

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



Mémoire de Master

Présenté à l'Université 08 Mai 1945 de Guelma

Faculté des Sciences et de la Technologie

Département de : Génie Civil & Hydraulique

Spécialité : Génie Civil

Option : Géotechnique

Présenté par : DOUAKHA Mehdi
ARRIBI med lamine

Thème : Remédiation des argiles gonflantes

Sous la direction de : Pr. Rouaigua Ammar

septembre 2020

Remerciements

Nos remerciements vont tout premièrement à Dieu tout puissant pour la volonté, la santé et la patience, qu'il nous a donné pour terminer ce mémoire.

Nous tenons à remercier notre encadreur Dr. Rouaiguia Ammar, professeur à l'université de 8Mai 1945 (Guelma), pour m'avoir confié ce sujet et pour l'aide et le temps qu'il a bien voulu me consacrer et sans lui ce mémoire n'aurait jamais vu le jour.

Nous remercions les membres de jury d'examen pour l'honneur qu'ils nous font en participant à l'évaluation de ce travail.

Nous remercions vont aussi à tous les enseignants du département de génie civil qui ont contribué à notre formation

Enfin nous tenons à exprimer notre reconnaissance à tous nos amis et collègues pour leur soutien moral et matériel

Dédicace

Je Dédie ce mémoire De fin d'études

A ma chère mère

A mon cher père

A mes frères

A ma grande mère

A toute ma famille

A tous mes amis

A toute les étudiants de Géotechnique

*A toute personne m'ayant aidé à franchir un
horizon dans ma vie et mes études*

Douakha Mehdi

Dédicace

Je Dédie ce mémoire De fin d'études

A ma chère mère

A mon cher père

A mes frères

A ma grande mère

A toute ma famille

A tous mes amis

A toute les étudiants de Géotechnique

*A toute personne m'ayant aidé à franchir un
horizon dans ma vie et mes études*

Arribi med lamine

Résumé

Les sols gonflants sont reconnus comme des sols sensibles aux variations hydriques subies au cours des cycles saisonniers, pouvant engendrer des désordres importants sur les constructions en Algérie et à travers le monde. La détermination du potentiel de gonflement, la pression de gonflement, et les techniques d'amélioration de ces sols sont très importantes. Vu l'importance et la complexité du phénomène de gonflement, plusieurs méthodes expérimentales ont été proposées pour sa caractérisation (évaluation du potentiel et de la pression de gonflement).

Dans cette étude bibliographique, Beaucoup de méthodes et d'appareillages ont été examinés, pour connaître l'influence et l'efficacité d'une solution ou d'un produit sur la stabilisation d'un sol gonflant. Citant à titre d'exemple l'addition de la chaux et des fibres plastiques ont influencés positivement la densité sèche maximale après compactage et la résistance de compression. Le ciment aussi une fois introduit dans le sol gonflant, le processus de cimentation est assez rapide et l'amélioration significative de la résistance est obtenue rapidement et même des fois en quelques heures. Le mélange des échantillons d'argile expansive avec des fibres de caoutchouc des pneus usés réduit la pression et l'amplitude de gonflement. Les cendres volantes, produites dans la combustion des charbons bitumineux, présentent des caractéristiques de cimentage et peuvent être utilisées dans une large gamme des applications de stabilisation. Les résultats d'essai en laboratoire sur les argiles gonflantes indiquent que ces cendres volantes sont efficaces à l'amélioration de la texture et la plasticité des sols traités.

Abstract

Expansive (swelling) soils are recognized as soils sensitive to water variations undergone during seasonal cycles, which can cause major damage to buildings in Algeria and throughout the world. The determination of the swelling potential, swelling pressure, and techniques for improving these soils are very important. With regards to the importance and the complexity of the swelling phenomenon, several experimental methods have been proposed for its characterization (evaluation of the swelling potential and pressure).

In this literature review, many methods and apparatus were examined, to know the influence and the effectiveness of a solution or a product on the stabilization of a swelling soil. Giving as an example the addition of lime and plastic fibers positively influences the maximum dry density after compaction and the compressive strength. The cement also once introduced into the swelling soil, the cementation process is quite quick and the significant improvement in strength is achieved quickly and sometimes even within hours.

Mixing the expansive clay samples with rubber fibers from used tires reduces the pressure and range of swell. Fly ash, produced in the combustion of bituminous coals, exhibits cementing characteristics and can be used in a wide range of stabilization applications. Laboratory test results on swelling clays indicate that this fly ash is effective in improving the texture and plasticity of treated soils.

ملخص

يتم التعرف على التربة المنتفخة على أنها تربة حساسة لتغيرات المياه التي تتعرض لها خلال الدورات الموسمية، والتي يمكن أن تسبب أضراراً جسيمة للمباني في الجزائر وفي جميع أنحاء العالم. إن تحديد إمكانية الانتفاخ وضغط الانتفاخ وتقنيات تحسين هذه التربة مهمة للغاية. فيما يتعلق بأهمية وتعقيد ظاهرة الانتفاخ، تم اقتراح عدة طرق تجريبية لتوصيفها (تقييم إمكانات الانتفاخ والضغط).

من خلال دراسات بيليوغرافية، تم فحص العديد من الطرق والأجهزة، لمعرفة تأثير وفعالية محلول أو منتج على استقرار التربة المنتفخة. وكمثال على ذلك، فإن إضافة الجير والألياف البلاستيكية تؤثر إيجاباً على أقصى كثافة جافة بعد الضغط وقوة الانضغاط. بمجرد إدخال الإسمنت في التربة المنتفخة، تكون عملية التثبيت سريعة جداً ويتم تحقيق تحسن كبير في القوة بسرعة وأحياناً في غضون ساعات. خلط عينات الطين المنتفخ مع ألياف المطاط من الإطارات المستعملة يقلل من الضغط ومدى الانتفاخ. يُظهر الرماد المتطاير، الناتج عن احتراق الفحم القاري، خصائص تدعيم ويمكن استخدامه في مجموعة واسعة من تطبيقات التثبيت. تشير نتائج الاختبارات المعملية على الطين المنتفخ إلى أن هذا الرماد المتطاير فعال في تحسين نسيج وليونة التربة المعالجة.

Sommaire

Remerciements

Dédicace

Résumé

Sommaire

Liste des figures

***INTRODUCTION GENERALE*..... 1**

Chapitre 01 : Les sols à problèmes

1.1 Introduction 3

1.2 Les phénomènes liés aux sols à problèmes 3

1.2.1 Tassement..... 3

1.2.2 Glissement..... 4

1.2.3 Affaissement..... 4

1.2.4 Gonflement..... 5

1.3 Type des sols à problèmes..... 5

1.3.1 Les sols à problèmes chimiques 5

1.3.1.1 Sol acide 6

1.3.1.2 Sol salin 6

1.3.1.3 Sol alcalin..... 7

1.3.1.4 Sol sodique 8

1.3.2 Les sols a problèmes physiques 9

1.3.2.1 Sols dispersifs..... 9

1.3.2.2 Sols affaissables 10

1.3.2.3 Sols expansifs (gonflants) 12

1.3.2.4 Sol liquéfiable 13

1.3.2.5 Sol sableux 14

1.3.2.6 Sol sensible au gel..... 14

1.3.2.7 Sols tourbeux..... 15

Chapitre 02 : Les argiles gonflantes

2.1 Introduction	16
2.2 Phénomène des sols gonflants.....	18
2.3 Méthode de gonflement libre.....	19

Chapitre 03 : Les méthodes d'amélioration des sols gonflants

3.1 Introduction	23
3.2 But de la stabilisation	23
3.3 Méthodes d'amélioration des sols gonflants	24
3.3.1 Stabilisation mécanique.....	24
3.3.1.1 Application de fortes pressions	24
3.3.1.2 Compactage dynamique	24
3.3.1.3 Stabilisation par substitution	25
3.3.1.4 Stabilisation par drainage	25
3.3.1.5 Stabilisation Pré-humidification.....	26
3.3.1.6 Stabilisation par ajout de sable.....	26
3.3.1.7 Stabilisation par pré chargement	27
3.3.1.8 Stabilisation par colonne ballastée	28
3.3.1.9 Stabilisation par accélération de la consolidation par l'installation des drains verticaux	29
3.3.2 Stabilisation thermique.....	30
3.3.2.1 Déshydratation	30
3.3.2.2 Congélation	30
3.3.3 Stabilisation chimique, (par additifs).	31
3.3.3.1 Stabilisation par la chaux	31
3.3.3.2 Stabilisation par l'utilisation du ciment	34
3.3.3.3 Stabilisations par l'utilisation des ajouts cimentaires.....	35
3.3.3.4 Stabilisations par les fibres de plastique :	36
3.3.3.5 Stabilisation par les fibres de caoutchouc	36
3.3.3.6 Utilisation Les déchets des pneus.....	38

Chapitre 04 Essais expérimentaux au laboratoire Pour l'amélioration des sols gonflants

4.1 Introduction	40
4.2 Matériaux utilisés	40
4.2.1 Essais d'identification	40
4.2.1.1 Les limites d'Atterberg (NF P 94-0510,.....)	40
4.2.1.2 Essais d'analyse granulométrique :.....	40
4.2.2 Essais mécaniques :.....	41
4.2.2.1 Essai CBR (Californian-Bearing-Ratio).....	41
4.2.2.2 Essai de cisaillement a la boite.....	41
4.2.2.3 L'essai de gonflement à l'oedomètre :	41
4.3 Les additifs utilisés	42
4.3.1 Caoutchouc de pneu	42
4.3.2 Cendres volantes	44
4.3.2.1 Les propriétés chimiques.....	45
4.3.3 Fibre plastiques	45
4.3.4 Chaux	47
La plus grande valeur de la densité sèche maximale ($\rho_{dmax} = 1.80 \text{ g/cm}^3$) est obtenue par l'addition de 6% de la chaux avec sol B (voir figure 4.7).....	48
4.3.4.1 Interprétation et discussion.....	51
4.3.4.2 Conclusion.....	51
4.3.5 Poudre du marbre	52
4.3.5.1 Exemples des essais de gonflement à l'oedomètre	53
4.3.6 Ciment.....	59
Conclusion générale	60
REFERENCE.....	62

Liste de figure

Chapitre 01 Les sols à problèmes

Figure 1.1 : Tassement du sol compressible sous l'effet des charges apportées par le remblai.....	03
Figure 1.2 : Exemple d'un glissement terrain.....	04
Figure 1.3 : Zone touchée par un affaissement de terrain, commune d'Azazga (Tizi Ouzou).....	04
Figure 1.4 : Retrait et gonflement des sols.....	05
Figure 1.5 : L'effet de L'acidification sur le sol.....	06
Figure 1.6 : L'effet du sel sur le sol salin.....	07
Figure 1.7 : Sol alcalin.....	08
Figure 1.8 : Sol sodique.....	09
Figure 1.9 : Les sols dispersifs.....	10
Figure 1.10 : Présente exemple des sols affaissables.....	11
Figure 1.11 : Bâtiments endommagés par les mouvements des sols argileux expansifs. Western desert, Egypt., [1].....	12
Figure 1.12 : Immeubles partiellement enfouis et ayant bascule a la faveur d'une Liquéfaction du sol lors du séisme de 1964 a Niigata, Japon.....	13
Figure 1.13 : Type de sol sableux.....	14
Figure 1.14 : Type de sol sensible au gel.....	15
Figure 1.15 : Type de sol tourbeux.....	15

Chapitre 02 : Les argiles gonflantes

Figure 2.1 : Méthode de gonflement libre à l'appareil œdométrique et triaxial (Cuisinier, 2002).....	19
---	----

Chapitre 03 : Les méthodes d'amélioration des sols gonflants

Figure 3.1 : Chantier d'un compactage dynamique profond.	24
Figure 3.2 : Substitution du mauvais sol. (J.P Magnan, 2000).....	25
Figure 3.3 : Principe de traitement par pré chargement.....	28
Figure 3.4 : Pré chargement pour drains verticaux.....	28
Figure 3.5 : Mise en œuvre des colonnes ballastées.....	29
Figure 3.6 : Principe Installation des drains.....	29

Figure 3.7 : Variation d'indice de plasticité en ajout de la chaux Bulletin CRR, cité par Azzouz ,2006.....	33
Figure 3.8 : Influence de la chaux sur les caractéristiques de compactage. Bulletin CRR, Cité par Azzouz, 2006.....	33
Figure 3.9 : Chantier de traitement du sol au ciment.....	34
Figure 3.10 : Fibre plastique.....	36
Figure 3.11 : Fibres de caoutchouc des pneus usés (1), Poudre de caoutchouc (2 & 3)....	37

Chapitre 04 Essais expérimentaux au laboratoire Pour l'amélioration des sols gonflants

Figure 4.1 : L'essai de gonflement à l'odomètre.....	41
Figure 4.2 : Effet de la teneur fibres en caoutchouc des pneus usés sur le potentiel et la pression de gonflement de sol A (Trouzine et al. 2012).....	43
Figure 4.3 : Effet de la teneur en caoutchouc des pneus usés sur le potentiel et la pression de gonflement de sol B (Trouzine et al. 2012).....	43
Figure 4.4: Courbe de compactage (Essai Proctor normal) pour sol A (sans et avec des fibres plastiques).....	46
Figure4.5 : Courbe de compactage (Essai Proctor normal) pour sol B (sans et avec des fibres plastiques).....	46
Figure4.6 : Courbe de compactage (Essai Proctor normal) pour sol A (sans et avec de la chaux).....	47
Figure4.7 : Courbe de compactage (Essai Proctor normal) pour sol B (sans et avec de la chaux).....	48
Figure 4.8 : Courbe de compactage (Essai Proctor normal) pour sol A (sans et avec de la chaux et des fibres plastiques).....	49
Figure 4.9 : Courbe de compactage (Essai Proctor normal) Pour sol naturel sans traitement et avec différents pourcentages de la poudre du marbre).....	52
Figure 4.10 : Évolution de la contrainte normale en fonction du potentiel de Gonflement. (Sol naturel après compactage).....	53
Figure 4.11 : Évolution de la contrainte normale en fonction du potentiel de Gonflement. (Sol naturel compacté + 4% poudre du marbre).....	54

Figure 4.12 : Évolution de la contrainte normale en fonction du potentiel de gonflement. (Sol naturel compacté + 6% poudre du marbre).....	55
Figure 4.13 :Évolution de la contrainte normale en fonction du potentiel de gonflement. (sol naturel compacté + 8% poudre du marbre).....	56
Figure 4.14 Évolution du potentiel de gonflement en fonction de l'état du sol.....	57
Figure 4.15 Évolution de la pression de gonflement en fonction de l'état du sol.....	58
Figure 4.16 : Effet du dosage au ciment sur le gonflement de la Bentonite de Meghnia. (Djedid, (2005)).....	59

Liste des tableaux

Chapitre 02 : Les argiles gonflantes

Tableau 2.1. Relation entre le potentiel de gonflement et la limite de retrait (Altmeyer, 1955).....	20
Tableau 2.2. Relation entre le potentiel de gonflement et l'indice de plasticité (Seed et al 1962).....	20
Tableau 2. 3. Prédiction de l'expansivité du sol par limite de liquidité.....	20
Tableau 2.4. Prédiction de l'expansivité du sol par l'indice de plasticité.....	21
Tableau 2.5. Prédiction de l'expansivité du sol par l'indice de plasticité modifiée (BRE, 1993).....	21
Tableau 2.6. Potentiel de gonflement (BRE, 1980).....	21
Tableau 2.7. Potentiel de gonflement (Ghen, 1988).....	22
Tableau2.8. Potentiel de retrait (Holtz & Gibbs, 1956).....	22
Tableau2. 9. Potentiel de gonflement (Holtz & Dakshhanmurthy,1973).....	22

Chapitre 03 : Les méthodes d'amélioration des sols gonflants

Tableau3.1 : Composition chimique des deux classes (F et C) en comparaison avec le ciment Portland.....	35
--	----

Chapitre 04 Essais expérimentaux au laboratoire Pour l'amélioration des sols gonflants

Tableau 4. 1 : Composition chimique en pourcentage <i>des</i> cendres volantes et du Ciment Portland. (Chauvin et al, 1980 ; Lav et Kenny, 1997).....	45
--	----

Tableau 4.2 : Comparaison la masse volumique sèche maximale et la résistance de Compression sol A.....	50
Tableau 4.3 : Comparaison la masse volumique sèche maximale et la résistance de Compression pour sol B.....	50
Tableau 4.4 : Les résultats des coefficients de gonflement pour sol naturel sans traitement et avec différents pourcentages de la poudre du marbre.....	57
Tableau 4.5. Les résultats de la pression de gonflement pour sol naturel sans traitement et avec différents pourcentages de la poudre du marbre.....	58

Introduction générale

Les sols argileux sont connus pour leur forte tendance à réagir avec l'eau. Une humidification des Particules argileuses provoque le gonflement. Ce phénomène est complexe, il est dû d'une part à la Saturation des pores du sol qui neutralise les forces capillaires et d'autre part à l'absorption des molécules d'eau sur la surface des particules argileuses avec pénétration d'eau entre les feuillets qui constituent ces particules. En cas d'évaporation de l'eau contenue dans l'échantillon, une diminution de volume se produit, ce qui provoque l'apparition de fissures de retrait.

