l'identification de l'argile EL MENIA, l'étude expérimentale comprend les analyses et les essais suivants :

- ✚ Analyses chimiques.
- ✚ Analyses granulométriques.
- ✚ Détermination des densités apparentes.
- ✚ Les limites d'Atterberg.
- ✚ Essais de Proctor.
- ✚ Essai au bleu de méthylène.

Les essais portés sur les échantillons de l'argile de EL MENIA a permettent non seulement leurs identifications de point de vue caractérisation des matériaux, mais permettent aussi de quantifier le phénomène de gonflement, c'est-à-dire, à partir des résultats d'identification, on peut prédire le potentiel de gonflement du sol, pour permettre d'anticiper sur les compagnes de reconnaissances de confirmation.

III.2.1 Argile:

III. 2.1.1 Origine de l'argile utilisée : Cette étude été réalisée sur un sol de la région de EL MENIA (TAGHIT) à proximité de l'école primaire ELAIBE OMAR, environ 3 km au Est de la ville ; prélève à une profondeur environ de 2 m par rapport au T.N en utilisant la pelle mécanique.

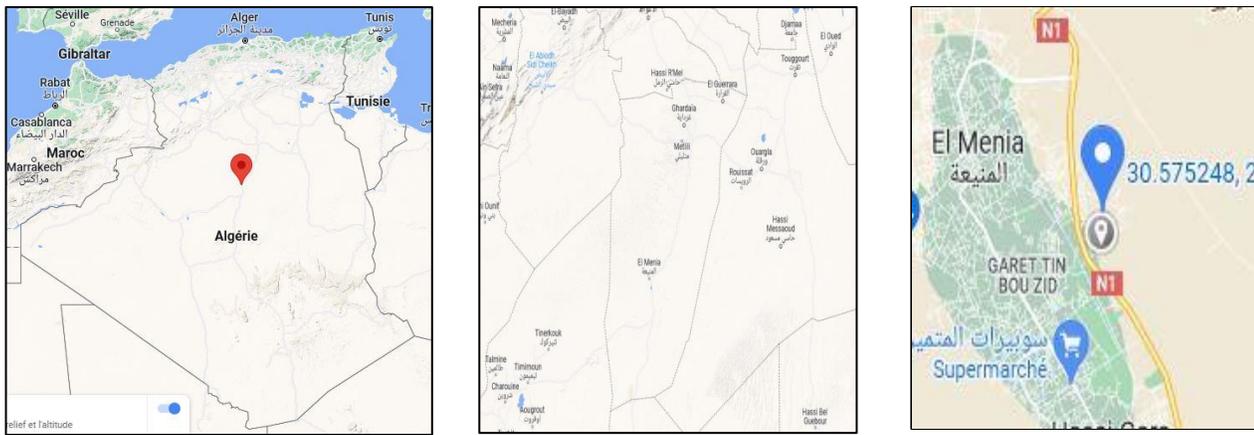


Fig. III-1.—Localisation De L’argile EL MENIA.

III. 2.1.2 Essais de caractérisations :

2.1.2.A)- Analyse chimique :

Les essais d’analyse chimique sommaire ont été réalisés au niveau de laboratoire géotechnique L.T.P Sud à Ghardaïa. Les résultats sont récapitulés sur le (tab III-1).

ÉCHANTILLON	INSOLUBLES NFP 15-461	SULFATES BS 1377	CARBONATES NFP 15-461
symboles	% Insolubles	% SO ₃ ²⁻	% CaCO ₃
argile	78.5	-	17

Tab. III- 1.—Analyse chimique d’argile - EL MENIA.

- commentaire :

D’après les résultats obtenus, on note que l’argile EL MENIA contient un pourcentage de 78,5% de substances insolubles et Le taux de carbonate de calcium CaCO₃ est de 17%, ce qui fait que l’argile à étudier est en réalité argileuse.

Ce qui nous permet de dire que l’échantillon est argileux.

2.1.2.B)- Analyse granulométrique :

L’essai a pour but de déterminer en poids, la distribution des particules des sols suivant leurs dimensions.

L'analyse granulométrique s'obtient par deux opérations successives et complémentaires :

- ✚ Le tamisage sous l'eau (par voir humide) pour les particules de dimensions $\geq 80\mu\text{m}$ (0.08mm), l'essai est effectué selon la norme XP P94-041.
- ✚ La sedimentometrie pour les particules de dimensions $< 80\mu\text{m}$ qui complète la première,
- ✚ Elle est effectuée selon la norme (NF P94-057). Le principe de cet essai est fondé sur la loi de Stokes ou la vitesse de sédimentation des particules en suspension dans un milieu dépend de leurs diamètres.

Les renseignements à tirés de cette analyse pour un sol gonflant sont :

- ✚ Le pourcentage des particules fines ($C1 < 1 \mu\text{m}$).
- ✚ Le pourcentage des particules fines ($C2 < 2 \mu\text{m}$).
- ✚ Le pourcentage des éléments fins ($\Phi < 80 \mu\text{m}$).

La distribution des particules d'argile de EL MENIA est traduite par la courbe appelée « courbe granulométrique » (fig. III-2.)

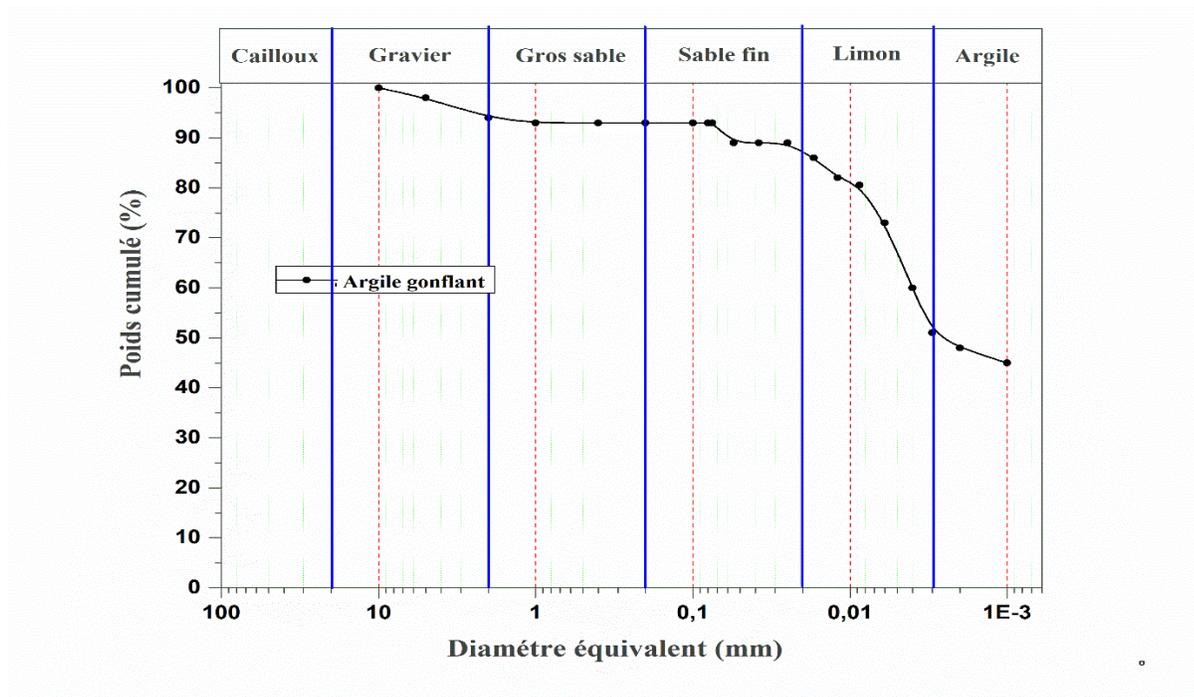


Fig. III- 2.— Courbe granulométrique d'argile de MENIA.

A partir de courbe granulométrique de la fig.III-2., Le tab.III-2. Résume les résultats qui sont des paramètres pour la classification de sol gonflant.

Tab. III- 2.—Résultats de l'analyse granulométrique d'argile d'EL MENIA.

$\Phi \leq 80\mu\text{m}$	$\Phi \leq 2\mu\text{m}$	$\Phi \leq 1\mu\text{m}$
93%	48 %	45%

- **commentaire :**

D'après les résultats, de courbe granulométrique de la fig.III.2.

On remarque que le pourcentage des éléments fins ($<80\mu\text{m}$) présente plus de 93%, on constate aussi que le taux des particules inférieures à ($\Phi \leq 2\mu\text{m}$) est de l'ordre de 48%, ce que nous indique que l'argile de EL MENIA est une argile fines.