L'ingénieur est confronté à des problématiques majeures lors de l'étude des ouvrages construits sur ce genre des sols car souvent les campagnes de reconnaissances géotechniques ne prévoient pas la mesure de plusieurs paramètres attachés à certains phénomènes. Parmi les causes d'instabilité d'ouvrages les plus rencontrés dans le monde entier et l'Algérie en particulier, le phénomène de gonflement, Ils peuvent être définis aussi comme des sols dont le volume change avec l'introduction d'humidité, c'est-à-dire qu'ils gonflent ou se contractent avec l'augmentation ou la diminution du taux d'humidité. Ces phénomènes de gonflement et de retrait causent de nombreux désordres pour les structures de génie civil fondées en surface des sols gonflants et pour les ouvrages enterrés.

La plupart des sols peuvent créer des problèmes du point de vue de construction. Dans ce cas, le sol ne peut pas être utilisé à des fins de construction et nécessite donc des techniques d'amélioration

Plusieurs techniques de stabilisation et de confortement, ont été utilisées dans le domaine de génie civil afin de résoudre les problèmes vécus. La chaux, le ciment, cendres volantes, les solutions salines, l'ajout de sable et les traitements par liants hydrauliques (chaux, ciment, cendres volantes, ...) les traitements organiques (bitumes, résines naturelles, polymères, ...) etc. le traitement mécanique et thermique

Au cours des dernières années un développement rapide des infrastructures dans les grandes villes, aggravé par la rareté des terres utiles et obligé les ingénieurs à améliorer les propriétés du sol pour supporter la charge transférée par l'infrastructure comme les bâtiments, les ponts, les routes chemins etc. L'amélioration des sols est la question centrale pour un grand nombre de projets d'ingénierie.

Ce mémoire comprend après une introduction générale, quatre chapitres essentiels :

Le premier chapitre s'articule autour d'une recherche bibliographique bien documentée sur Les phénomènes liés aux sols à problèmes et les différents types des sols à problèmes.

Le deuxième chapitre de ce mémoire se base sur le phénomène des sols gonflants et les modèles visant à estimer le potentiel de gonflement à partir de certains paramètres.

Le troisième chapitre fait le point sur les méthodes d'amélioration des sols gonflants, les techniques de stabilisation (mécanique, thermique, chimique)

Le quatrième et le dernier chapitre de ce mémoire présente quelques résultats obtenus par des essais expérimentaux réalisés par nos collègues et d'autres chercheurs sur l'amélioration des sols gonflants.

Enfin, nous clôturons ce mémoire par une conclusion générale qui présente des recommandations pour la prise en compte du phénomène de gonflement des sols dans les projets de géotechnique, ainsi que quelques perspectives futures.

1.1 Introduction

Tous les travaux de construction en génie civil entraînent une modification de l'équilibre existant dans les sols. Les concepteurs tiennent compte de ces modifications dans le dimensionnement des ouvrages, mais ces prévisions peuvent s'avérer insuffisantes en raison de phénomènes non pris en compte ou dont les mécanismes sont mal connus au moment de la construction. Les sols à problèmes ont été et continuent d'être un risque géologique majeur pour l'environnement bâti, avec des milliards de dollars dépensés dans le monde pour prévenir et réparer les dommages subis en raison de leur comportement.

1.2 Les phénomènes liés aux sols à problèmes

1.2.1 Tassement

Les tassements peuvent être uniformes ou différents d'un point à l'autre selon la nature du sol en place. Le tassement différentiel fait référence à des enfoncements non uniformes du sol sous la fondation d'une construction. Il est généralement dû au non uniformité du sol sur lequel repose la fondation. Il peut aussi résulter d'une application hétérogène des charges.



Figure 1.1 : Tassement du sol compressible sous l'effet des charges apportées par le remblai

1.2.2 Glissement

Le glissement de terrain est défini comme le déplacement d'une masse de terrains meubles ou rocheux au long d'une surface de rupture par cisaillement qui correspond souvent à une discontinuité préexistante (voir figure 1.2.).

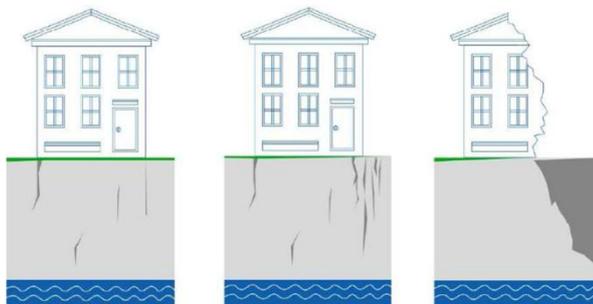


Figure 1.2 : Exemple d'un glissement terrain.

1.2.3 Affaissement

Le phénomène d'affaissement est défini par une grande diminution dans le volume du sol après mouillage avec ou sans chargement. Il concerne les structures des sols non saturés qui subissent un réarrangement radical de leurs particules.



Figure 1.3 : Zone touchée par un affaissement de terrain, commune d'Azazga (Tizi-Ouzou).

1.2.4 Gonflement

Le gonflement se traduit par une augmentation du volume du sol ou un accroissement des pressions régnant dans le milieu selon que le massif peut se déformer ou non.

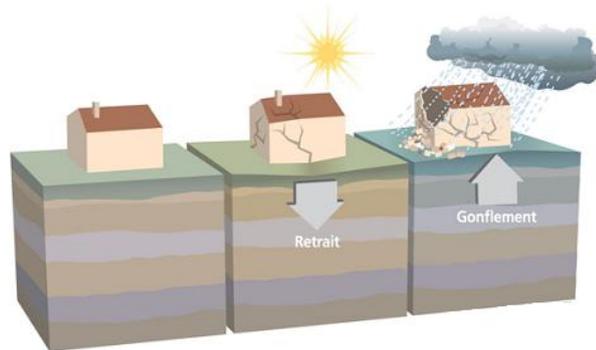


Figure 1.4: Retrait et gonflement des sols.

1.3 Type des sols à problèmes

Il existe deux types de sols à problèmes : les sols à problèmes chimiques et les sols à problèmes physiques.

1.3.1 Les sols à problèmes chimiques

Lorsque le problème dans le sol est dû à la quantité excessive de produits chimiques, il est alors appelé sol à problème chimique. Voir ci-dessous quelques types de sols à problèmes chimiques :

- Sol acide
- Sol salin
- Sol alcalin
- Sol sodique

1.3.1.1 Sol acide

L'acidité est mesurée sur une échelle de pH. Cette échelle va de 1 à 14 pH. Un (1) signifie super acide ; Le pH 7 signifie neutre et le pH 14 signifie super alcalin. Dans le cas du sol, le sol devient acide si sa valeur de pH est inférieure à 7. Le sol doit avoir un pH supérieur à 5,5 pour la couche supérieure et supérieur à 5 pour la sous-couche. Le sol acide (voir figure 1.5) n'est pas recommandé du point de vue construction car si le sol est plus acide, il peut provoquer la corrosion des différentes parties (éléments ferrailés) de la construction du bâtiment qui sont en contact avec le sol. Un sol principalement neutre est recommandé à des fins de construction car tout changement de pH peut affecter davantage l'ouvrabilité de la construction et l'utilisation du sol. La limite de retrait, la limite de plasticité et la limite de liquidité augmentent également si le sol est plus acide.



Figure 1.5 : L'effet de L'acidification sur le sol.

1.3.1.2 Sol salin

La quantité excessive de sels présents dans le sol lorsqu'il est mélangé avec de l'eau et se rend à la surface du sol, ce sol est connu comme sol salin. Le sol salin contient principalement du chlorure de sodium. Autres sels tels que le chlorure de magnésium ($MgCl_2$), chlorure de potassium (KCl), gypse ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$), sulfate de sodium ($NaSO_4 \cdot 2H_2O$), et sulfate de magnésium ($MgSO_4$) peut également être présent. Ce processus d'augmentation de la teneur en sel est appelé salinisation.

L'effet de la salinité est qu'elle diminue la teneur en eau du sol et le rend sec et rugueux. De plus, le poids unitaire du sol augmente avec l'augmentation de la salinité. De plus, le sol salin présente d'autres problèmes physiques tels qu'une compressibilité élevée, une faible capacité

portante et une plus grande expansion. Plus de sels peuvent augmenter la résistance au cisaillement non drainée du sol.

Le sol devient salin pour les raisons suivantes : La salinité est due au processus d'altération des minéraux et des roches ; le sol proche de la mer est principalement salin; le processus d'irrigation peut également rendre le sol salin. La figure 1. 6 présente un sol salin.



Figure 1.6 : L'effet du sel sur le sol salin.

1.3.1.3 Sol alcalin

Le sol est un sol alcalin si son pH est supérieur à 7. Les principaux composants présents dans le sol alcalin sont les carbonates de sodium et les bicarbonates de sodium. Le sol alcalin a moins de limite de retrait, limite de plasticité et limite de liquidité. Le poids unitaire des sols alcalins est inférieur au poids unitaire des sols acides. Les causes du sol alcalin sont: dégradation des roches de carbonates de sodium et de bicarbonates en raison des conditions météorologiques et présence naturelle de carbonates et bicarbonates de sodium dans le sol. La figure 1.7 présente un sol alcalin.



Figure 1. 7 : Sol alcalin.

1.3.1.4 Sol sodique

Ce sol a une concentration élevée de pourcentage de sodium échangeable présent, et moins de concentration d'autres sels. Le sodium est un cation positif. Il affaiblira les propriétés physiques du sol. Les cations affaiblissent la liaison entre les particules de sol et ils gonflent et se dispersent.

L'effet du sel de sodium est qu'il diminue la teneur en eau du sol et le rend sec et rugueux. Le sol sodique dégrade également la structure du sol et conduit ainsi à un problème physique appelé dispersion du sol. Le sol sodique peut également avoir une érosion éolienne et hydrique. Le sol sodique peut également faire gonfler le sol. Le sol devient salin pour les raisons suivantes: Le sol sodique peut être dû à l'augmentation du niveau des eaux souterraines qui contient du sodium. La plupart du temps, la source de sol sodique est naturelle. Le processus d'irrigation peut également rendre le sol sodique. Figure 1.8 Présente le sol sodique.



Figure 1.8 : Sol sodique.

1.3.2 Les sols a problèmes physiques

Lorsque le problème dans le sol est dû aux propriétés physiques du sol. Ce type de sol à problème est alors appelé sol à problème physique. Voir ci-dessous quelques types de sols à problèmes physiques :

1.3.2.1 Sols dispersifs

Les sols dispersifs ont une défaillance physique. Dans ce sol la surface se disperse et s'éloigne cela est dû à la faible liaison entre les particules du sol et de l'argile. Cette condition est due à un pourcentage de sodium échangeable plus élève dans le sol. Le sodium est un cation et il affaiblira la liaison entre les particules du sol. Les forces répulsives entre les particules du sol deviennent plus fortes que la force d'attraction. De ce fait, les particules du sol s'éloigneront autant que possible et se propagent et créeront ainsi des fissures à la surface du sol. Les effets des sols dispersifs sur le plan de la construction sont très importants. Sachant que le sodium est un cation positif, il augmentera les forces répulsives entre les particules et diminuera les forces d'attraction. A cet effet, il est déconseillé d'utiliser un sol dispersif pour la construction car il ne peut pas supporter complètement la charge et il subit une rupture et se tasse sous la charge. Figure 1.9 présente le sol dispersif.



Figure 1.9 : Les sols dispersifs.

1.3.2.2 Sols affaissables

Les sols affaissables sont ceux qui ont des structures ouvertes et métastables et deviennent instables sous certains chargements ou conditions environnementales, ils se trouvent en générale sous forme de dépôts. A l'état sec, une cimentation naturelle entre les grains leur confère une importante liaison inter-granulaire et peuvent supporter des charges très élevées. Cependant la saturation, même sans chargement supplémentaire, provoque la désintégration des liaisons donnant une structure plus dense suivie d'un effondrement soudain des particules du sol. Donc on peut dire que le sol à effondrement brusque est défini comme le sol qui sujet à une réduction importante et soudaine du volume lors du mouillage. Les dépôts de sols affaissables se partagent deux caractéristiques principales :

La construction des ouvrages de bâtiment sur les sols affaissables constitue un problème immense compte tenu des sinistres qu'ils causent aux ouvrages. Figure 1.10 présents exemples des sols affaissables.



Figure 1.10 : Présente exemple des sols affaissables.

La raison de cet effondrement est la structure des particules du sol. Ces sols ont un indice des vides et une faible densité. D'après la nature de sa structure et quand il est à l'état sec et supportera une grande charge sans aucun tassement. Cependant, lorsque le sol devient humide, Toutes les particules d'eau se déplaceront à l'intérieur des vides du sol et la structure en forme de bande se brisera, et les particules du sol se réorganiseront pour l'état de saturation du sol. C'est réarrangement de la structure du sol provoquera l'assèchement du sol a grande vitesse et ainsi, le sol s'effondrera.

L'effet de l'effondrement du sol est très négatif et il peut ou ne peut pas être utilisé pour la construction. Le choix du sol dépend du fait que la fondation du bâtiment sera exposée à l'humidité ou non. Sa propriété de réduction de volume sous contact avec l'eau peut provoquer un tassement soudain et un effondrement qui peut être fatal à toute sorte de construction par-dessus. Il doit être traite avant d'être utilise à des fins de construction afin qu'il puisse supporter la charge et ne réduira pas le volume sous l'humidité du bâtiment et des environs, causant ainsi une défaillance.

1.3.2.3 Sols expansifs (gonflants)

Le sol gonflant est considéré comme l'un des sols les plus problématiques et il endommage diverses structures de génie civil en raison de son potentiel de gonflement et de rétrécissement lorsqu'il entre en contact avec l'eau. Donc on peut dire que les sols gonflants posent des problèmes aux constructions sur tous les continents. L'échelle de la géotechnique est d'abord celle des ouvrages. Le gonflement des sols interfère avec toutes les constructions et ouvrages du génie civil : les fondations, profondes et superficielles, des bâtiments et ouvrages d'art, les ouvrages de soutènement, les remblais à usage routier ou ferroviaire.

Ce type de sol agit comme une éponge. Au fur et à mesure que le volume du sol augmente, il exercera une certaine pression sur le bâtiment sur tout matériau construit sur ce sol et peut provoquer des fissures sur celui-ci. Ce type de sol contient des minéraux argileux, comme la «Montmorillonite». Ce minéral a la capacité d'attirer les particules d'eau et de combler l'espace avec des particules d'eau et d'augmenter ainsi globalement le volume.

L'eau peut pénétrer dans le sol pendant une saison des pluies par les fissures à la surface du sol en raison du temps sec. Cette eau augmentera le volume du sol sous la fondation et le sol sous la fondation se dilatera et exercera une pression sur celle-ci qui peut entraîner le mouvement de la fondation et ainsi tout le bâtiment peut s'effondrer.



Figure1. 11 : Bâtiments endommagés par les mouvements des sols argileux expansifs.

Western desert, Egypt, [1].

1.3.2.4 Sol liquéfiable

La liquéfaction des sols est un problème sérieux capable de causer des dégâts souvent irréparables, tant à des ouvrages existants qu'à de nouvelles constructions, ainsi la liquéfaction peut provoquer : - Le basculement d'immeuble.

- la rupture des barrages (remblais hydraulique)
- la rupture des culées des ponts
- le tassement des dépôts de sable, le déplacement latéral du terrain - etc.....

La liquéfaction se produit dans les sols pulvérulents saturés d'eau ; la présence d'eau provoque une pression interstitielle sur les particules de sol, ce qui fait la diminution des contraintes effectives régnant dans le sol et donc une diminution de sa résistance au cisaillement qui, à l'état ultime, peut devenir nulle.

Avant un séisme, la pression de l'eau est relativement basse. Cependant, les secousses d'un séisme peuvent causer une augmentation considérable de la pression d'eau interstitielle jusqu'au point où les particules de sol peuvent facilement se déplacer l'une par rapport à l'autre. Figure 12 Présente immeubles partiellement enfouis et ayant bascule à la faveur d'une liquéfaction du sol lors du séisme de 1964 à Niigata, au Japon.



Figure 1.12 : Immeubles partiellement enfouis et ayant bascule à la faveur d'une Liquéfaction du sol lors du séisme de 1964 à Niigata, au Japon.

1.3.2.5 Sol sableux

Ce type de sol contient de très grosses particules et un minimum ou pas d'argile. Ce type de sol est granuleux. Dans sa composition, il contient près de 70% de sable, 30% de limon et d'argile. Comme le sol sableux a des particules granulaires et que les particules ont une plus grande taille, elles n'effectuent pas le compactage requis par l'argile et le limon dans le sol. C'est pourquoi les sols sableux ne sont pas recommandés pour la construction. Cependant, ils peuvent être utilisés lorsqu'il n'y a pas d'autre sol disponible. Figure 13 présente des exemples du type de sol sableux.



Figure 1.13 : Type de sol sableux.

1.3.2.6 Sol sensible au gel

Ce type de problème de sol est courant pendant les saisons de congélation froide. Lorsque l'humidité de l'eau gèle dans le sol, son volume augmentera de 9% et créera ainsi une pression dans la couche de sol environnante en raison d'une plus grande couverture d'espace. Cela déplacera le sol et, par conséquent, la couche de sol se déplacera et toute la construction du bâtiment aura des fissures à la surface en raison du mouvement de la couche de sol. Cependant, lorsque l'eau se décongèle, les particules de sol se réorganisent et reviennent à leur position initiale mais les fissures restent les mêmes. Figure 1. 14 présente des fissures sur la chaussée dues au soulèvement dû au gel.



Figure 1.14 : Type de sol sensible au gel.

1.3.2.7 Sols tourbeux

Les sols tourbeux sont gorgés d'eau (90 %) et riches en matière organique (10%). Ils se trouvent là où l'eau circule peu et où la matière organique s'accumule mais aussi et surtout dans les tourbières. Figure 1.15 présente un exemple des sols tourbeux.



Figure 1.15 : Type de sol tourbeux.

2.1 Introduction

En génie civil, les phénomènes de retrait-gonflement de certains sols argileux et des formations géologiques argileuses induisent des tassements différentiels qui se manifestent par des désordres affectant principalement les structures construites en surface (bâtiment, fondation superficielle, ouvrage de soutènement, remblais,...) et les ouvrages enterrés (tunnels, pieux, canalisation, fondation profondes,...).

Cet aléa ne concerne que certains sols argileux particulièrement en présence de minéraux gonflants. Les sables et les limons sableux présentent également des cycles de retrait et de gonflement suivant les fluctuations de leur teneur en eau, mais d'une amplitude bien plus petite.

Les sols susceptibles de gonfler sont pour l'essentiel des argiles. Les argiles plastiques appelées sols expansifs ou sols actifs présentent un changement de volume lorsqu'elles sont soumises à variations d'humidité. Les sols expansifs sont des sols qui subissent des changements de volume importants associés à des changements de teneur en eau. Ces changements de volume peuvent être sous forme de gonflement ou sous forme de retrait et c'est pourquoi ils sont parfois appelés sols gonflés / rétrécis.

Les ingénieurs géotechniciens n'ont pas reconnu les dommages associés aux constructions sur des sols expansifs jusqu'à la fin des années 1930. Le Bureau américain de la remise en état a fait la première observation enregistrée sur soulèvement du sol en 1938 (Chen, F. H., 1988). Depuis ce moment un certain nombre de chercheurs ont lancé des recherches sur les sols expansifs.

Sols expansifs, appelés sols gonflants ou sols réactifs, composés principalement de pourcentage élevé de particules d'argile à grains fins. Des argiles très plastiques sont également définies comme d'argiles à grains fins avec un indice de plasticité supérieur à 35% (Holtz et Kovacs, 1981).

Les sols argileux sont reconnus comme des sols sensibles aux variations hydriques subies au cours des cycles saisonniers, pouvant engendrer des désordres importants sur les constructions à travers le monde. Ce phénomène de retrait-gonflement ne s'applique qu'aux

sols argileux, mais l'amplitude du phénomène dépend de la nature minéralogique, chimique et mécanique des constituants d'un sol argileux.

Le problème des sols expansifs sur les cinq continents résulte d'un large éventail de facteurs ;

- (1) retrait et gonflement des sols argileux résultant du changement d'humidité
- (2) type de taille de l'argile particules
- (3) drainage - élévation des eaux souterraines ou mauvais drainage de surface
- (4) compression des couches de sol résultant de l'application de la charge. D'autres facteurs comprennent
- (5) la pression du sol de remblayage,
- (6) l'adoucissement du sol
- (7) les conditions météorologiques
- (8) la végétation
- (9) le degré de vieillissement (Chen, F.H, 1988, Lucian,C, 1996 et Day, R.W, 1999).

Tous ces éléments doivent être pris en compte pour aboutir au choix des critères de conception appropriés pour une sélection minutieuse du type de fondation, du type de structure et du type de matériaux de construction appropriés. Avec une bonne connaissance des indicateurs ci-dessus, le potentiel de dommages structurels peut être considérablement minimisé ou évité.

La formation argileuse est connue pour sa sensibilité aux variations de la teneur en l'eau, c'est la raison pour laquelle le phénomène de gonflement se manifeste dans les régions à climat aride et semi-aride.

- Les sols gonflants sont des sols qui se dilatent (gonflent) lorsque de l'eau est ajoutée et rétrécissent lorsqu'ils s'assèchent.
- Le sol gonflant a une résistance considérable à l'état sec, mais la résistance continue de diminuer lors de l'absorption de l'eau.
- Le sol exerce une pression considérable sur les fondations lors du gonflement.
- Les sols gonflants contiennent des minéraux tels que la Montmorionite, l'Illite, les argiles de kaolinite qui sont capables d'absorber l'eau.

Le phénomène de gonflement dépend des caractéristiques minéralogiques du matériau argileux et de la nature de la solution d'hydratation. C'est pourquoi une description microscopique du phénomène est cruciale afin de bien comprendre le développement du gonflement.

L'argile gonflante est un sol argileux qui est sujet à de grands changements de volume (gonflement et rétrécissement) qui sont directement liés aux changements de la teneur en eau.

Les sols gonflants sont des argiles qui ont tendance à gonfler et à adoucir lorsque leur teneur en eau augmente, ou rétrécir et fissurer à sec lorsque leur teneur en humidité diminue.

Les essais en laboratoire se sont concentrés sur la détermination des limites d'Atterberg (propriétés des indices largement utilisées des sols), l'analyse granulométrique, l'essai de gonflement et l'essai de diffraction des rayons X (XRD) afin d'identifier les argiles expansives.

Les sols expansifs existent partout dans le monde et causent des dommages aux fondations et structures (Kariuki, P. C., 2004). Il a été établi que les argiles expansives causent des milliards de dollars de dommages chaque année aux États-Unis, plus que tous les autres risques naturels combinés (Jones et Holtz, 1973, Chen F. H., 1988 et Day, R. W., 1999).

2.2 Phénomène des sols gonflants

Le sol gonflant est considéré comme l'un des sols les plus problématiques et il endommage diverses structures de génie civil en raison de son potentiel de gonflement et de rétrécissement lorsqu'il entre en contact avec l'eau.

Les argiles gonflantes se trouvent dans le monde entier dans les régions arides et semi-arides (Al-Rawas et al., 2006). Le tassement ou le soulèvement de l'argile gonflante se produit avec l'insertion ou l'extraction de l'eau (Navarro et al., 2009). En conséquence, l'infrastructure construite sur ou dans ces argiles est connue pour une rupture structurelle et / ou une déformation de manière inacceptable, entraînant un coût annuel combiné de 30 milliards de dollars pour les États-Unis et la Chine en travaux de rectification (Li et al., 2014).

2.3 Méthode de gonflement libre

Dans l'essai de gonflement libre, l'échantillon est soumis à une faible pression, correspondant au poids du piston et de la pierre poreuse, et il est laissé en contact avec de l'eau. Une fois le phénomène de gonflement stabilisé, l'échantillon quasi-saturé suit un chemin de chargement par paliers avec stabilisation des déformations sous chaque palier. La pression de gonflement correspond à la charge qu'il est nécessaire d'appliquer pour ramener le volume de l'échantillon à sa valeur initiale. Cette méthode peut se faire dans un œdomètre ou un appareil triaxial (Figure 2.1).

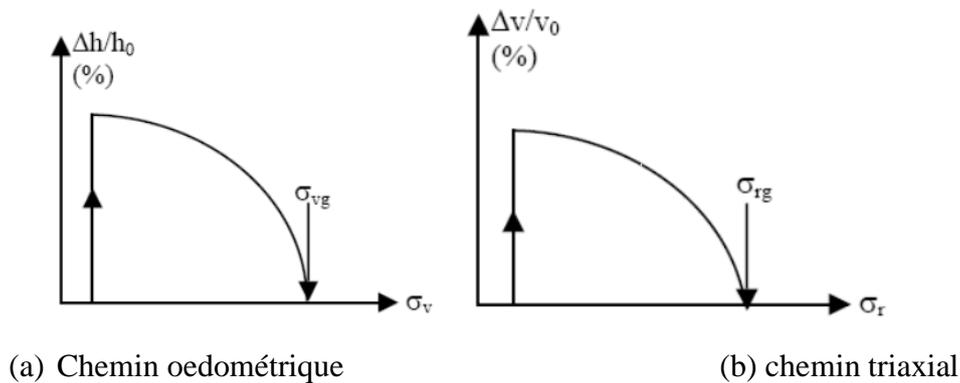


Figure 2.1 : Méthode de gonflement libre à l'appareil œdométrique et triaxial (Cuisinier, 2002)

La pression de gonflement (σ_g) d'un élément de sol, dont l'état physique initial est connu, peut être définie comme l'état de contrainte à exercer pour maintenir son volume constant pendant l'imbibition sans distorsion jusqu'à sa saturation complète. Donc la pression de gonflement (σ_g) est définie comme la pression verticale nécessaire pour décompresser un échantillon de sol complètement gonflé à son indice de vide initial (e_0).

Le potentiel de gonflement (ε_g) d'un élément de sol, dont l'état physique initial est connu, est la déformation maximale ($\Delta h/h$) que provoque l'imbibition de cet élément soumis à un état de contrainte nulle ou quasi-nulle jusqu'à sa saturation complète. Donc le potentiel de gonflement (ε_g %) d'un échantillon a été déterminé comme le rapport de l'augmentation d'épaisseur (ΔH) à l'original épaisseur (H) exprimée en pourcentage, comme indiqué ci-dessous : $\varepsilon_g = (\Delta H/H) \times 100$

L'indice de gonflement (C_g) traduit l'importance de la déformation de gonflement induit par un déchargement par rapport à un état de contraintes donné.

Une éprouvette est insérée dans une cellule œdométrique classique, puis soumise à la charge du piston et enfin saturée. Ses déformations verticales sont mesurées, la déformation maximale rapportée à la hauteur initiale est le potentiel de gonflement. L'éprouvette est ensuite chargée de manière progressive. La pression verticale nécessaire pour ramener l'éprouvette à sa hauteur initiale est la pression de gonflement (ASTM - méthode A).

De nombreux modèles visant à estimer le potentiel de gonflement sont formulées à partir des limites d'Atterberg et de paramètres qui en découlent. Les tableaux 1 et 2 donnent quelques exemples de ces estimations.

Tableau 2.1. Relation entre le potentiel de gonflement et la limite de retrait (Altmeyer, 1955)

ω_R (%)	< 10	10-12	> 12
potentiel de gonflement	fort	critique	faible

Tableau 2.2. Relation entre le potentiel de gonflement et l'indice de plasticité (Seed et al., 1962)

I_P (%)	0-10	10-20	20-35
taux de gonflement	faible	moyen	élevé

De nombreux critères sont disponibles pour identifier et caractériser les sols gonflants, tels que la limite de liquidité (Tableau 2.3), indice de plasticité (Tableau 4).