2.1.2.C)- Détermination des densités apparentes :

Calcul de la teneur en eau (Norme NF P94-050 Septembre 1995). C'est la quantité d'eau qui contient un sol humide on calcule la teneur en eau de la façon suivante :

$$W = (w_h - w_s) / w_s$$

w_h : Poids du sol humide en gramme.

w_s : Poids du sol sec en gramme.

2.1.2.D)- Détermination de la densité humide, spécifique et sèche d'un sol:

(Norme NFP94-064 Nov 1993). L'essai consiste à déterminer les masses volumiques d'un même sol, on prenant un échantillon de sol qui doit avoir une forme simple afin de pouvoir être paraffiné facilement.

L'échantillon doit immédiatement pesé (M_h) et est paraffiné aussi tôt après une fois revenue à température de la salle d'essai, il est pesé (M_p) à l'air libre puis est placé dans le panier suspendu à l'étrier de la balance hydrostatique et est immergée dans l'eau afin d'être pesé (M_p').

$$\gamma_h = M_h / V \text{ Avec:}$$

M_h : la masse humide d'un sol en gramme.

V : le volume de l'échantillon de sol à l'état humide.

$$V = (M_p - M_p') / \gamma_w - (M_p - M_h) / \gamma_p.$$

$\gamma_w = 1 \text{ g/cm}^3$ la masse volumique de l'eau.

γ_p : la masse volumique de la paraffine.

$\gamma_d = \gamma_h / (1 + w)$.

Tab. III- 3.—Les densités apparentes des sols.

Paramètres	W (%)	γ_h (g/cm ³)	γ_d (g/cm ³)	γ_s (g/cm ³)
Echantillon	10,67	1,76	1,59	2,7

2.1.2. E) -Limites d'Atterberg:

Par définition, les limites d'Atterberg sont des teneurs en eau pondérales caractéristiques du sol, elles correspondent à des comportements particuliers.

Ces limites déterminées sur la fraction du sol passant à travers des tamis de 400 μm .

Les résultats sur les limites de consistance de l'argile d'ELMENIA sont regroupés dans le tableau III.

Tab. III- 4.—Paramètres physiques des argiles étudiées.

WL (%)	WP (%)	IP (%)
69.65	38.32	31.33

Pour déterminer les états des argiles, portant les résultats obtenus sur le diagramme de Casagrande (fig.III-3.) en fonction de la limite de liquidité et l'indice de plasticité (tab.III-4.).

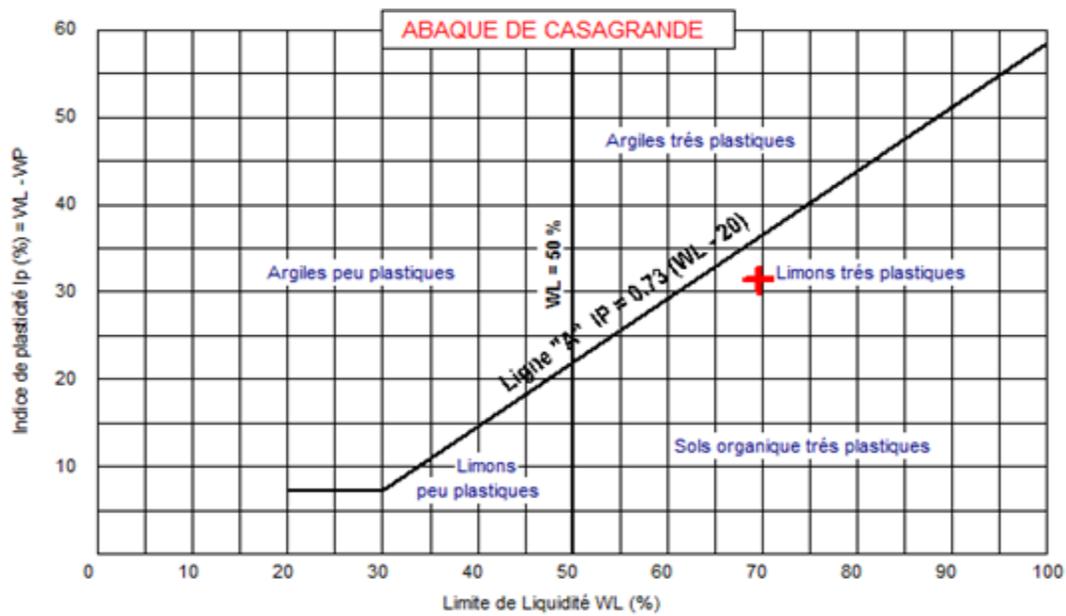


Fig. III- 3.—Classification des sols fins sur le diagramme de Casagrande (Philipponnat et Hubert.1997).

Tab. III- 5.—Présentation des résultats portés sur le diagramme de Casagrande.

	Etat de l'argile
Argile d'EL MENIA	Limon très plastiques

2.1.2.E.1)- Activité de l'argile :

Les résultats d'activité de l'argile d'EL MENIA t sont regroupés dans le tab.III-6.

Tab. III- 6.—Activité de l'argile d'EL MENIA.

A1 (Skempton)	A2(Seed)
0.65	0.73

Argile inactives: les argiles qui ont une activité inférieure à 0.75 ; Ces argiles sont à base de Kaolinite, ou des argiles contenant peu de minéraux argileux.

L'argile de MENIA est une argile inactive à base de kaolinite.

- Commentaires :

D'après les résultats obtenus, à partir des limites de consistances, et la classification des argiles selon ces paramètres, on remarque :

L'argile d'EL MENIA appartient à la catégorie limons très plastiques, Kaolinite est les minéraux prédominants.

2.1.2.D)- Essai de Proctor :

Cet essai normalisé (NF P 94-093), permet de reproduire au laboratoire plus ou moins les conditions de compactage sur chantier. Il est effectué généralement selon deux modes de compactages d'intensités différentes : par l'essai Proctor modifié à énergie plus intense et par l'essai Proctor standard (à énergie moyennement poussée), ce dernier a été choisi pour mener cette investigation.

Si l'on fait varier la teneur en eau de l'échantillon et que l'on représente graphiquement la variation de γ_d en fonction de $w\%$, on obtient une courbe en cloche qui représente un point haut qu'on l'appelle « optimum Proctor ».

La figur III.4 représente la courbe Proctor de l'argile d'EL MENIA utilisée.

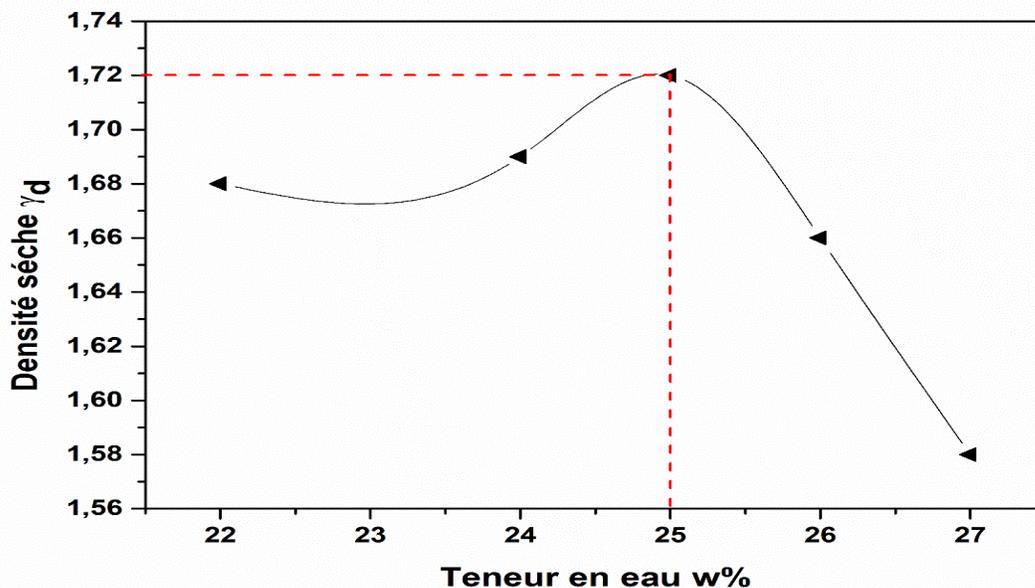


Fig. III- 4.—Essai de Proctor pour l'argile d'EL MENIA.

A partir de cette courbe, on peut ressortir les paramètres fondamentaux de cet essai (paramètres de Proctor), qui sont la teneur en eau optimale et la densité sèche maximale.

Les résultats sont regroupés dans le tab.III-7.

Tab. III- 7.—Résultats de l'essai de Proctor.

	γ_d	W% opt.
Argiled'EL MENIA	1.72	25

-Commentaire:

D'après les résultats obtenus, il est facilement remarqué que le sol présente une forte sensibilité à l'eau autour de l'optimum Proctor. C'est une caractéristique des sols argileux.