Table 2. 3. Prédiction de l'expansivité du sol par limite de liquidité.

degré d'expansion	ω_L (%)	
	Chen	IS 1498
Faible	< 30	20-35
moyen	30-40	35-50
haut	40-60	50-70
Plus haut	> 60	70-90

Table 2.4. Prédiction de l'expansivité du sol par l'indice de plasticité.

degré d'expansion	I _p (%)		
	Holtz et Gibbs	Chen	IS 1498
Faible	< 200	0-15	< 12
moyen	12-34	10-35	12-23
Elevé	23-45	20-35	23-32
Plus Elevé	> 32	> 35	> 35

Tableau 2.5 présente la prédiction de l'expansivité du sol par l'indice de plasticité modifiée (BRE, 1993).

Tableau 2.5. Prédiction de l'expansivité du sol par l'indice de plasticité modifiée (BRE,1993).

Degré d'expansion	I _p ' (%)
Faible	< 20
moyen	20-40
Elevé	40-60
Plus Elevé	> 60

Où,

$$I_p' = I_p \times (\% < 425 \mu\text{m}) / 100$$

Tableau 2.6 présente le Potentiel de gonflement (BRE, 1980) en fonction de l'indice de plasticité et le pourcentage des grains d'argiles inférieures à 2µm.

Tableau 2.6. Potentiel de gonflement (BRE, 1980).

I _p (%)	(%)< 2µm	Potentiel de gonflement
> 35	> 95	Très fort
22-35	60-95	Fort
18-22	30-60	Modéré
< 18	< 30	Faible

Tableau 2.7 présentes le Potentiel de gonflement (Ghen, 1988) en fonction de la limite de liquidité et le pourcentage des grains inférieurs à 74µm.

Tableau 2.7. Potentiel de gonflement (Ghen, 1988).

(%) < 74µm	ω _L (%)	Potentiel de gonflement
> 95	> 60	Très fort
60-95	40-60	Fort
30-60	30-40	Modéré
< 30	< 30	Faible

Certains auteurs pensent que trois paramètres sont nécessaires pour évaluer le gonflement. La classification de Holtz & Gibbs (1956) relie le potentiel de gonflement en fonction de la fraction argileuse, de l'indice de plasticité et de la limite de retrait (Tableau 2.8).

Tableau 2.8. Potentiel de retrait (Holtz & Gibbs, 1956).

(%) < 2µm	I _p (%)	ω _R (%)	Pourcentage de retrait	Potentiel de retrait
> 28	> 35	< 10	> 60	Très élevé
20-13	25-40	7-10	20-30	Élevé
13-23	15-30	10-15	10-30	Modéré

La classification de Holtz & Dakshhanmurthy (1973) (cité par Djdid & Bekkouche 2001) utilise l'indice de plasticité, la limite de liquidité et la limite de retrait (Tableau 2.9).

Tableau 2.9. Potentiel de gonflement (Holtz & Dakshhanmurthy, 1973).

Potentiel de gonflement	I _p (%)	ω _R (%)	ω _L (%)
Faible	< 18	> 15	20-35
Modéré	15-25	10-15	35-50
Fort	25-35	7-12	50-70

3.1 Introduction

Récemment, en raison de l'augmentation de la population et de l'augmentation consécutive de l'urbanisation, la construction sur des sols gonflants est inévitable. Il est donc nécessaire d'utiliser certaines techniques afin d'atténuer les dommages causés par le gonflement des sols.

Il est donc nécessaire d'utiliser certaines techniques afin d'atténuer les dommages causés par le gonflement des sols. Les options de traitement appropriées avant et après la construction des ouvrages d'art dépendent des conditions environnementales et du sol, et du degré de risque que le propriétaire est prêt à assumer (Nelson et Miller, 1992).

Les méthodes d'amélioration des sols gonflants sont l'un des outils dont dispose l'ingénieur pour résoudre les problèmes de stabilité ou de déformations qu'il rencontre lors de l'élaboration d'un projet. De nombreuses techniques ont été développées par les ingénieurs géotechniciens au cours du 20ème siècle. Elles permettent l'amélioration des caractéristiques géotechniques et les propriétés mécaniques des sols, et, sont jugées efficaces.

Les techniques d'amélioration des sols consistent à modifier les caractéristiques d'un sol par une action physique (vibrations par exemple) ou par l'inclusion dans le sol ou le mélange au sol d'un matériau plus résistant, dans le but d'augmenter la capacité portante et/ou la résistance au cisaillement et diminuer ou éliminer le risque de liquéfaction en cas de tremblement de terre ou de vibrations importantes

3.2 But de la stabilisation

Il existe trois objectifs qui assurent le but de la stabilisation et qui permettent aussi d'améliorer la résistance mécanique et de diminuer la sensibilité à l'eau :

- Réduire le volume des vides entre les particules solides (augmenter la compacité);
- Diminuer les vides
- Créer des liens et améliorer les liaisons existantes entre particules (résistance mécanique).

Ces trois objectifs permettent d'améliorer la résistance mécanique, et de diminuer la sensibilité à l'eau.

3.3 Méthodes d'amélioration des sols gonflants

Parmi les techniques de stabilisation les plus couramment utilisées, on distingue : (BABOURI ,2008)

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

3.3.1 Stabilisation mécanique

3.3.1.1 Application de fortes pressions

Le gonflement peut être évité en appliquant au sol des pressions supérieures à la pression de gonflement. Il s'agit de pression de gonflement réelle, c'est-à-dire correspondant à la pression limite minimum nécessaire pour empêcher le sol de gonfler par des chemins de contraintes réelles, in situ, cette pression peut être appliquée soit par l'édifice lui-même, soit par des surcharges qui sont généralement des remblais des sols non gonflants (MOUROUX, 1969).

3.3.1.2 Compactage dynamique

Le compactage de surface peut être utilisé pour une profondeur maximale de 3m. Au-delà de cette profondeur un autre type de compactage existe connu sous le nom de compactage dynamique profond (voir figure 1). C'est un procédé qui consiste à pilonner le sol en surface avec une dame en chute libre. L'énergie transmise par chaque impact pénètre dans le sol et produit une déstructuration. Au bout de quelques jours ou semaines, une restructuration s'opère qui aboutit à des caractéristiques de portance améliorées



Figure 3.1 : Chantier d'un compactage dynamique profond.

3.3.1.3 Stabilisation par substitution

C'est la suppression de la couche du sol 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 remblayer avec des sable, ou autres matériaux graveleux. C'est une solution très coûteuse.

Parfois on recourt à la substitution, soit par ajout d'un sol de bonne qualité après décapage du sol existant, soit par reconstitution du sol existant avec un autre sol de qualité meilleure. Dans les deux cas un compactage poussé doit être appliqué. Cette technique a été appliquée avec succès en Algérie dans un projet d'une station de Carburant à Hassi Ramel, (rapports technique 1990). Elle requiert des moyens logistiques et la disponibilité du sol de substitution dans une zone bien proche pour diminuer les coûts. A défaut, on pourrait utiliser le même sol excavé puis remis en place après traitement avec du ciment tout en diminuant la quantité d'eau et l'énergie de compactage suivant les proportions suggérées par Ayadat et Gherabli (1995).

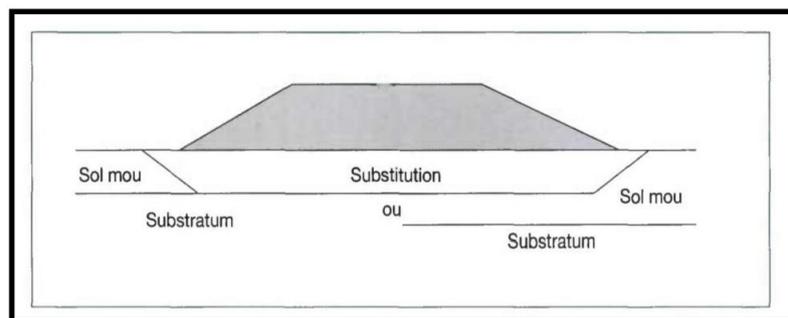


Figure 3.2 : Substitution du mauvais sol. (J.P Magnan, 2000).

3.3.1.4 Stabilisation par drainage

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

3.3.1.5 Stabilisation Pré-humidification

C'est d'augmenter la teneur en eau du sol jusqu'à la saturation. Pour cela deux techniques sont utilisées :

- Simple arrosage par jet.
- Création de bassin au-dessus du sol gonflant.

3.3.1.6 Stabilisation par ajout de sable

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

Komornit et Livnet (1969) cité par Gueddouda (2005), ont réalisé des mélanges d'argiles traités par l'ajout de sable à différents pourcentages. Ils ont montrés que l'ajout de sable augmente la densité sèche maximale et diminue la teneur en eau optimale pour des pourcentages allant de 10 à 30% de sable.

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

Suratman (1985), cité par Azouz (2006) a étudié la variation du gonflement d'un mélange de montmorillonite et de sable à différents pourcentages (10% à 50%); le sable étant de granulométrie moyenne ($0.1\text{mm} < D < 0.5\text{ mm}$). Il a constaté une réduction du gonflement libre de 50% pour 30% de sable et une réduction de 70% pour 50% de sable.

Bengraa. (2004) a menés des recherches sur des argiles gonflantes de la région d'Oran, par addition de trois types de sables (sable carrière, sable de rivière et sable de plage) à des différents pourcentages variant de 10% à 40%. Elle a montré que plus le pourcentage de sable est augmenté plus le taux et la pression de gonflement diminuent.

3.3.1.7 Stabilisation par pré chargement

Le pré-chargement est une méthode d'amélioration des sols compressibles d'usage très courant en pratique. Lorsqu'il s'agit de construire sur un sol saturé de faible portance et (ou) relativement compressible le pré-chargement (généralement fait par un remblai) est la technique la plus simple qui permet d'assurer une amélioration de la résistance au cisaillement à court terme. Le pré-chargement par étapes, lorsqu'il s'agit d'édifier des remblais de grande hauteur (> 6m) sur une argile molle très compressible, le chargement doit être fait par étapes pour éviter de provoquer la rupture par poinçonnement du sol.

Toutefois l'inconvénient majeur du pré-chargement, sans tenir compte du coût d'exécution demeure la durée qu'il nécessite pour atteindre l'amélioration escomptée. Outre la durée du pré-chargement, le temps d'exécution du remblai de pré-chargement et la durée que nécessite sa suppression (à la fin de la durée fixée) ne permet d'envisager le début des travaux qu'après un temps de consolidation non négligeable (six mois au minimum) qui est parfois même comparable à celui de l'exécution de l'ouvrage.

Le pré-chargement dure quelques mois pendant lesquels le processus de consolidation primaire (le sol étant saturé) s'amorce mais sans atteindre un degré de consolidation, (U), relativement élevé (supérieur à 50%). Deux conséquences en résultent :

- Le prélèvement d'échantillons du sol avant et après pré-chargement sur lesquels on réalise un essai de cisaillement non consolidé non drainé conduit à l'amélioration réelle de l'augmentation de la cohésion non drainée.

- La réduction du tassement du sol sous l'action du pré-chargement, ce qui permet d'atteindre plus facilement la valeur requise du tassement admissible de l'ouvrage ou, autrement, d'avoir un tassement résiduel plus faible lors de la mise en service de l'ouvrage.

Pour cette raison l'idée d'accélérer la consolidation du sol compressible s'est avérée primordiale en vue de débiter la construction de l'ouvrage dans un délai relativement court, chose qui a contribué à l'usage des drains verticaux.

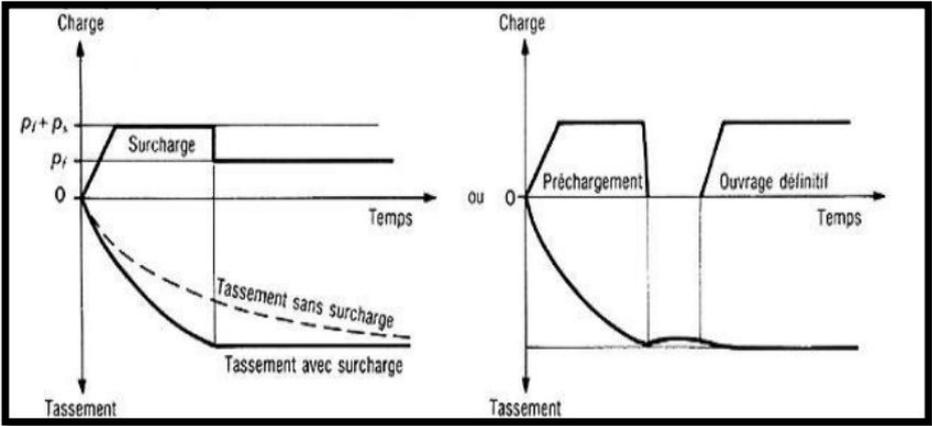


Figure 3.3: Principe de traitement par pré chargement.

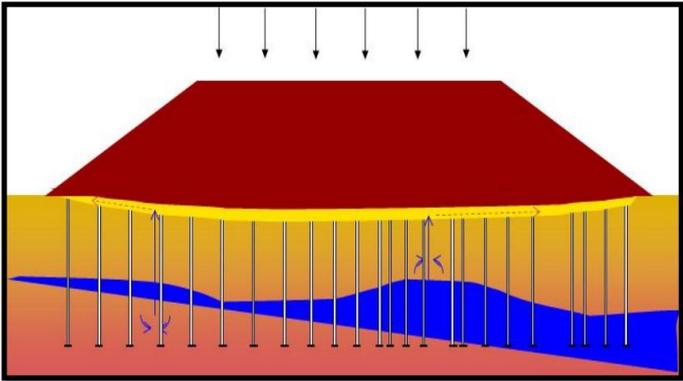


Figure 3.4: Pré chargement pour drains verticaux.

3.3.1.8 Stabilisation par colonne ballastée

Les colonnes ballastées, au sens le plus large de terme, ont été élaborées afin de permettre l'amélioration des sols de mauvaises qualités géotechniques. Le fait d'incorporer et de compacter un matériau ayant des caractéristiques géotechniques supérieures au sol en place entraine un renforcement de ce dernier.

Les différentes méthodes d'amélioration répondent à des contraintes techniques liées aux caractéristiques géotechniques des sols en place. Les objectifs généraux qui sont attendus d'une amélioration sont attendus d'une amélioration de sols par inclusions souples sont:

- l'augmentation de la capacité portante du sol.
- l'augmentation de sa résistance au cisaillement.
- l'obtention d'un drainage radial efficace assurant la consolidation.

Les colonnes ballastées sont des colonnes constituées de matériaux granulaires, sans cohésion, mis en place par refoulement dans le sol et compactés par passes successives.

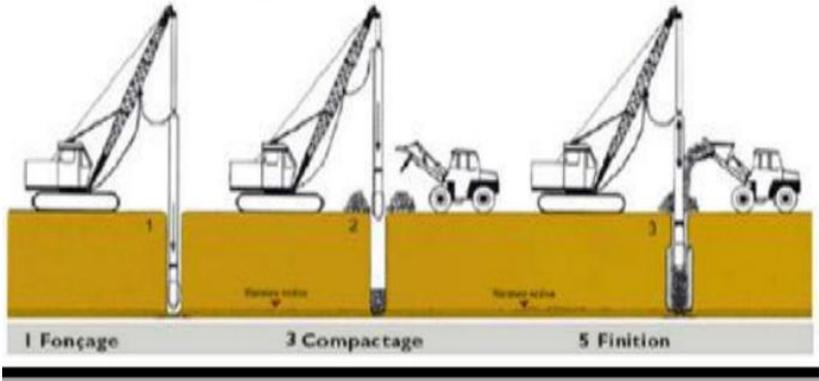


Figure 3.5 : Mise en œuvre des colonnes ballastées.

3.3.1.9 Stabilisation par accélération de la consolidation par l’installation des drains verticaux

Les drains verticaux peuvent donc être utilisés dans beaucoup de cas pour accélérer le taux du tassement de la consolidation primaire à l’intérieur de la zone pré-chargée avec ou sans la surcharge ajoutée. Ce procédé est inefficace dans les sols tels que les argiles très organiques et les tourbes où leur comportement de tassement est beaucoup plus dominé par la compression secondaire. Les drains verticaux permettent donc au drainage de s’effectuer horizontalement et verticalement (voir Figure 6).



Figure 3.6: Principe Installation des drains.

Durant les années 1980, les drains verticaux sont constitués généralement de sable réalisés par différents procédés tels que le battage et le vibro-fonçage. A partir des années 1980, une

nouvelle génération de drains qui sont les drains préfabriqués en forme de bande a fait son apparition. La part de ces drains a augmenté de façon très rapide.

3.3.2 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 due au gradient thermique appliqué.

3.3.2.1 Déshydratation

La déshydratation par la chaleur est très rarement appliquée en géotechnique, elle permet de durcir certaines argiles par exemple. En pratique, la méthode consiste à brûler un carburant dans un forage en utilisant un forage voisin communiquant avec le premier et servant de cheminée de tirage.

3.3.2.2 Congélation

La congélation des terrains instables est un procédé ancien à caractère provisoire, employé pour le creusement des fouilles de puits ou de galeries. Cette technique rend le sol étanche et résistant provisoirement. Ce procédé peut être appliqué aux argiles molles et aux limons. La congélation de l'eau interstitielle d'un sol produit un matériau dont les propriétés sont temporairement améliorées tant que la congélation est entretenue.

La congélation a également pour effet de rendre imperméable le sol et de faciliter les travaux de terrassements ou de construction sous le niveau de la nappe. Ces propriétés en font une technique d'amélioration provisoire très efficace, mais dont l'emploi reste limité en raison de son coût élevé. Les techniques de congélation utilisées sont basées sur la circulation d'un fluide froid dans des tubes enfoncés dans le massif de sol. Une saturation complète du sol est souhaitée. La congélation du sol s'effectue d'habitude en deux étapes à savoir les étapes active et passive de congélation. L'étape active est la plus importante et l'appareillage de réfrigération marche avec sa grande capacité que durant l'étape passive nécessaire pour maintenir l'épaisseur du front de gel contre le dégel.

3.3.3 Stabilisation chimique, (par additifs).

La stabilisation chimique est une technique intéressante pour améliorer les propriétés physiques et mécaniques des sols argileux. Aujourd'hui les divers produits et techniques font partie d'une pratique courante des grands ouvrages du Génie Civil à l'échelle mondiale.

Le recours massif à cette technique qui valorise les matériaux en place ce qui entraîne une diminution notable des coûts est due principalement aux facteurs suivants tels que la raréfaction des gisements naturels de matériaux nobles ; le souci écologique croissant imposant de préserver d'une part les ressources naturelles existantes et de limiter d'autre part la mise en dépôt des matériaux impropres à la réutilisation en remblais ou en couches de forme. Les ajouts cimentaires et les produits chimiques les plus utilisés sont le ciment, la chaux, les cendres volantes, L'objectif principal du malaxage des ajouts cimentaires avec le sol est l'amélioration de ses propriétés physico-mécaniques ainsi que sa durabilité.

Les différentes propriétés qui peuvent être améliorées sont la résistance, la plasticité, la compressibilité, la perméabilité, le potentiel de gonflement et le potentiel d'effondrement. L'amélioration de ces propriétés s'effectue soit par l'augmentation de certaines d'entre elles telle que la résistance, soit par la réduction d'autres telles que la plasticité, la perméabilité et l'érosion. Un bon malaxage des ajouts cimentaires avec le sol à traiter est un facteur important affectant d'une façon significative la qualité des résultats.

3.3.3.1 Stabilisation par la chaux

Le traitement à la chaux est une technique bien connue pour améliorer les propriétés mécaniques des sols argileux dans le génie civil (construction de routes, construction ferroviaire et aéroport) en ajoutant une petite quantité de chaux dans le sol. De nombreuses études montrent que le traitement à la chaux peut modifier significativement les propriétés physiques et hydromécaniques des sols compactés comme la réduction de potentiel du gonflement, l'augmentation de la résistance au cisaillement, l'augmentation du module d'élasticité et la modification des propriétés de compactage.

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

- D'éviter des volumes de terrassement importants dans le cas de substitution des sols médiocres.

- De donner aux sols argileux d'une manière assez rapide une bonne consistance pour des dosages compris entre 1% et 2%. Ceci montre aussi l'intérêt économique de ce procédé.
- De modifier les propriétés du sol.
- Sachant qu'il y a deux types de chaux, vive et éteinte, le choix s'effectue en basant sur les essais de laboratoire, les essais de chantier et sur le prix de revient. Généralement, c'est la chaux vive qui est préférée car elle fournit plus d'ions de Ca^{2+} , elle donne un produit plus dense et un abaissement de la teneur en eau important (BEKKOUCHE et al, 2001).

Il est clair que c'est la phase argileuse du sol qui réagit avec la chaux. La qualité du résultat dépend des engins utilisés dans le traitement. L'expérience a montré que suite à un traitement, certaines modifications se produisent sur les caractéristiques du sol :

- Diminution de la teneur en eau du mélange de 0.6% à 0.8% pour 1% de chaux (BEKKOUCHE et al, 2001). Additivement à l'échange de cations Na^+ et K^+ par Ca^{2+} et la floculation des particules argileuses provoquée par les forces électriques, les limites de consistance changent.

L'ajout de chaux, en réduisant la plasticité des sols par une augmentation immédiate de la limite de plasticité et une diminution de la limite de liquidité, produit des structures maniables et faciles à compacter. La quantité optimale pour avoir ces changements est appelée point de fixation de la chaux. Au-delà de ce point, des processus de formation de divers ciments se produisent augmentant la résistance du sol.

La figure 7 montre que les phénomènes combinés de la diminution de la teneur en eau naturelle du sol traité et de la diminution de l'indice de plasticité peuvent faire passer un sol de l'état plastique déformable, collant -donc difficilement compactable) à l'état sec (rigide, frottant, friable – donc beaucoup plus facile à travailler).

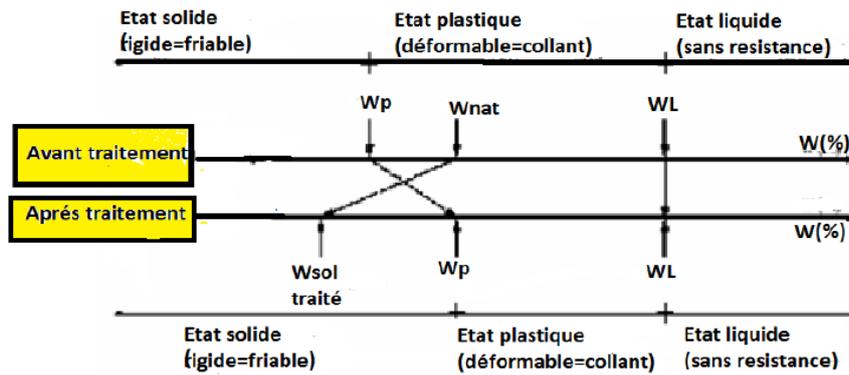


Figure 3.7 : Variation d'indice de plasticité en ajout de la chaux Bulletin CRR, cité par Azzouz ,2006.

Le traitement à la chaux réduit donc la valeur maximale de la masse volumique apparente sèche et augmente la valeur de la teneur en eau permettant de l'obtenir. La figure 7 montre que la courbe Proctor d'un sol traité est déplacée vers la droite et vers le bas par rapport à la courbe du sol naturel. Ce déplacement est d'autant plus marqué que le sol réagit bien avec la chaux.

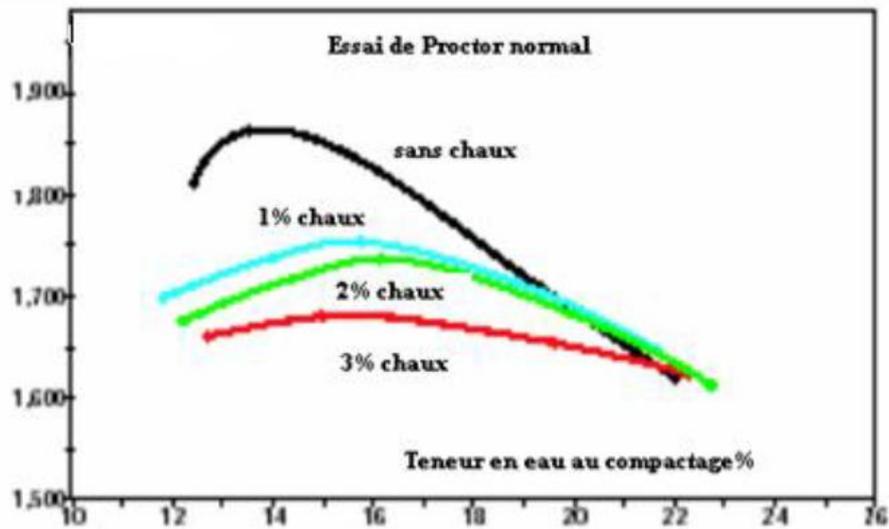


Figure 3.8 : Influence de la chaux sur les caractéristiques de compactage. Bulletin CRR, Cité par Azzouz, 2006.

De nombreuses études ont montré que la stabilisation des sols argileux par la chaux transforme ces derniers en sols fermes et améliore leur résistance, leur perméabilité et stabilise leurs volume après gonflement et retrait. Les mécanismes responsables de ces changements se résument selon un grand nombre d'auteurs est :

- Échange cationique
- Floculation et agglomération des particules d'argiles
- Carbonatation de la chaux
- Réaction pouzzolanique

3.3.3.2 Stabilisation par l'utilisation du ciment

Le ciment Portland est un autre produit envisageable pour la stabilisation de certaines catégories de sols utilisés pour les routes et les revêtements de pistes d'aéroports. Alors qu'il existe plusieurs similarités entre la chaux et le ciment Portland comme stabilisants, le ciment Portland fournit en plus la chaux et la source de silice.

Lorsque le ciment Portland est mélangé à l'eau, l'initiation de l'hydratation occasionne une augmentation rapide de la concentration de calcium dans le sol. A mesure que les ions de calcium sont libérés, ils deviennent disponibles pour stabiliser l'argile. La figure 8 ci-dessous montre un chantier de traitement du sol au ciment.



Figure 3.9: Chantier de traitement du sol au ciment.

Comme indiqué ci-dessus, le processus de stabilisation initié par l'ajout du ciment Portland à l'argile engendre quatre étapes distinctes à savoir l'échange cationique, la floculation et l'agglomération de l'argile, l'hydratation par cimentation et les réactions pouzzolaniques.

Le ciment Portland possède donc des propriétés lui permettant d'initier une étape de plus que la chaux soit celle de l'hydratation par cimentation. Les sols possédant un faible pourcentage d'argile, donc moins de silice et d'alumine ont besoin d'un apport de ciment si les réactions pouzzolaniques sont désirées. Par conséquent, le ciment Portland peut généralement être utilisé dans les mêmes types de sols que la chaux.

3.3.3.3 Stabilisations par l'utilisation des ajouts cimentaires

Parmi les ajouts cimentaires les plus utilisés il y'a les cendres volantes, le laitier, la fumée de silice, les cendres volcaniques et le calcaire. Les coûts élevés de la chaux et du ciment ont poussé les chercheurs à trouver d'autres types de liants dans le but d'améliorer les sols instables à faible coût tout en respectant l'environnement. Les cendres volantes sont intimement liées quant à leur processus de stabilisation. Elles sont souvent utilisées conjointement avec la chaux dans les travaux de stabilisation. Deux types de cendres volantes sont produits par la combustion du charbon à savoir la cendre volante et la cendre basse. Les cendres basses relativement grossières se récupèrent en bas de la fournaise tandis que les cendres volantes sont séparées des gaz d'échappement par un dépoussiéreur électrostatique. Les cendres volantes ont une composition très semblable à celle du ciment.

Comme les cendres volcaniques, elle présentent des propriétés pouzzolaniques car elles fixent lentement la chaux présente dans le mélange pour donner naissance à des composés stables ayant des propriétés hydrauliques. Elles peuvent être siliceuses ou calciques. Selon leur teneur en chaux libre, les cendres volantes se comportent différemment en présence d'eau. Il existe deux classes de cendre volante à savoir la cendre silico-alumineuse (classe F) et la cendre sulfo-calcique (classe C). Le tableau 1 indique la composition chimique des deux classes en comparaison avec le ciment Portland (Lav et kenney. 1997).

Tableau3.1 : Composition chimique des deux classes (F et C) en comparaison avec le ciment Portland.

Composés Chimiques	Classe F Silico-alumineuse (%)	Classe C Sulfo-calcique (%)	Ciment Portland (%)
SiO ₂	55	29	23
Al ₂ O ₃	26	13	4
Fe ₂ O ₃	7	9	4
CaO (chaux)	9	41	65
MgO	2	1	2
SO ₂	1	7	2

3.3.3.4 Stabilisations par les fibres de plastique :

La bouteille plastique d'eau est la plus forte croissance de l'industrie des boissons dans le monde. Au cours de la dernière décennie 1,5 millions de tonnes de plastique sont utilisées pour la mise en bouteille de l'eau chaque année.

Les études montrent que 1500 bouteilles sont sous-évaluées comme déchets chaque seconde. D'autre part, le nombre de bouteilles recyclées ou retourné est très faible.

La fibre plastique, est un mélange contenant une matière de base (un polymère) qui est susceptible d'être moulé, façonné, en général à chaud et sous pression, afin de conduire à un semi-produit ou à un objet. La matière de base (la résine) est un polymère. Les résines des matières plastiques sont issues de produits intermédiaires (éthylène, propylène, acétylène, benzène, etc.) dont les matières premières sont le pétrole.

Le type de ce matériel est en polyéthylène, les fibres plastiques sont coupées en morceaux formes 1mm de diamètre et 20 mm d'épaisseur.

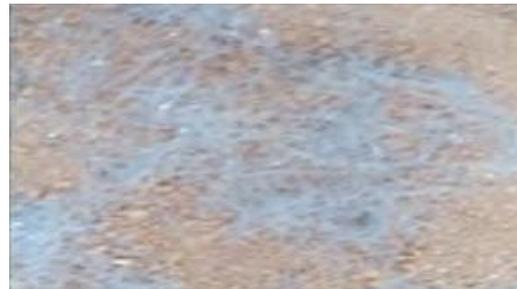


Figure 3.10 : Fibre plastique.