2.1.2.F)- Essai au bleu de méthylène:

L'essai est réalisé conformément à la norme NF P 94-068, il nous permet de mesurer indirectement la surface spécifique des grains solides par absorption d'une solution de bleu de méthylène jusqu'à saturation. En d'autre terme, il exprime la quantité de bleu de méthylène pouvant être absorbé par les surfaces des particules de sols.

L'essai consiste à mesurer la quantité de bleu de méthylène pouvant être absorbée par un matériau mis en suspension dans l'eau. Il a pour but de quantifier la fraction argileuse contenue dans le matériau qui possède cette propriété d'absorber le bleu de méthylène. La valeur du bleu VB est la quantité du bleu de méthylène adsorbée par le poids sec de la prise.

$$Vb (0/d) = \frac{\text{Quantité du bleu absorbé (cm}^3\text{)}}{\text{Poids sec de la prise (g)}}$$

Connaissant la valeur du bleu de la fraction fine 0/d, on peut calculer celle de la fraction globale 0/D à partir de la courbe granulométrique du sol.

$$VB (0 /D) = \frac{VB (0/d) .Cd}{100}$$

Où : Cd est la proportion de la classe granulaire 0/d dans la fraction total 0/D.

L'essai se fait sur la fraction 0/0,4, la valeur du bleu VB et la granulométrie des fines permettent de déterminer le coefficient d'activité CA.

$$CA = \frac{VB(0/D)}{\% 2 \mu m} .$$

Les ordres de grandeurs des valeurs du bleu des sols d'après Philipponnat (1997) sont représentés dans le tableau II.8

Tab. III- 8.—Quelques valeurs indicatrices du VBS (Classifications des sols d'après Philipponnat(1997)).

La valeur de bleu (VBS)	Type de sol
VBS < 0,2	sols sableux (sol insensible à l'eau)
0,2 < VBS < 2,5	sols limoneux (sol peu plastique et sensible à l'eau)
2,5 < VBS < 6	sols limono-argileux, (sol de plasticité moyenne)
6 < VBS < 8	sols argileux
VBS > 8	sols trèsargileux

Si nous adoptons la classification de Colombier (1988) retenue pour Argile d'EL MENIA, nous trouvons qu'échantillonsonttrès pollués.

VB < 0,2 matériau propre ;

0,2 < VB < 0,5 matériau propre ;

0,5 < VB < 1 matériau pollué ;

VB > 1 matériau très pollué ;



Fig. III- 5.—Essai au bleu de méthylène.

Tab. III- 9.—la valeur de bleu VB

Echantillon	Argiled'EL MENIA
Valeur de bleu méthylène VB (0/d) (cm ³ /g)	7.07

-Commentaire:

D'après ces résultats, Argile d'EL MENIA est classé comme un matériau sols argileux échantillon sont très pollués (VB> 1) elle est, VB pour les l'échantillon est beaucoup plus grand donc on dit que un matériau sols argileux. (Colombier, 1988)

III.2.2Sablecalcaire :

III 2.2.1- Définition :

Le sable concassé, connu aussi sous l'appellation de sable de carrière, est obtenu à partir de la récupération de la fraction granulométrique [0-3mm] résultant du concassage des calcaires, granodiorite, andésite, granite, dolomie et basalte.

La production de sable concassé pour l'année 2009 a atteint 13 millions m³ (Direction générale desmines, 2009). Son utilisation en Algérie en tant que sable pour la construction a permis de compenser le déficit constaté en sable naturel pour construction.

Le secteur privé dispose de 504 exploitations minières en activité représentant 79,3% du total des exploitations produisant de sable calcaire, contre 128 unités appartenant au secteur public correspondant à un taux de 20,7%. Le secteur privé totalise une production de 8,8 millions m³ de sable concassé représentant 66,2% de la production totale, contre 4,5 millions m³ réalisés par le secteur public soit 33,8%.

III 2.2.2- Origine de Sable calcaireutilisée :

Enterprise ALCO GAZ, spécialisées dans les travaux de routes et la production des agrégats.Elle est située dans la zone d'activité de METLILI à côte du cw 106.

2.2.2.A)- Localisation de Sable concassé utilisé :



Fig. III- 6.—Localisation de sable calcaire.

III 2.2.3- Essais de caractérisations :

2.2.3. A - Analyse chimique :

Tab. III- 10.—Analyses chimiques de sable calcaire.

ÉCHANTILLON	INSOLUBLES NFP 15-461	SULFATES BS 1377	CARBONATES NFP 15-461
symboles	% Insolubles	% SO32-	% CaCO3
argile	2.7	0.20	88

Les essais d'analyse chimique sommaire ont été réalisés au laboratoire de travaux public de sud (LTPS) de Ghardaïa. Les résultats sont récapitulés sur le tab.III-10 Cette analyse montre que le sable calcaire, il est classé comme fortement calcaire avec un taux de 88%. Selon le CTPP.

2.2.3. B - Analyse granulométrique :

L'essai a pour but de déterminer en poids, la distribution des particules des sols suivant leurs dimensions.

L'analyse granulométrique s'obtient par deux opérations successives et complémentaires :

Les renseignements à tirés de cette analyse pour un sol gonflant sont :

- ✚ Le pourcentage des particules fines ($C1 < 1 \mu m$).
- ✚ Le pourcentage des particules fines ($C2 < 2 \mu m$).
- ✚ Le pourcentage des éléments fins ($\Phi < 80 \mu m$).

La distribution des particulesdesablecalcaireest traduite par la courbe appelée « courbe granulométrique » (fig.III-7).

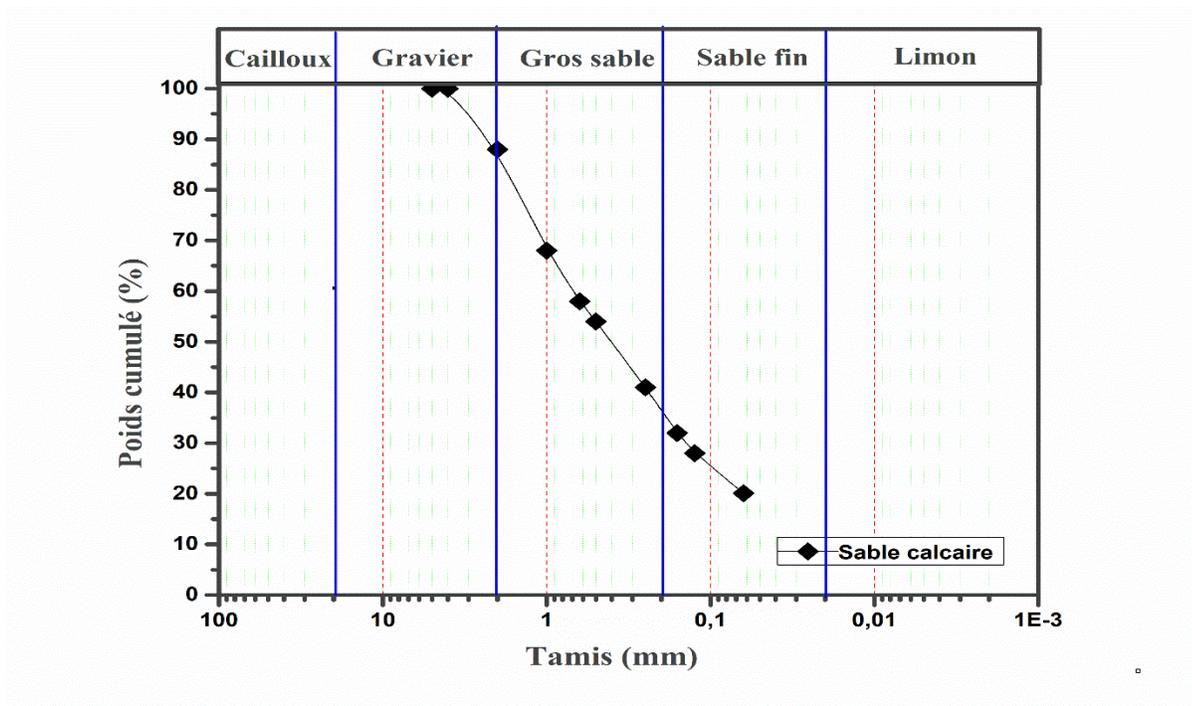


Fig. III- 7.— Courbe granulométrique de sable calcaire.

A partir de courbe granulométrique de la fig.III-7, Le tableau III.9 résume les résultats qui sont des paramètres pour la classification de sol gonflant.

Tab. III- 11.—Résultats de l'analyse granulométrique de sable calcaire.

$\Phi \leq 80\mu\text{m}$	$\Phi \leq 2\mu\text{m}$	$\Phi \leq 1\mu\text{m}$
24.5%	0 %	0%

-Commentaire:

D'après les résultats, de courbe granulométrique de la fig.III-7.

- ✚ On remarque que le pourcentage des fines (passant à 80 μm) est de l'ordre de 24.5%.
- ✚ Etle pourcentage des fines (passant à 2 et 1 μm) est de l'ordre de 0%.
- ✚ Ce qui nous permet de dire que c'est des sols sableux.

2.2.3. C - Limites d'Atterberg :

Les éléments inférieurs à 400 μm contenus dans un sol sont caractérisés, au moyen des limites D'Atterberg et de l'indice de plasticité, selon la norme AFNOR NF P 94-051 (1993a).

Tab. III- 12.—Les limites de consistance.

WL (%)	WP (%)	IP (%)
17.50	Non mesurable	Non mesurable

Pour déterminer les états des argiles, portant les résultats obtenus sur le diagramme de Casagrande (fig.III-8.) en fonction de la limite de liquidité et l'indice de plasticité (tableau

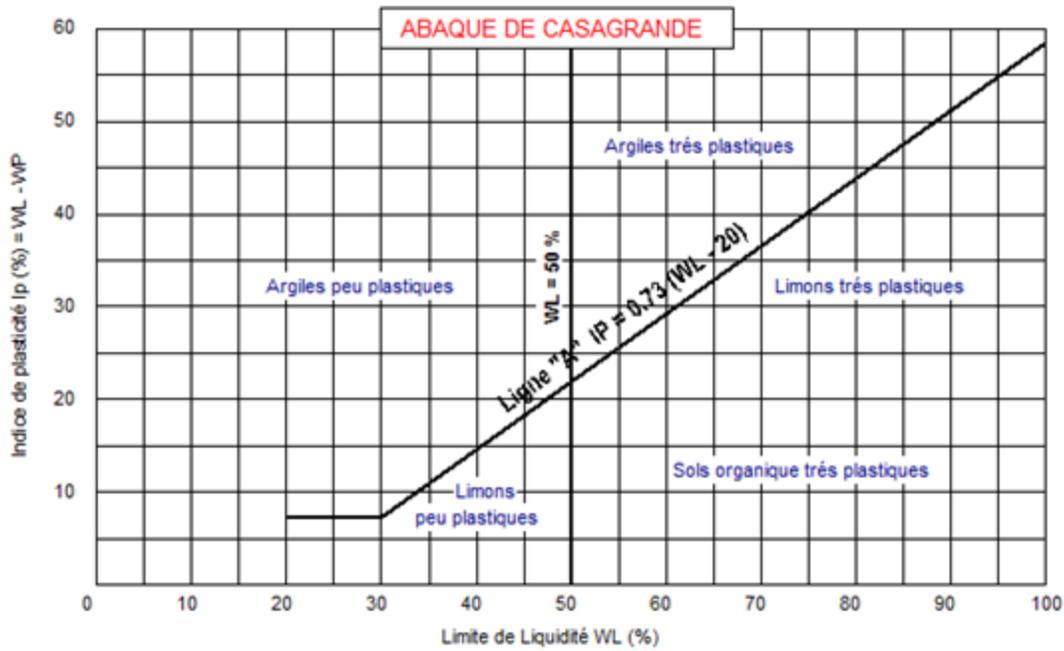


Fig. III- 8.—Classification des sols fins sur le diagramme de Casagrande (Philipponnat et Hubert.1997)

Tab. III- 13.—Classification des sols en fonction de l’indice de plasticité.

Indice de plasticité	Caractéristique (SETRA-LCPC 1992)
$Ip \leq 12$	Faiblement argileux
$12 < Ip \leq 25$	Moyennement argileux
$25 < Ip \leq 40$	Argileux
$Ip > 40$	Très argileux

- Commentaires :

D’après les résultats obtenus, à partir des limites de consistances, et la classification des argiles selon ces paramètres (l’indice de plasticité), on remarque :

le sable calcaire est classé comme des matériaux faiblement argileux.

2.2.3. D - Essai de Proctor :

Cet essai normalisé (NF P 94-093), permet de reproduire au laboratoire plus ou moins les conditions de compactage sur chantier.

La figure III. Représente la courbe Proctor de sable calcaire utilisée.

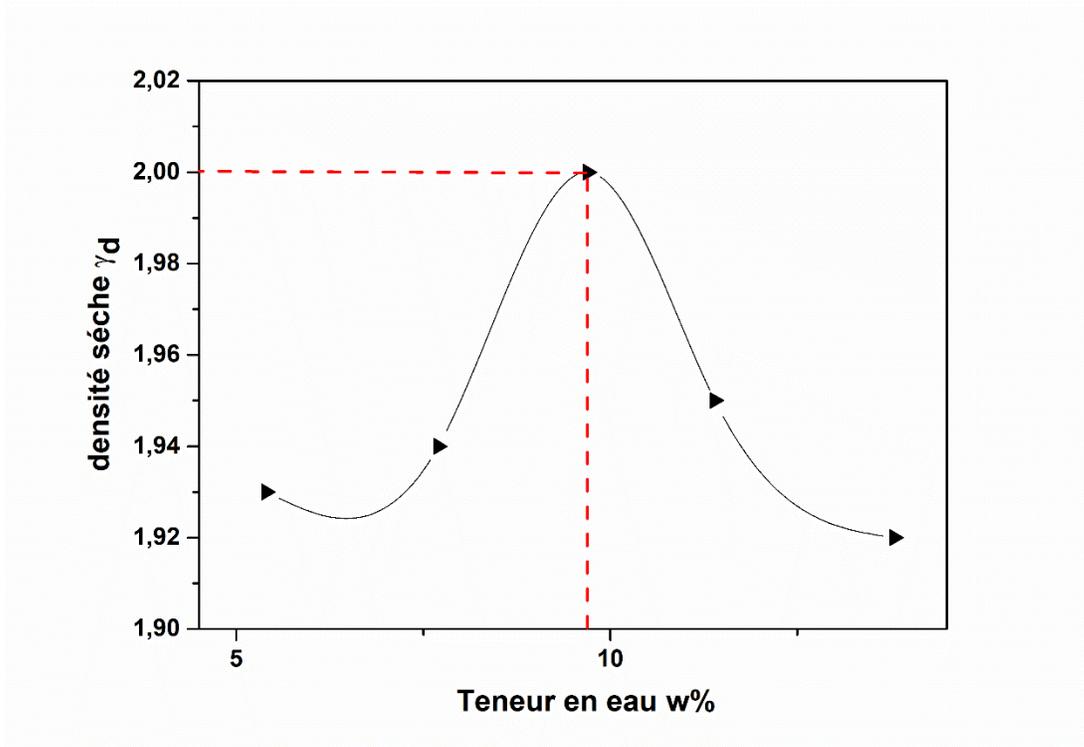


Fig. III- 9.—Essai de Proctor du sable calcaire.

A partir de cette courbe, on peut ressortir les paramètres fondamentaux de cet essai (paramètres de Proctor), qui sont la teneur en eau optimale et la densité sèche maximale. Le résultat est regroupé dans le tab.III-13.

Tab. III- 14.—Résultats de l’essai de Proctor.

	γ_d	W% opt.
sable calcaire	2.00	9.7

-Commentaire:

Les résultats de cet essai sont présentés sur la figure **III- 10**. Le sable calcaire présente un teneur en eau optimale de l'ordre de 9.7% et un poids volumique sec maximum de l'ordre de 2 kN/m³.

On peut dire que le sable calcaire n'a pas une grande sensibilité à l'eau, contrairement à l'argile qui a une grande sensibilité à l'eau.

2.2.3. E - Essai au bleu de méthylène :

L'essai est réalisé selon la norme AFNOR NF P 94-068 (1998). Les résultats des essais sont présentés dans le tableau. Selon la classification Colombier (1988).



Fig. III- 11.—Essai au bleu de méthylène.

Si nous adoptons la classification de Colombier (1988) retenue pour le sable calcaire, nous trouvons que les échantillons sont peu pollués.

$VB < 0,2$ matériau propre.

$0,2 < VB < 0,5$ matériau propre.

$0,5 < VB < 1$ matériau pollué.

$VB > 1$ matériau très pollué.

Valeur de bleu méthylène $VB (0/d)(cm^3/g) 0.06$: sable calcaire

- Commentaires :

D'après ces résultats, le sable calcaire est classé comme un matériau sols sableux échantillon sont très propre ($VB < 0,2$) elle est, VB pour les L'échantillon est très faible donc on dit que un matériau sols sableux. (Colombier, 1988)

III 2.2.4 - Caractérisation physique :

Masse volumique apparente :

La masse volumique apparente obtenue : $\gamma_{app} = 1640 \text{ kg/m}^3$.