3.3.3.5 Stabilisation par les fibres de caoutchouc

Le principal inconvénient de l'utilisation des fibres en géotechnique demeure leurs prix. L'utilisation des fibres comme renforts aux seins des matrices, dépend essentiellement de la compatibilité des propriétés physiques, mécaniques et chimiques, que possède la fibre avec les constituants de la matrice (sol), sans toutefois ignorer le facteur économique (coût), qui est très important dans la mesure où le prix des fibres sur le marché est relativement élevé. Des fibres de toute nature ont été expérimentées dans le renforcement des matériaux. Les plus répondues sont :

l'amiante, le verre, l'acier, le plastique (nylon et polypropylène), le carbone, les fibres des pneus usées, et les fibres végétales (Bledzki et al. 1999).

Mélange les échantillons d'argile expansive avec des fibres de caoutchouc des pneus usés réduit la pression et l'amplitude de gonflement. Cela peut être attribué au remplacement d'argile gonflante par des fibres de caoutchouc des pneus usés et la résistance offerte par les fibres agissant par le contact argile - fibre (Trouzine *et al.* 2012). Les sols argileux mélangées avec des fibres ont montré que la pression et le potentielle de gonflement sont nettement inférieur au potentiel et à la pression de gonflent en comparaison avec les mêmes sols argileux sans fibres. Figure 10 montre les fibres de caoutchouc des pneus usés et la poudre de caoutchouc.

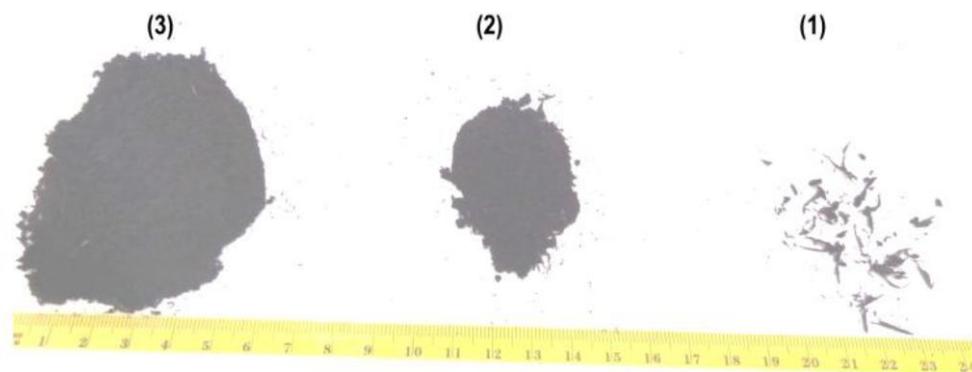


Figure 3.11 : Fibres de caoutchouc des pneus usés (1), Poudre de caoutchouc (2 & 3).

Bekhiti, et al. 2016 ont trouvé que le mélange des échantillons d'argile expansive avec des fibres de caoutchouc des pneus usés réduit le potentiel et la pression de gonflement.

Conclusion

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

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

3.3.3.6 Utilisation Les déchets des pneus

Déchets du pneu est sont des produits issus du processus de granulation, un second broyage fin des pneus en fin de vie, où le caoutchouc est séparé des fibres textiles et des fils métalliques que l'on trouve également dans les pneus. La seule différence entre la poudre et les granulats est la granulométrie.

D'une manière générale, il est possible de caractériser les déchets du pneu par un certain nombre de propriétés :

- Taille de la particule.
- Distribution de taille des particules.
- Morphologie des particules.
- Composition chimique des particules.
- Energie de surface des particules

Les pneumatiques usagés peuvent être broyés en poudrettes ou en granulés de caoutchouc. Ces produits sont utilisés en combinaison avec d'autres matériaux.

Poudrettes : il s'agit de particules de caoutchouc dont les dimensions sont inférieures à 2mm. Son coût d'obtention dépend de sa finesse, de son origine chimique et de l'absence ou non de corps étrangers.

Les pneus possèdent des propriétés multiples qui leur donnent un intérêt dans l'ingénierie civil et géotechnique : ductilité, faible conductivité thermique.

Plusieurs techniques utilisant les PU en génie civil sont connues dans le monde : la technique Pneu sol et ses dérivées « Pneurésil, Pneutex et l'Arma-Pneusol », la technique TDA « Tires Derived Aggregate », la technique Tires Balles et la technique Tirecel. (Trouzine *et al*, 2008).

Le Pneu sol est une association des pneus usés entiers, partiellement ou entièrement découpés à des sols pulvérulents ou cohérents.

Les domaines d'application sont variés « Ouvrages de soutènements, remblai léger, répartiteur des contraintes, protection des pentes... ». Plus de 2000 ouvrages valorisant les PU, selon les différentes techniques sont connues dans le monde, dont environ une

vingtaine en Algérie (Long, 1993 ; Trouzine *et al*, 2008 ; Belabdelouahab et Djidjli, 2009).

L'utilisation des déchets du pneu dans le domaine du génie civil a connu un développement rapide durant les dernières années. Ils ont entièrement remplacé les matériaux de construction traditionnels.

Dans de nombreux cas, l'utilisation d'un déchet de pneu peut augmenter le facteur de sécurité, et réduire les coûts en comparaison avec les matériaux classiques de construction.

4.1 Introduction

Beaucoup de méthodes et d'appareillages ont été mis au point, pour connaître l'influence et l'efficacité d'une solution ou d'un produit sur la stabilisation d'un sol gonflant. Toutefois, les procédures et les normes d'essais différents, rendent les comparaisons délicates. L'estimation des caractéristiques du gonflement nécessite la disposition d'essais standards, à la fois simples, bien adaptés et surtout fiables. Ce chapitre traite les essais expérimentaux qui peuvent être réalisés pour l'amélioration des sols gonflants.

4.2 Matériaux utilisés

4.2.1 Essais d'identification

On doit réaliser les essais d'identification des sols gonflants à étudier. En citant à titre d'exemple et selon les normes européennes : La teneur en eau du sol (NF P 94-050), Masse volumique humide (NF P 94-064), Essai au bleu de méthylène (NF P 94-068),

4.2.1.1 Les limites d'Atterberg (NF P 94-0510,

La limite de liquidité (W_L) : est une valeur de teneur en eau qui indique le passage du sol à l'état liquide, elle est obtenue théoriquement par une fermeture correspondant à $N=25$ chocs. • *La limite de plasticité (W_P)* : est la teneur en eau d'un sol remanié caractérisant la transition entre un état plastique et un état solide - le sol est durcit et se fissure.

Indice de plasticité (I_P) : est la différence entre W_L et W_P .

4.2.1.2 Essais d'analyse granulométrique :

Les deux méthodes qui existent pour effectuer une analyse granulométrique :

- Analyse granulométrie par tamisât : Pour les graviers et les sables ;
- Analyse granulométrie par Sédimentation : Pour les sols à grains fins.

4.2.2 Essais mécaniques :

4.2.2.1 Essai CBR (Californian-Bearing-Ratio)

L'essai CBR (Californian-Bearing-Ratio) est un essai de portance (aptitude des matériaux à supporter les charges). Il s'agit de déterminer l'Indice Portant Immédiat, Indice CBR (Californian-Bearing-Ratio) après immersion d'un sol. C'est un essai de poinçonnement à l'aide d'une presse standard (presse CBR) à vitesse constante (1,27 tr/mn) et le diamètre du piston 19,6 cm.

4.2.2.2 Essai de cisaillement a la boîte

Dans tous les problèmes de stabilité des sols (étude de fondation, ouvrages de soutènement, remblais, talus...) il devient nécessaire de connaître la résistance au cisaillement du sol définie comme étant la contrainte de cisaillement au moment de la rupture.

4.2.2.3 L'essai de gonflement à l'oedomètre :

L'essai de gonflement à l'oedomètre s'effectue sur des matériaux fins mis en présence d'eau. Il permet de déterminer la pression de gonflement d'un matériau ainsi que sa déformation lorsqu'il est soumis, en présence d'eau, à des contraintes verticales inférieures à cette pression de gonflement. Il est utilisé pour apprécier le comportement d'ouvrages pouvant être affectés par la présence de matériaux gonflants.



Figure 4.1 : L'essai de gonflement à l'oedomètre

4.3 Les additifs utilisés

On doit connaître les caractéristiques physiques, chimiques et minéralogiques des additifs utilisés.

4.3.1 Caoutchouc de pneu

Le mélange des échantillons d'argile expansive avec des fibres de caoutchouc des pneus usés réduit la pression et l'amplitude de gonflement. Cela peut être attribué au remplacement d'argile gonflante par des fibres de caoutchouc des pneus usés et la résistance offerte par les fibres agissant par le contact argile - fibre (Trouzine et al., 2012).

Le principe des essais réalisés par (Bekhiti et al. 2016), est de confectionner des éprouvettes d'argile identiques de même teneur en eau et densité. Les premiers essais de gonflement libre à l'appareil œdométrique (essais de référence) sont effectués sur des échantillons d'argiles reconstitués argile de Ayaida (Oran) et la bentonite de Maghnia (Tlemcen) puis des essais identiques sur des mélanges sol – fibres de caoutchouc sont entrepris, pour mettre en évidence, qualitativement, le pouvoir d'absorption du gonflement de l'argile par la poudrette de caoutchouc issue des pneus usés. On prend les notations suivantes :

- A : Argile d'Oran.
- B : Bentonite de Maghnia.
- F : Fibres de caoutchouc proviennent des pneus usés

Les Figures 4.2 et 4.3 montrent la variation du potentiel de gonflement G en fonction du temps pour des échantillons de sol et les échantillons mélangés avec des teneurs en fibres de caoutchouc des pneus usés de 1%, 2.5% et 10%.

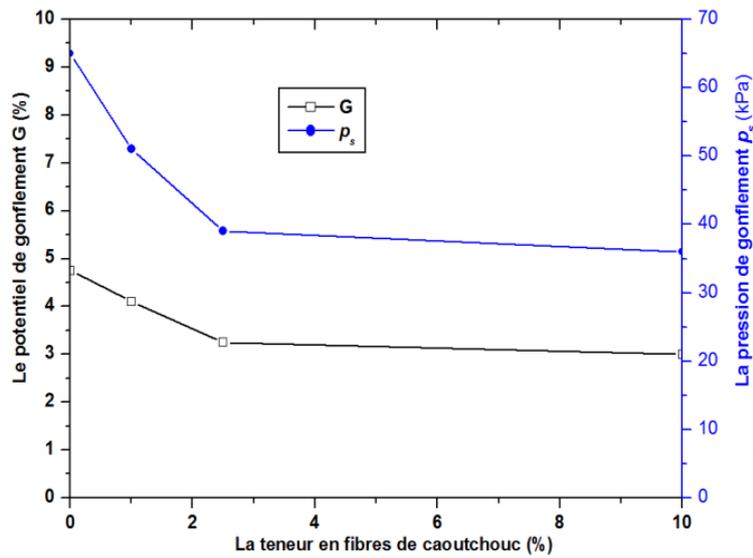


Figure 4.2 : Effet de la teneur fibres en caoutchouc des pneus usés sur le potentiel et la pression de gonflement de sol A (Trouzine et al. 2012).

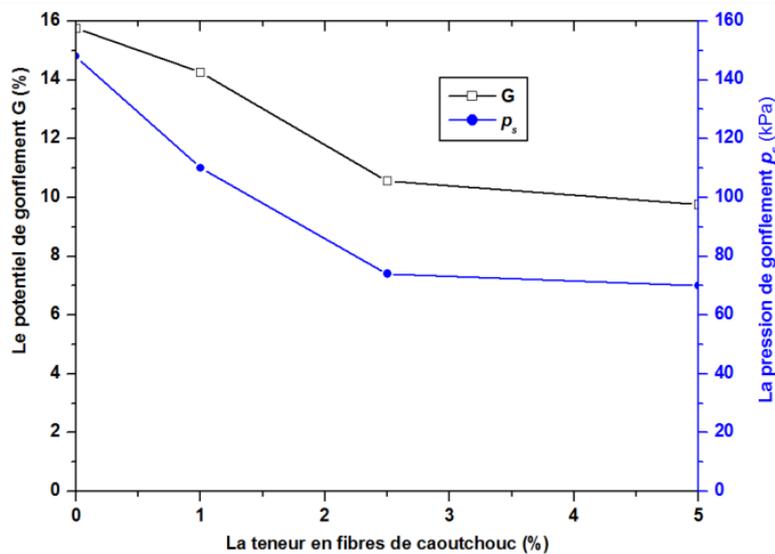


Figure 4.3 : Effet de la teneur en caoutchouc des pneus usés sur le potentiel et la pression de gonflement de sol B (Trouzine et al. 2012).

Les Figures 4.2 et 4.3 montrent les valeurs des pressions et les potentiels de gonflement pour les échantillons étudiés. La pression de gonflement p_s diminue avec la teneur en fibres de caoutchouc. Pour le sol A, la pression de gonflement était de 65 kPa pour les échantillons de sol seul, tandis que les valeurs pour les échantillons composites à 1%, 2.5% et 10% de la teneur en fibres était de 51 kPa, 39 kPa et 36 kPa, respectivement (la Figure 4.2).

La pression de gonflement des sols B et ses mélanges diminue avec la teneur en fibres. La pression de gonflement était de 148 kPa pour les échantillons de bentonite, tandis que les valeurs pour les échantillons composites à 1%, 2.5% et 10% de la teneur en fibres étaient de 110 kPa, 74 kPa et 70 kPa, respectivement (la Figure 4.3).

L'effet des fibres de caoutchouc est similaire pour les deux argiles étudiées sur les paramètres du gonflement, plus le pourcentage augmente plus le gonflement libre et la pression de gonflement diminuent, à un pourcentage de 10% fibres, on constate qu'il y a une diminution remarquable pour les deux argiles.

4.3.2 Cendres volantes

Les cendres volantes, produites dans la combustion des charbons bitumineux, présentent des caractéristiques de cimentage et peuvent être utilisées dans une large gamme des applications de stabilisation. Le traitement de cendres volantes peut efficacement réduire le potentiel de gonflement des argiles fortement plastique et empêcher le gonflement sous les pressions plus petites de base. ZALIHE, 2004, cité par ALLAM, 2011 a étudié la stabilisation des argiles gonflantes par les cendres volantes.

Les résultats d'essai en laboratoire sur ces sols indiquent que ces cendres volantes sont efficaces à l'amélioration de la texture et la plasticité des sols traités. Elles permettent de réduire l'indice de plasticité et le potentiel de gonflement. La réduction en valeurs de la pression de gonflement des deux sols indique que le gonflement des sols est empêché pour de petites valeurs de pression. Le traitement par les cendres volantes change la minéralogie du sol traité et produit de nouveaux minéraux secondaires. L'utilisation des cendres volantes comme matériaux de stabilisation pour le sol semble être une solution intéressante. Cette utilisation aurait des avantages, en plus de la stabilisation environnementaux.