La masse volumique absolue :

La masse volumique absolue obtenue : $\gamma_{abs} = 2690 \text{ kg/m}^3$

Équivalent de sable :

Équivalent de sable des échantillons sable calcaire. $SE = 64.81$.

Équivalent de sable	
Paramètres	ESP
Sable calcaire	64.81

Tab. III- 15.— Équivalent de sable des échantillons tuf et sable calcaire.

Le sable calcaire est classé comme un «Sable légèrement argileux" de propriété admissible pour béton de qualité quand on ne craint pas particulièrement de retrait ($60\% < PS < 70\%$).

III.3 Conclusion :

Les essais d'identifications géotechniques sont pour but de classer les matériaux et de les situer, Ces essais nous ont permis de constater que :

✚ Pour Argile d'EL MENIA (TAGHIT) :

- L'argile d'ELMENIA appartient au groupe des sols fines.
- L'argile d'ELMENIA appartient à la catégorie des sols Limon très plastique, et les minéraux prédominants sont la Kaolinite.
- L'argile d'ELMENIA appartient au groupe des argiles calcaires.

- L'argile d'EL MENIA est un matériau très pollué.

✚ Pour sable calcaire :

Analyse granulométrique Il est classé sols sableux.

Limites d'Atterberg IP (%) Non mesurable.

Les essais de compactage, densité sèche optimale du Proctor, $(\gamma_d)_{Max} = 2$, $W_{opt} = 9.7\%$.

Essai au bleu de méthylène est classé comme un matériau sols sableux échantillon est très propre.

Ces résultats d'identification seront utilisés dans le chapitre IV pour définir les formulations optimales.

CHAPITRE IV.
ETUDE DE GONFLEMENT
ETUDE STABILISATION
DEL'ARGILE UTILISE

IV.1 Introduction :

Les argiles gonflantes ont des caractéristiques physiques bien spécifiques permettant de donner une idée préliminaire sur leur comportement vis-à-vis le gonflement (mesure indirecte du potentiel de gonflement), Holtz et al (1991). En outre, la mesure des paramètres de gonflement étant nécessaire (mesure directe).

L'objectif de ce chapitre est de déterminer les paramètres de gonflement de l'argile (EL MENIA), puis d'étudier l'effet du sable calcaire en différentes pourcentage sur les propriétés physiques (limites des consistances) et sur les paramètres de gonflement (pression de gonflement).

IV.2 Etude du gonflement des argiles :

IV.2.1 Estimation du potentiel de gonflement (mesure indirecte) :

Après avoir effectué les essais d'identifications qui représentent des paramètres et indices de classification selon plusieurs auteurs, l'argile d'EL MENIA considérée dans cette étude est classée comme suit :

- ✚ Classifications selon un seul paramètre (IP).
- ✚ Classifications selon deux paramètres (WL ; IP), (A2 ; C2).

IV.2.1.1 Classification selon un paramètre :

Tab.IV- 1.—Evaluation du potentiel de gonflement à partir de l'indice de plasticité.

(D'après Snethen et al, 1977).

Potential de gonflement	Indice de plasticité IP (%)
Bas	<15
Moyen	15-35
Haut	>35

D'après les essais au laboratoire :

Le résultat de classification du potentiel de gonflement d'argiles est regroupé dans le tableau (IV.2).

Tab.IV- 2.—Classification du potentiel de gonflement à partir de l'indice de plasticité.

	IP %	Classification
Argiled'EL MENIA	31.33	Moyen

IV.2.1.2 Classification selon de deux paramètres :

Tab.IV- 3.—Classification du taux de gonflement à partir de la limite de liquidité et l'indice de plasticité. (D'aprèsO'nell et Poormoayed, 1980).

WL %	Ip	Classification
20-49	15-24	faible à moyen
50-70	24-46	élevé
>70	>46	trésélevé

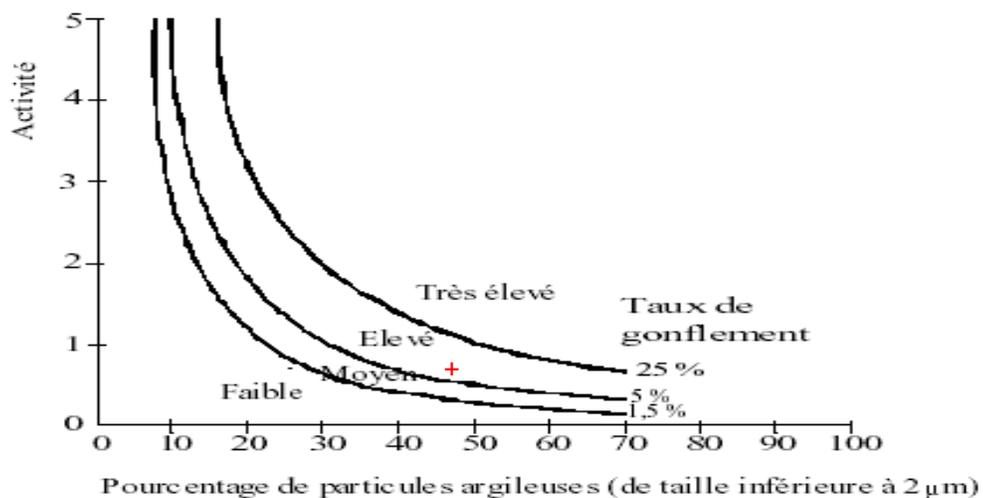


Fig.IV- 1.—Abaque d'évaluation de potentiel de gonflement (D'après Seed et al, 1962.)

D'après les essais de laboratoire on obtient :

Les résultats de classification du potentiel de gonflement regroupés dans les tableaux (IV.4, IV.5) suivants.

Tab.IV- 4.—Classification du potentiel de gonflement de l'argile de EL MENIA à partir de la limite de liquidité et de l'indice de plasticité (d'après O'neil et Poormoayed, 1980).

	WL %	IP %	Classification
Argile d'EL MENIA	69.65	31.33	élevé

Tab.IV- 5.—Classification du potentiel de gonflement de l'argile d'EL MENIA à partir de l'activité et pourcentage des particules < 2 µm . (D'après Seed et al, 1962.)

	A2	C2%	Classification
Argile d'EL MENIA	0.73	48	élevé

- **Commentaire :**

D'après les résultats obtenus et selon les classifications on peut dire et expliquer que :

- ✚ L'argile EL MENIA a un taux de gonflement élevé, ce qui est en accord avec le minéral prédominant qui est la kaolinite.
- ✚ Toutes les classifications (selon un paramètre ou deux paramètres) montrent que l'argile EL MENIA a un taux de gonflement élevé.
- ✚ Pour confirmer les résultats obtenus par les méthodes indirectes, les mesures directes du potentiel de gonflement sont indispensables.

IV.2.2 Pression de gonflement :

Pour la mesure de la pression de gonflement, on a utilisé la méthode décrite dans le chapitre (II) qui est : Méthode du volume constant.

IV.2.2.1 Appareils d'essais pour mesurer la pression de gonflement :

- ✚ Balance
- ✚ Odomètre
- ✚ Moule utilise pour le compactage statique des échantillons $\begin{cases} D = 8.5 \text{ cm} \\ H = 11.5 \text{ cm} \end{cases}$
- ✚ Presse (vitesse 1.27mm /min.
- ✚ Epruvettes (250 ml et 1000 ml).
- ✚ Plateau métallique.
- ✚ Tamis de 400 μm .
- ✚ Spatule
- ✚ Piston
- ✚ Trousse coupante $\begin{cases} D = 50 \text{ mm} \\ H = 20 \text{ mm} \end{cases}$
- ✚ Compateur (0.01mm).
- ✚ Les poids
- ✚ Etuve

IV.2.2.3 Photod'appareillages utilisés :



Fig.IV- 3.—Tamisage



Fig.IV- 2.—Odomètre uni axial.



Fig.IV- 4.—Balance



Fig.IV- 5.—Comparteur



Fig.IV- 7.—Moule



Fig.IV- 8.—Spatule



**Fig.IV- 6.—Plateau
Métallique**



Fig.IV- 10.—Étuve



**Fig.IV- 9.—Presse
utilisée pour le
compactage statique**

IV.2.2.2 Préparation des échantillons :

- ✚ Broyage – tamisage (400 μ m) – séchage (à l'air libre puis à l'étuve 600C).
- ✚ Préparation des échantillons selon les deux paramètres ($\gamma_d = 1.59 \text{ g/cm}^3$; $\omega\% = 10.67\%$).
- ✚ On pèse 300 gr d'argile sec.
- ✚ Moulage + compactage avec la presse de vitesse 1.27mm /min, tel que la hauteur de l'échantillon cylindrique dans le moule doit être toujours supérieure à la hauteur de l'échantillon (trousse coupant), on choisie H = 3 cm.
- ✚ Démoulage l'échantillon.
- ✚ Découper l'échantillon cylindrique suivant les dimensions choisies (D = 50 mm ; H = 20mm) ; arasage et lissage dans les cotés supérieures et inférieures avec comblement des vides.

✚ Mise de l'échantillon dans la cellule oedométrique.

IV.2.2.4 Résultats :

Les résultats pour la pression de gonflement sont présentés sur les figures (IV.2).

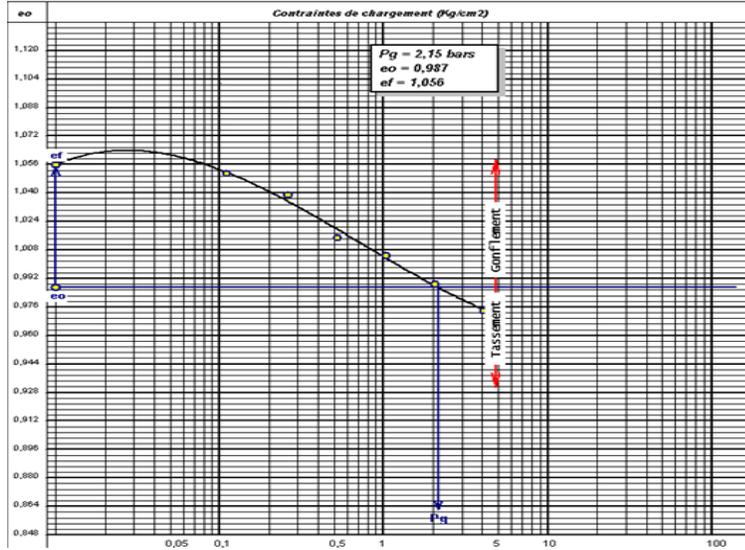


Fig.IV- 11.—Courbe de la pression de gonflement par essai oedométrique.

Tab.IV- 6.—Résultat de la pression de gonflement.

	Pg (bar)
l'argile d'EL MENIA	2,15

Pg : pression de gonflement (bar).

-Commentaire :

D'après les résultats des essais de gonflement, on peut conclure :

Les résultats de la pression de gonflement montrent que :

Dès le début, on remarque le gonflement progressivement jusqu'à pic. On applique une charge qui provoque une diminution, puis on retire la charge, on constate une montée, mais pas comme la première après avoir appliqué une autre charge. Il y a aussi une diminution on fait ça progressivement jusqu'à stabilité.

Après analyse de la courbe et les résultats de la mesure directe de la pression de gonflement, ont montré que l'argile de EL MENIA a présenté un taux de gonflement Moyen; ce qui est en accord avec les mesures indirectes basées sur les paramètres d'identifications.

IV.3 Etude de la stabilisation des argiles utilisées :

IV.3.1 Introduction :

Les matériaux choisis pour l'étude de la stabilisation des sols sont le sable calcaire, qui est dédié à l'étude de l'effet du sable calcaire sur les propriétés physiques (les limites) et les paramètres de gonflement des argiles EL MENIA.

Les pourcentages de sable calcaire utilisés sont (15% + 30% + 45%).

IV.3.2 Effet du sable calcaire sur les limites de consistances des argiles :

Les essais des limites d'Atterberg pour sol sont effectués selon les mêmes normes que celle présentées dans le chapitre II. Les résultats sont regroupés dans les tableaux suivant :

IV.3.2.1 Argile:

Les tableaux (IV.9) regroupé les résultats des limites de consistances des différents mélanges.

Tab.IV- 7.—Limites de consistances des différents mélanges :

(Argile + sable calcaire).

	A+0%	A+15% SC	A+30% SC	A+45% SC
WL%	69.65	51.83	42.86	35.39
(ΔWL/WL)%	/	25.58	34.46	49.18
WP%	38.32	27.25	23.15	18.68
(ΔWP/WP)%	/	28.88	39.58	51.25
IP%	31.33	24.13	19.70	16.74
(ΔIP/IP)%	/	22.98	37.12	46.56

$$\Delta WL = WL - WL (\%).$$

$$\Delta WP = WP - WP (\%).$$

$$\Delta IP = IP - IP (\%).$$

SC: sablecalcaire.

Les résultats des tableaux des limites de consistance précédents sont traduits par des courbes des figures suivantes :

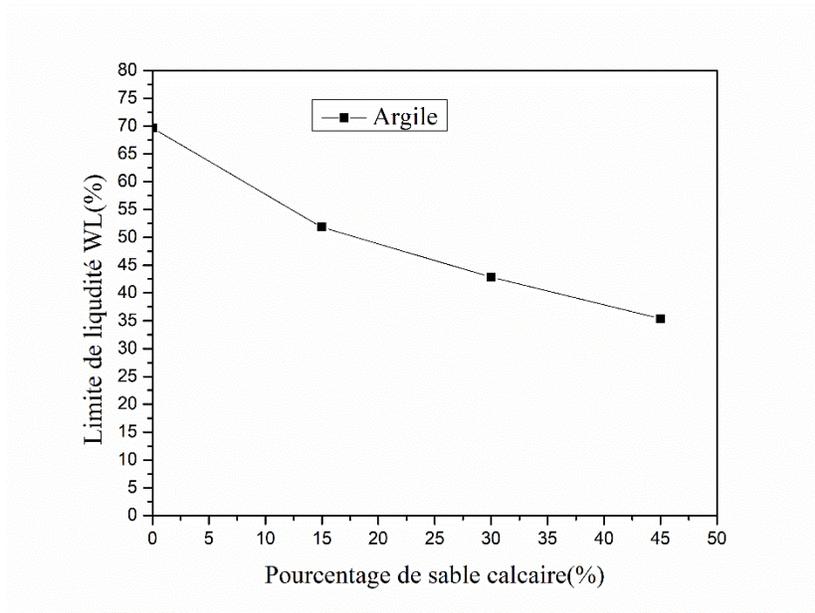


Fig.IV- 12.—Variation de WL en fonction de pourcentage de sable calcaire.

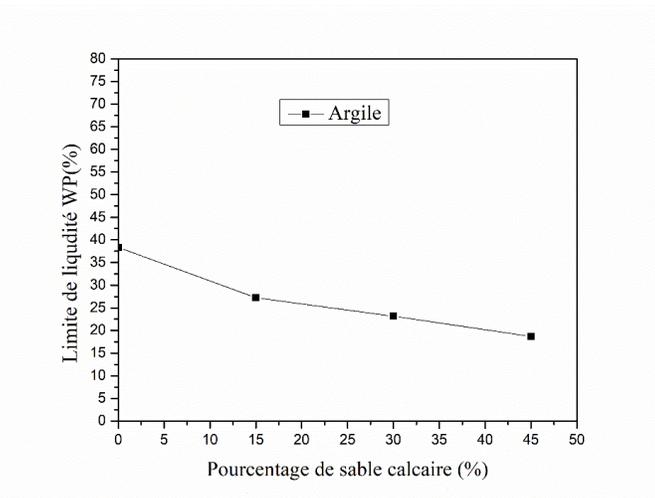


Fig.IV- 13.—Variation de Wp en fonction de pourcentage sable calcaire.

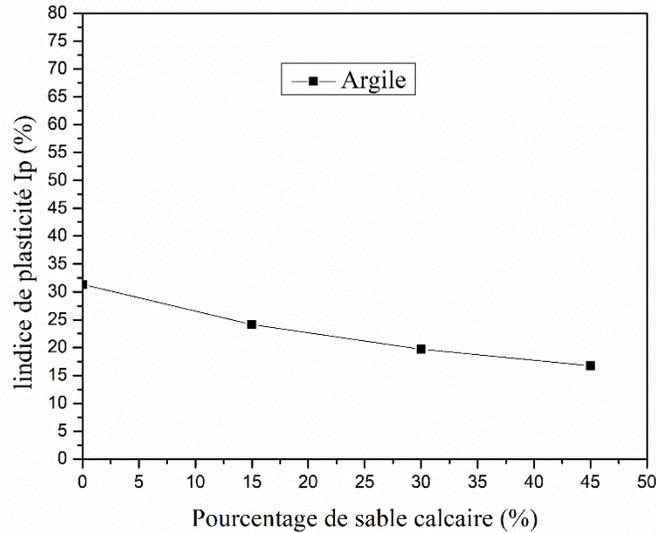


Fig.IV- 14.—Variation de Ip en fonction de pourcentage desable calcaire.

-Commentaire :

D'après les résultats obtenus, on peut tirer les constatations suivantes :

On remarque que lorsqu'on ajoute du sable de calcaire à un pourcentage de 15% et 30% et 45%, il y a une diminution de la limite de liquidité, de la limite de plastique et de l'indicateur de plasticité. Pour 45%, on note la baisse de l'indice de plasticité, de la limite de plasticité et de la limite de liquidité en 50%.