Les cendres volantes ont une composition très semblable à celle du ciment. Elles ont un aspect de poudre fine, douce au toucher et leur couleur varie d'un brun crème au gris noir. Leur couleur dépend de la teneur en carbone non brûlé, en oxyde de fer et de leur humidité. Les particules sont un mélange de billes pleines, de coquilles ouvertes vitreuses et de grains anguleux.

4.3.2.1 Les propriétés chimiques

Il existe deux classes de cendres volantes produites à l'aide de charbon soient les cendres silico-alumineuses et les cendres sulfo-calciques. La norme ASTM C618 catégorise également les cendres volantes en deux catégories, soient la Classe F (silico-alumieuse) et la Classe C (sulfo-calcique). Le tableau 1 indique la composition chimique des deux classes en comparaison avec le Ciment Portland.

Tableau 4. 1 : Composition chimique en pourcentage *des* cendres volantes et du Ciment Portland. (Chauvin et *al*, 1980 ; Lav et Kenny, 1997).

Composés Chimiques	Classe F	Classe C	Ciment Portland
	Silico-alumineuse	Sulfo-calcique	
(%)	(%)	(%)	
SiO ₂	55	29	23
Al ₂ O ₃	26	13	4
Fe ₂ O ₃	7	9	4
CaO (chaux)	9	41	65
MgO	2	1	2
SO ₃	1	7	2

4.3.3 Fibre plastiques

La fibre plastique, est un mélange contenant une matière de base (un polymère) qui est susceptible d'être moulé, façonné, en général à chaud et sous pression, afin de conduire à un semi-produit ou à un objet. La matière de base (la résine) est un polymère. Les résines des matières plastiques sont issues de produits intermédiaires (éthylène, propylène, acétylène, benzène, etc.) dont les matières premières sont le pétrole. Le type de ce matériel est en polyéthylène, les fibres plastiques sont coupées en morceaux formes 1mm de diamètre et 20 mm d'épaisseur.

D'après les essais réalisés par nos collègues au laboratoire des travaux publics de l'Est à Annaba, on constate en général qu'il y a une augmentation de la masse volumique sèche avec l'addition des fibres plastiques pour sol A et sol B comme le montre les figures 4.4 et 4.5. Sol A et sol B : prélevé a la région de Guelma

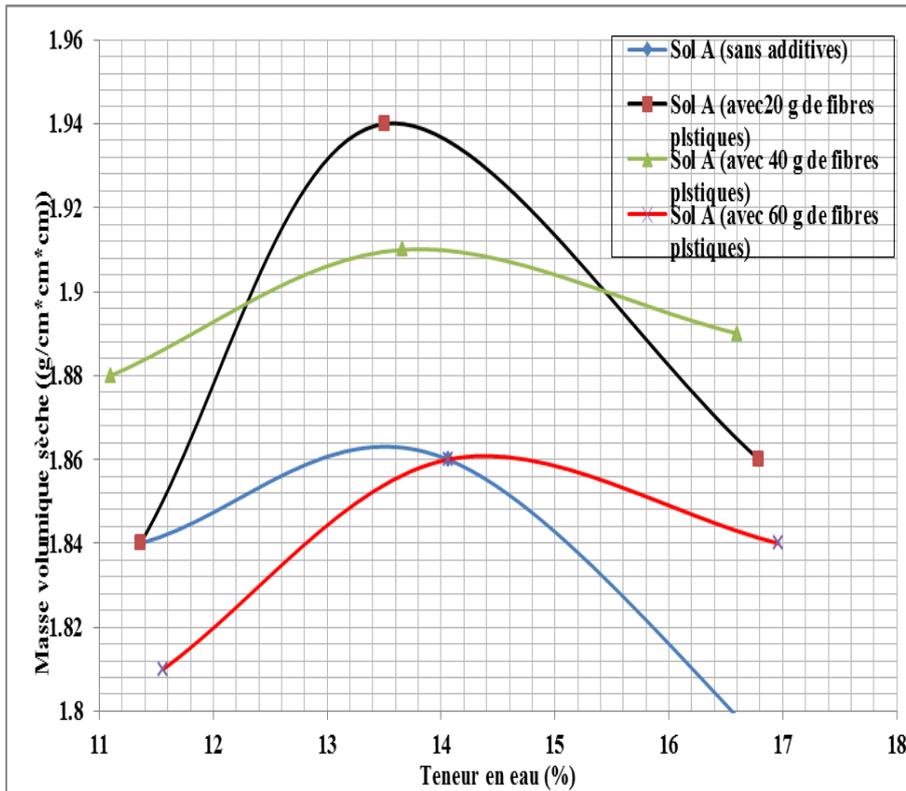


Figure 4.4: Courbe de compactage (Essai Proctor normal) pour sol A (sans et avec des fibres plastiques).

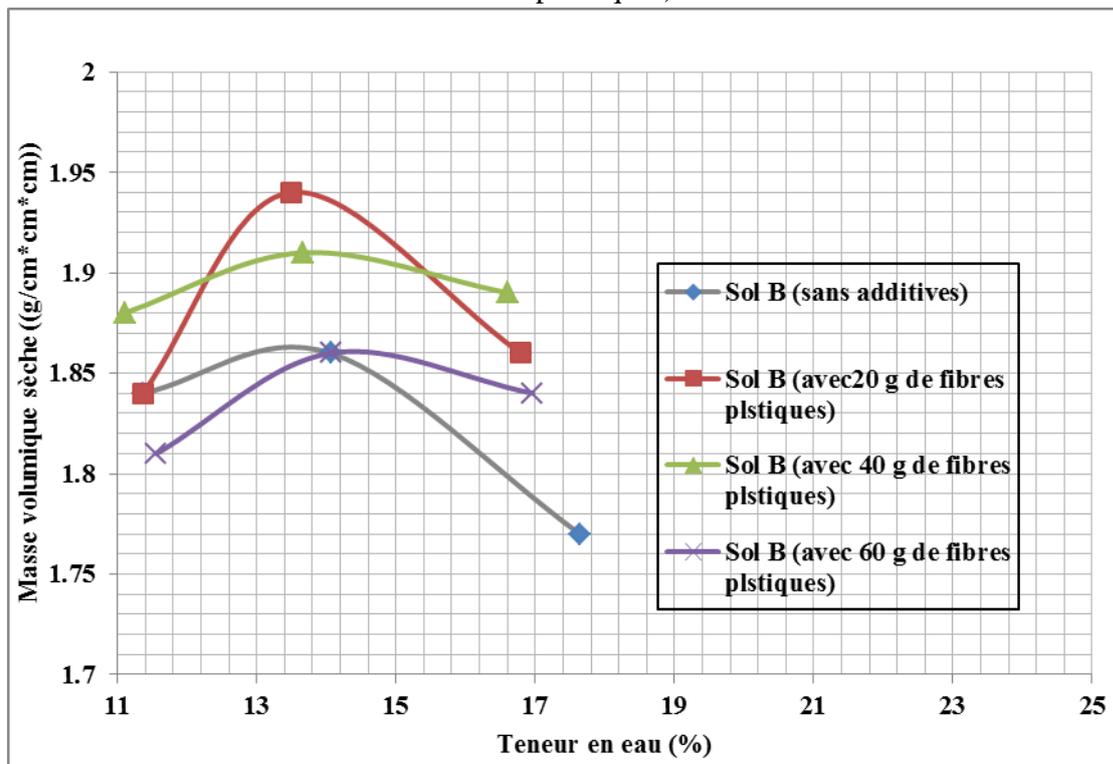


Figure 4.5 : Courbe de compactage (Essai Proctor normal) pour sol B (sans et avec des fibres plastiques).

4.3.4 Chaux

La stabilisation par ajout de chaux est la technique de traitement des sols la plus répandue. L'utilisation de cette technique permet : D'éviter des volumes de terrassement importants dans le cas de substitution des sols médiocres. Sachant qu'il y a deux types de chaux, vive et éteinte, le choix s'effectue en basant sur les essais de laboratoire, les essais de chantier et sur le prix de revient. Généralement, c'est la chaux vive qui est préférée car elle fournit plus d'ions de Ca^{2+} , elle donne un produit plus dense et un abaissement de la teneur en eau important (BEKKOUCHE et al, 2001).

D'après la figure 4.6, on remarque que les valeurs des paramètres de compactage normal pour le sol A (sans additives) sont $\rho_{dmax} = 1.86 \text{ g/cm}^3$ et $\omega_{opt} = 14.05\%$ alors que pour les sols avec addition de 2% de la chaux, la valeur de la densité sèche maximale augmente à 1.9 g/cm^3 et une diminution de la teneur en eau optimale à 13.74% .

Au contraire lorsqu'on ajoute 4% et 6% de la chaux, les valeurs de la densité sèche maximale diminuent à 1.84 g/cm^3 et 1.77 g/cm^3 respectivement, par contre les valeurs de la teneur en eau optimales augmentent à 14.23% et 17.64% .

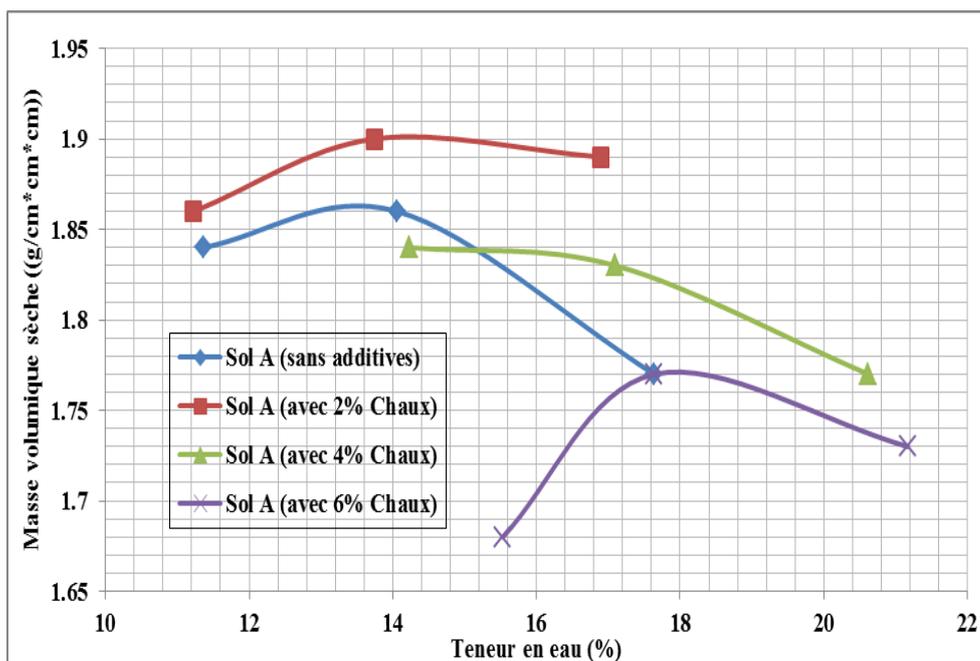


Figure 4.6 : Courbe de compactage (Essai Proctor normal) pour sol A (sans et avec de la chaux).

Chapitre 4 : Essais expérimentaux au laboratoire Pour l'amélioration des sols gonflant

La plus grande valeur de la densité sèche maximale ($\rho_{dmax} = 1.80 \text{ g/cm}^3$) est obtenue par l'addition de 6% de la chaux avec sol B (voir figure 4.7).

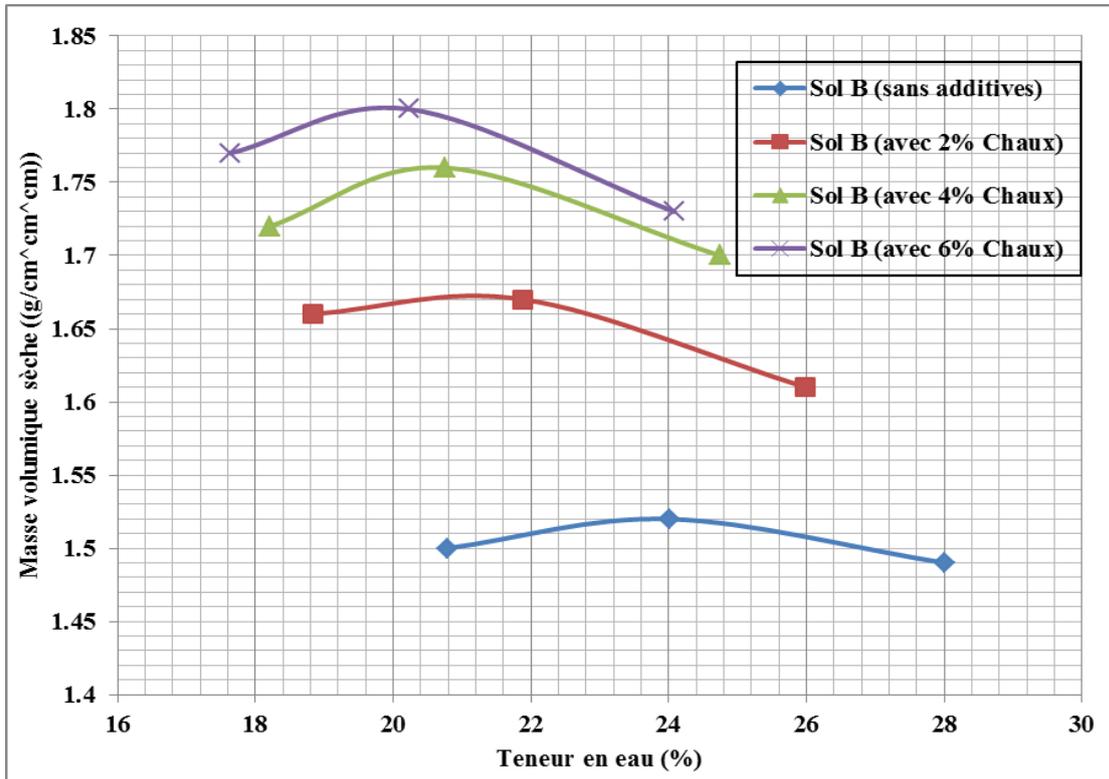


Figure4.7 : Courbe de compactage (Essai Proctor normal) pour sol B (sans et avec de la chaux).

La figure 4.8 présente une comparaison entre les valeurs des paramètres de compactage normal pour le sol A (sans additifs et avec l'addition des pourcentages de la chaux et l'addition des pourcentages des fibres plastiques).