D'après les résultats obtenus, nous pouvons dire que le sable de calcaire conduit à une diminution des limites de consistance. Cette cohésion est d'autant plus forte que le pourcentage de sable de calcaire est grand.

IV.3.2.2 Influence de l'ajout de sable calcaire sur la pression de gonflement :

Les méthodes utilisées pour la mesure de la pression de gonflement sont les mêmes utilisés dans chapitre (II). Les échantillons sont préparés par le compactage statique à la teneur en eau initiale et la densité sèche désirée (les mêmes qui sont utilisées pour le taux de gonflement), avec les mêmes dimensions.

Les résultats sont donnés dans les figures et les tableaux suivent :

IV.3.2.3 Influencede sable calcaire :

Les résultats pour la pression de gonflement (Argile + sable calcaire, sont présentés sur les figures (IV.6) (IV.7) (IV.8).

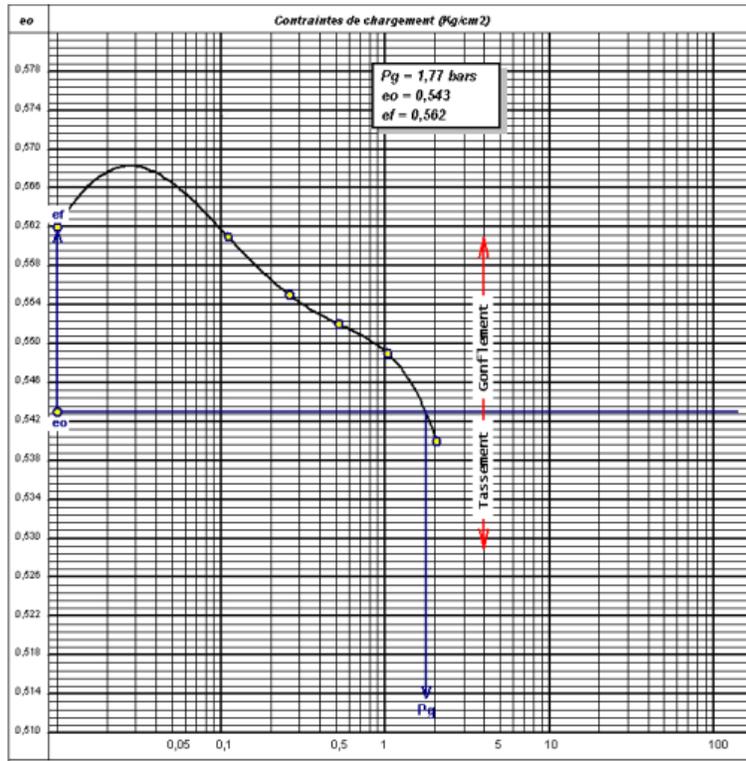


Fig.IV- 15.—Courbe de la pression de gonflement par essai oedométrique (Argile+15%SC).

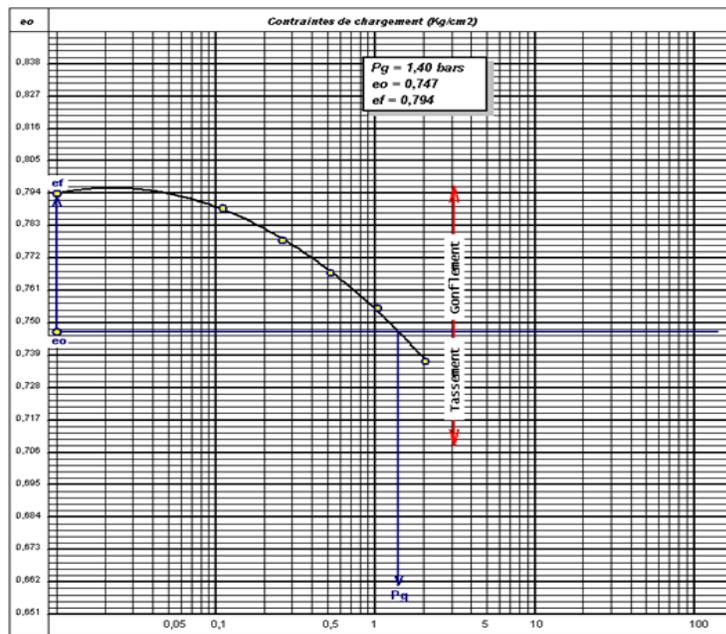


Fig.IV- 16.—Courbe de la pression de gonflement par essai oedométrique (Argile+30%SC).

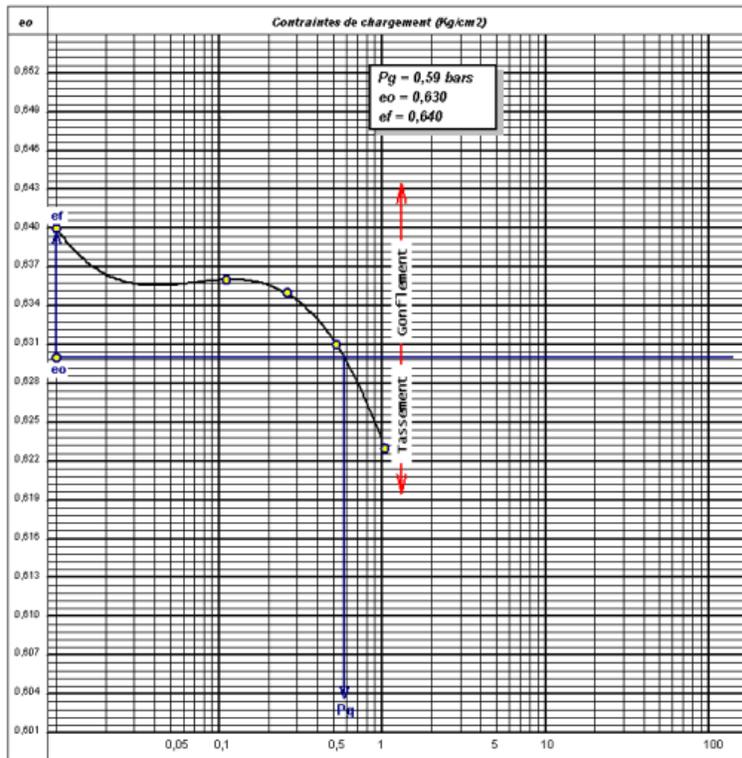


Fig.IV- 17.—Courbe de la pression de gonflement par essai oedométrique (Argile+45%SC).

Tab.IV- 8.—Variation de pression de gonflement en fonction de pourcentage de sable calcaire.

Sable calcaire (%)	Argile	
	Pg (bar) (A + SC %)	($\Delta P_g/P_g$)%
0%	2.15	/
15%	1.77	17.67
30%	1.40	34.88
45%	0.59	72.55

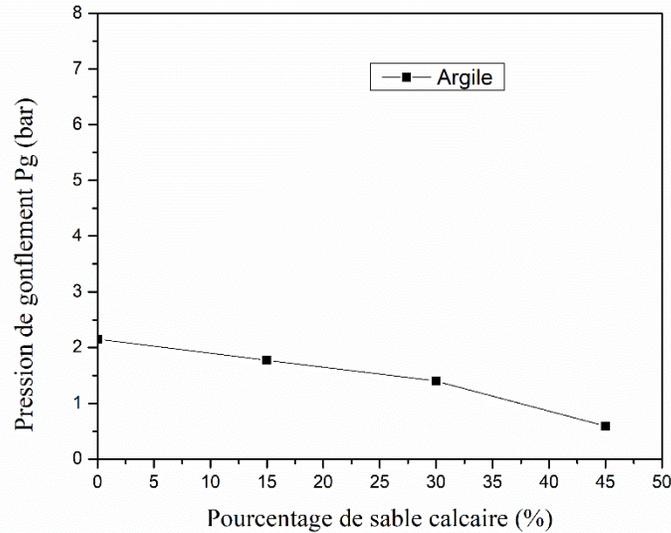


Fig.IV- 18.—Variation de la pression de gonflement Pg en fonction de pourcentage de sable calcaire.

-Commentaire :

D'après les résultats obtenus à partir des courbes et du tableau, on peut dire que :

L'ajout de sable calcaire entraîne une réduction de la pression de gonflement, et plus le pourcentage de sable calcaire est élevé, plus le pourcentage de réduction de la pression de gonflement est élevé, car dans le pourcentage le plus élevé, une diminution de 70% s'est produite, ce qui signifie que le précédent les déclarations sont correctes. ce qui est en accord avec les résultats de plusieurs auteurs.

IV.4 Conclusion :

Les résultats obtenus lors des essais précédentes sur la pression de gonflement réalisées sur de l'argile de EL MENIA traité à un pourcentage différent de sable calcaire ont montré :

Plus le pourcentage de sable calcaire est élevé, plus il entraîne une diminution de la pression de gonflement, car les coefficients de gonflement sont inversement proportionnels aux pourcentages de sable calcaire.

Le pourcentage de 45% nous a donné la meilleure stabilité.

CONCLUSION GÉNÉRALE

Dans le domaine du Génie Civil, ces phénomènes de gonflement et retrait sont à l'origine de nombreux désordres tant pour les structures construites en surface (bâtiments, fondations superficielles, ouvrages de soutènement, remblais,...).

Les exemples de désordres liés à la présence d'argiles gonflantes sont nombreux et variés. Ce sont les conséquences néfastes du gonflement des sols sur les ouvrages en surfaces et en souterrains qui ont incité les recherches et les ingénieurs à penser à des remèdes et des solutions aux causes des dégâts engendrés par ce phénomène.

Cette étude s'inscrit dans le cadre de la stabilisation des argiles gonflantes de la région EL MENIA (TAGHIT),

mise en contact avec de le sable calcaire. L'intérêt a été particulièrement porté pour objectifs :

Mesure les amplitudes et les pressions du gonflement d'une région.

Trouver des solutions pratiques de stabilisation du phénomène du gonflement.

L'étude bibliographique réalisée dans ce mémoire a mis en relief l'importance et les conséquences du gonflement sur la stabilité et le comportement des ouvrages creusés dans les matériaux argileux. Il a également permis de mettre en évidence de la complexité de ce phénomène surtout à l'échelle microscopique en raison des nombreux mécanismes impliqués (adsorption, osmose, capillarité). Toute la difficulté réside dans la définition des paramètres sensés présenter le phénomène du gonflement et par la suite caractériser les sols gonflants. Il est noté que l'influence de l'état initial du sol est très importante sur le gonflement, de ce fait les paramètres obtenus dépendent essentiellement de la densité sèche, la teneur en eau initiale et d'autres paramètres extérieurs tel quel effet cyclique (humidification /dessiccation).

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

Pour reconnaître et identifier un sol argileux plusieurs études doivent être faites, une étude géotechnique et chimique pour déterminer les paramètres physiques suivis de mesures directes de paramètres mécaniques (pression de gonflement) basée sur des méthodes oedométriques.

L'étude expérimentale a consisté tout d'abord à la détermination des paramètres géotechniques et mécaniques des sols provenant des sites visés auparavant de la région de EL MENIA (TAGHIT), une étude qui porte sur l'effet de différents dosages de sable calcaire sur la plasticité, les paramètres mécaniques et la déformabilité de ces sols argileux, afin d'en déduire une méthode pratique de stabilisation du gonflement et de sa pression.

Sur la base des résultats obtenus sur nos argiles et à la lumière des interprétations de ces résultats, plusieurs conclusions ont été faites:

La proportion de sable calcaire affecte fortement les limites de consistance, cela s'explique par le fait que plus la proportion de sable calcaire est élevée, plus la limite de liquidité, la limite plastique et l'indice de plasticité diminuent, du fait de la présence de liaisons hydrauliques et mécaniques.

Les contenus en sable calcaire ont une grande influence sur les coefficients de gonflement, nous avons vu qu'à la plus forte proportion de sable calcaire à 45 %, les pressions de gonflement étaient réduites de près de moitié ou plus.

Cette étude ne devrait pas s'arrêter là, avec un endroit seulement mais nous recommandons fortement pour la poursuite de cette recherche sur d'autres sites EL MENIA afin de pouvoir tracer une carte d'aléa gonflement.

Références

- [1] Hafsi, A (1993). Théories de la double couche et gonflement des argiles non. Saturées. Hall Inc, Englewood Cliffs, N.J. 07632, <http://worldcat.org/isbn/0134843940>.
- [2] Grim, R. E. (1959). Physico-chemical properties of soils: Clay minerals. Journal of The Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, 85(1959), 1-17.
- [3] Lambe, T. W. (1953, October). The structure of inorganic soil. In Proceedings of the American Society of Civil Engineers (Vol. 79, No. 10, pp. 1-49). ASCE.
- [6] Lin, D.F., Lin, K.L., Hung, M.J. and Luo, H.L. (2007). Sludge ash/hydrated lime on The geotechnical properties of soft soil. Construction and Building Materials, Vol. 145, No. 1, 58–64,doi:10.1016/j.jhazmat.2006.10.087.
- [7] Holtz, R. D., &Kovacs, W. D. (1981). An introduction to geotechnical engineering.
- [8] Cabane, N. (2004). Sols traités à la chaux et aux liants hydrauliques: Contribution à L'identification et à l'analyse des éléments perturbateurs de la stabilisation (Doctoral Dissertation, Université Jean Monnet-Saint-Etienne).
- [9] Gadouri, H., Harichane, K., &Ghrici, M. (2017). Effects of Na₂SO₄ on the Geotechnical properties of clayey soils stabilised with mineral additives. International Journal Of Geotechnical Engineering, 11(5), 500-512.
- [10] Warkentin,B.P;Bozozuk,M.,(1961). Shrinking and swelling properties of two Canadian clays >>Proc. of the 5 ThI.C.S.M.F.E.,Paris, pp.851-855.
- [11] Skempton A.W. (1953). The collaidal activity of clays ». Proceedings of the Third International Conférence on Soil Mechanics and Foundations Engineering. Vol.1,pp 57-61.
- [12] Mitchel.J.K. (1976). Fundamentals of soil behaviour, John Wiley &sons. Inc(New York 422 pp
- [14] Seed, H.B.,R.J.WoodwardETR.Lundgren. (1962). « Prediction of swelling potentiel for compacted clays ». Journal of the soil Mechanics and foundations division,ASCE,vol.88. N° SM4,1962, p.107-131.

[19] Wong,H.Y. AndYong.R.M. , (1973), « Astudy of swelling and swelling force during unsaturated flow in expansive soils » Proc. Of the 3rd. 1. C.E.S.,Haifa,pp. 143-151.

[20] Popescu,G... (1986). « A comparaisonbetwen the behaviour of swelling and of collapsing soils ». Engineering geology,Elseviers sciences publishersB.V.,Amsterdam, pp.145-163.

[21] Serratrice, J.F &B.Soyez,(1996), « Les essais de gonflements ». Bulletin des laboratoires des ponts et chaussées.204.Juillet - Août 1996 - réf 4082 - pp 65-85.

[25] Hachichi. A et Fleureau. J.M, (1999) ; «Caractérisation et stabilisation de quelquesols gonflants d'Algérie», Revue Française de géotechniques vol. 86, pp. 37-51.

[26] Sridharan. Y, Gurtug. G, (2004); «Swelling behaviour of compacted fine-grained soils» Engineering Geology. pp 9 –18.

[35] Bouroukba. S, (2001); « Contribution a l'étude de la stabilisation chimique de quelques argiles gonflantes de la région d'Oran ». Thèse de magister Université de Mohamed Boudiaf U.S.T.O, Oran.

[36] Mouroux. P et al, (1989) ; « La construction économique sur les sols gonflants ». Manuels et méthodes, n°14, BRGM. France

[52] Seed. H.B, Woodward. R.J, Lundgren. R, (1962); « Prediction of swelling potential for compacted clays», Journal of the soil Mechanics and foundations division. ASCE, vol 88, N° SM4, pp.107-131

[56] Bekkouche .A, Djedid. A, AissaMamoune. S.M, (2001); « Identification et prévision du gonflement de quelques sols de la région de Tlemcen (Algérie) » Bulletin des laboratoires des ponts et chaussées, pp 67-75.

AFNOR NF P94-057. (1992). Sols : reconnaissance et essais - Analyse granulométrique des sols - Méthode par sédimentation.

AFNOR NF P94-093. (1997a). Sols : reconnaissance et essais - Détermination des références de compactage d'un matériau - Essai Proctor normal. Essai Proctor modifié.

AFNOR NF P 94-048. (1996a). Sols : reconnaissance et essais—Détermination de la teneur en EAU.

AFNOR NF P 94-051. (1993a). Détermination des limites d'Atterberg—Limite de liquidité à la coupelle—Limite de plasticité au rouleau.

AFNOR NF P 94-056. (1996b). Sols : reconnaissance et essais—Analyse granulométrique—Méthode par ta-misage à sec après lavage.

REFERENCE

AFNOR NF P 94-068. (1998). Sols : reconnaissance et essais—mesure de la capacité d'adsorption de bleu de méthylène d'un sol ou d'un matériau rocheux—Détermination de la valeur de bleu de méthylène d'un sol ou d'un matériau argileux.