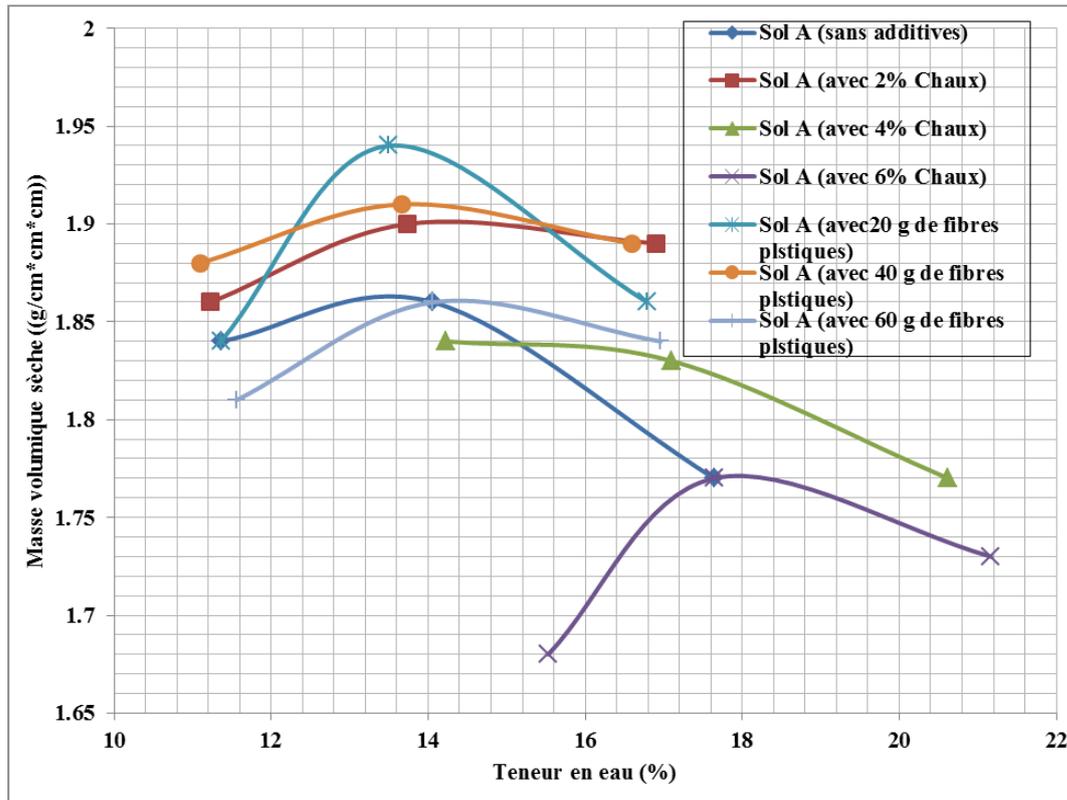


Figure 4.8 : Courbe de compactage (Essai Proctor normal) pour sol A (sans et avec de la chaux et des fibres plastiques).

Chapitre 4 : Essais expérimentaux au laboratoire Pour l'amélioration des sols gonflant

Les tableaux 4.1 et 4.2 présentent les valeurs de la masse volumique sèche maximale et la résistance de compression pour les sols A et B pour les cas sans additifs et avec les différents pourcentages des additifs de la chaux et des fibres plastiques.

Tableau 4.2: comparaison la masse volumique sèche maximale et la résistance de Compression sol A

	Sol A (Sans addition)	La chaux (%)			Les fibres plastique (g)		
		2	4	6	20	40	60
La résistance de compression (kgf/cm²)	7.49	15.50	18.34	9.04	8.52	16.53	11.47
Masse volumique Sèche maximale (g/ cm³)	1.86	1.90	1.84	1.77	1.94	1.91	1.86

Tableau 4.3 : comparaison la masse volumique sèche maximale et la résistance de Compression pour sol B

	Sol B (Sans addition)	La chaux (%)			Les fibres plastique (g)		
		2	4	6	20	40	60
La résistance de compression (kgf/cm²)	4 .31	6 .93	9.46	8.99	11.37	26.87	21.17
Masse volumique Sèche maximale (g/ cm³)	1.52	1.67	1.76	1.80	1.84	1.86	1.94

4.3.4.1 Interprétation et discussion

Au contact du sol, la chaux vive absorbe l'humidité du sol et devient de la chaux éteinte (hydratée) (Babasaki et al. 1996). L'hydratation est rapide, génère une grande quantité de chaleur (155 kcal/kg de CaO) et entraîne la formation d'hydroxyde de calcium (Kitazume 2005). Au fur et à mesure de cette formation, une partie du CH va se dissoudre dans l'eau interstitielle et va être adsorbée par les particules de sol. Des échanges ioniques, en particulier le remplacement dans le sol des ions sodium et potassium par des ions calcium et magnésium, vont avoir lieu, ce qui va entraîner une réduction de l'indice de plasticité du sol, et une modification structurelle du sol, le rendant plus granuleux et sec, notamment grâce à la floculation des particules d'argile.

L'ajout de chaux provoque une augmentation du pH du sol, ce qui augmente la capacité d'échange ionique de celui-ci, en permettant la dissolution des ions silice (S) et alumine (A) présents dans le sol et leur réaction avec le calcium (CDIT 2002). Ces réactions sont appelées pouzzolaniques. Elles sont lentes et produisent des CSH, CASH et CAH.

L'augmentation de la densité en présence de la chaux peut être expliquée par une diminution de la teneur en eau. Cette diminution est due à la consommation de l'eau nécessaire à l'hydratation de la chaux et l'évaporation d'eau suite à la réaction d'hydratation et par l'aération provoquée par le malaxage.

L'augmentation de la densité et de la résistance de compression par l'addition des fibres plastiques se traduit par l'amélioration des caractéristiques mécaniques des sols et l'apparition d'un gain de cohésion. D'une façon générale, la méthode de renforcement par l'addition des fibres plastiques au sol est semblable à l'addition de la chaux au sol.

4.3.4.2 Conclusion

- La présence de la chaux et les fibres plastiques au sol améliorent la résistance du sol, ce qui augmente aussi l'énergie portante de sol.
- L'amélioration de ce type est plus économique en termes de coûts et d'énergie pour augmenter la capacité portante du sol et d'éviter le recours aux fondations profondes et les radiers.
- elle est aussi utilisée pour rassurer la stabilité des talus et les cas similaires.
- Elle permet de diminuer la perméabilité du sol.

4.3.5 Poudre du marbre

La figure 4.9 donne l'évolution des masses volumiques sèches en fonction de la teneur en eau du sol naturel sans traitement et traité aux différents pourcentages en poudre du marbre. On constate que la plus grande valeur de la masse volumique sèche maximale (1.72 g/cm^3) est obtenue pour le sol sans traitement. Pour le sol traité par la poudre du marbre, la plus grande valeur de la masse volumique sèche maximale (1.69 g/cm^3) est obtenue pour le sol traité à 6% de la poudre du marbre.

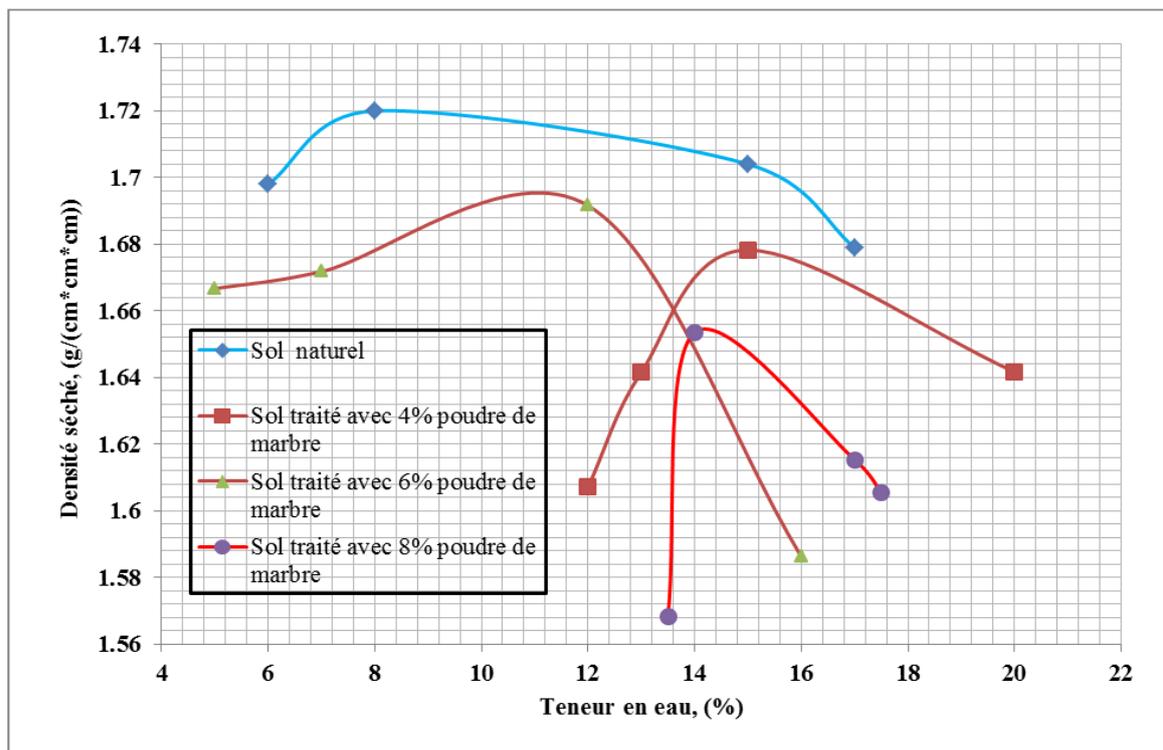


Figure 4.9 Courbe de compactage (Essai Proctor normal) Pour sol naturel sans traitement et avec différents pourcentages de la poudre du marbre)

Chapitre 4 : Essais expérimentaux au laboratoire Pour l'amélioration des sols gonflant

4.3.5.1 Exemples des essais de gonflement à l'œdomètre

Voici quelques exemples des essais de gonflement a l'œdomètre réalisés par nos collègues sur l'argile gonflante sans et avec traitement par la poudre du marbre.

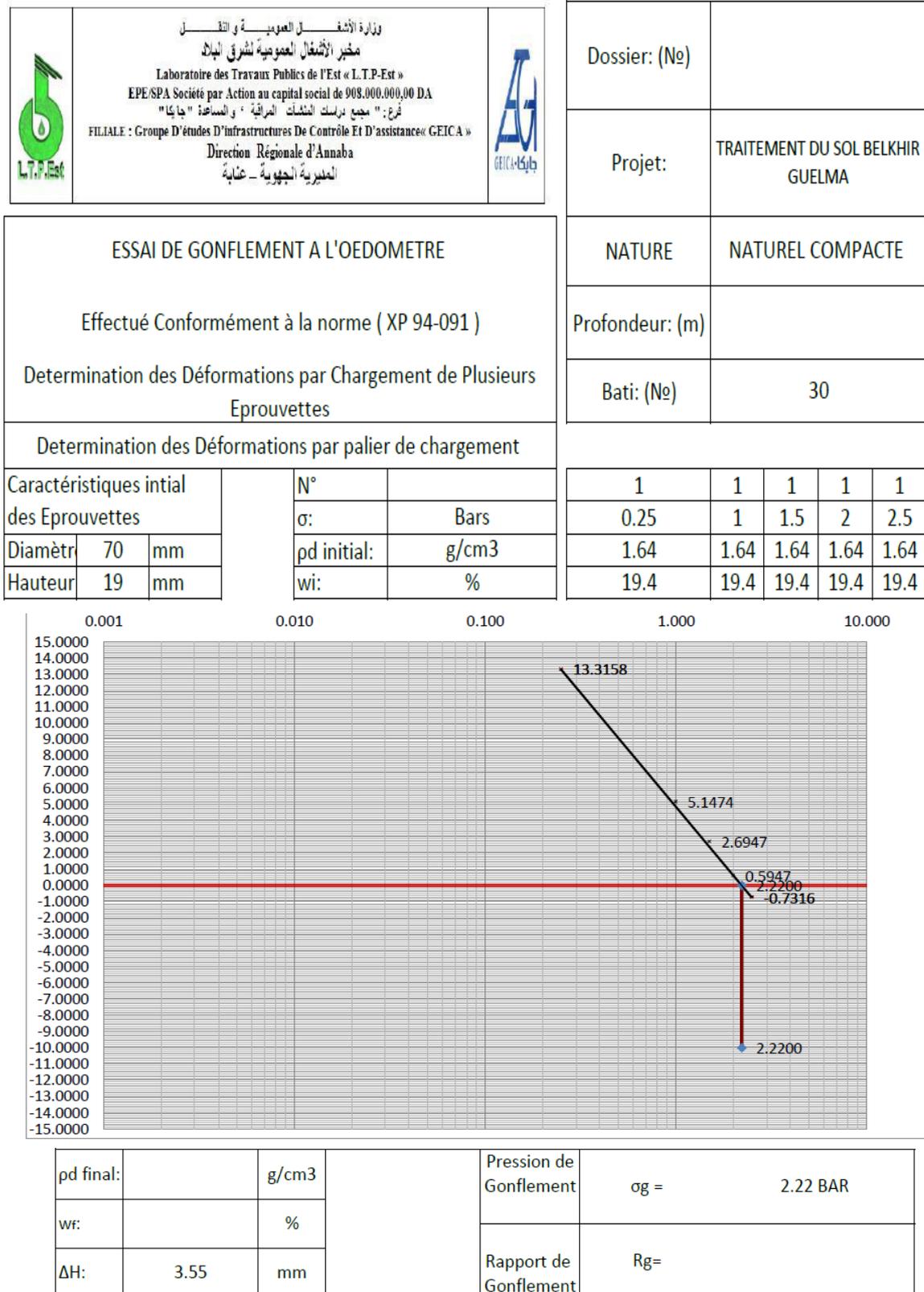


Figure 4.10 Évolution de la contrainte normale en fonction du potentiel de Gonflement.(Sol naturel après compactage)

Chapitre 4 : Essais expérimentaux au laboratoire Pour l'amélioration des sols gonflant

	وزارة الأشغال العمومية والتعمير مخبر الأشغال العمومية لتفوق البلاد Laboratoire des Travaux Publics de l'Est « L.T.P-Est » EPE/SPA Société par Action au capital social de 908.000.000,00 DA فرع: " مجمع دراسات المنشآت الفرانسية والمساعدة " جاكا FILIALE : Groupe D'études D'infrastructures De Contrôle Et D'assistance « GEICA » Direction Régionale d'Annaba المديرية الجهوية - عنابة																						
ESSAI DE GONFLEMENT A L'OEDOMETRE Effectué Conformément à la norme (XP 94-091) Determination des Déformations par Chargement de Plusieurs Eprouvettes Determination des Déformations par palier de chargement			Dossier: (Ne) Projet: TRAITEMENT DU SOL BELKHIR GUELMA NATURE: S.N.C +4%MARBRE Profondeur: (m) Bati: (Ne) 28																				
Caractéristiques intial des Eprouvettes		N° σ : Bars pd initial: g/cm3 wi: %	<table border="1" style="width: 100%; text-align: center;"> <tr><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td></tr> <tr><td>0.25</td><td>1</td><td>1.5</td><td>2.5</td><td>3</td></tr> <tr><td>1.67</td><td>1.67</td><td>1.67</td><td>1.67</td><td>1.67</td></tr> <tr><td>16.1</td><td>16.1</td><td>16.1</td><td>16.1</td><td>16.1</td></tr> </table>	1	1	1	1	1	0.25	1	1.5	2.5	3	1.67	1.67	1.67	1.67	1.67	16.1	16.1	16.1	16.1	16.1
1	1	1	1	1																			
0.25	1	1.5	2.5	3																			
1.67	1.67	1.67	1.67	1.67																			
16.1	16.1	16.1	16.1	16.1																			
Diamètr	70 mm																						
Hauteur	19 mm																						

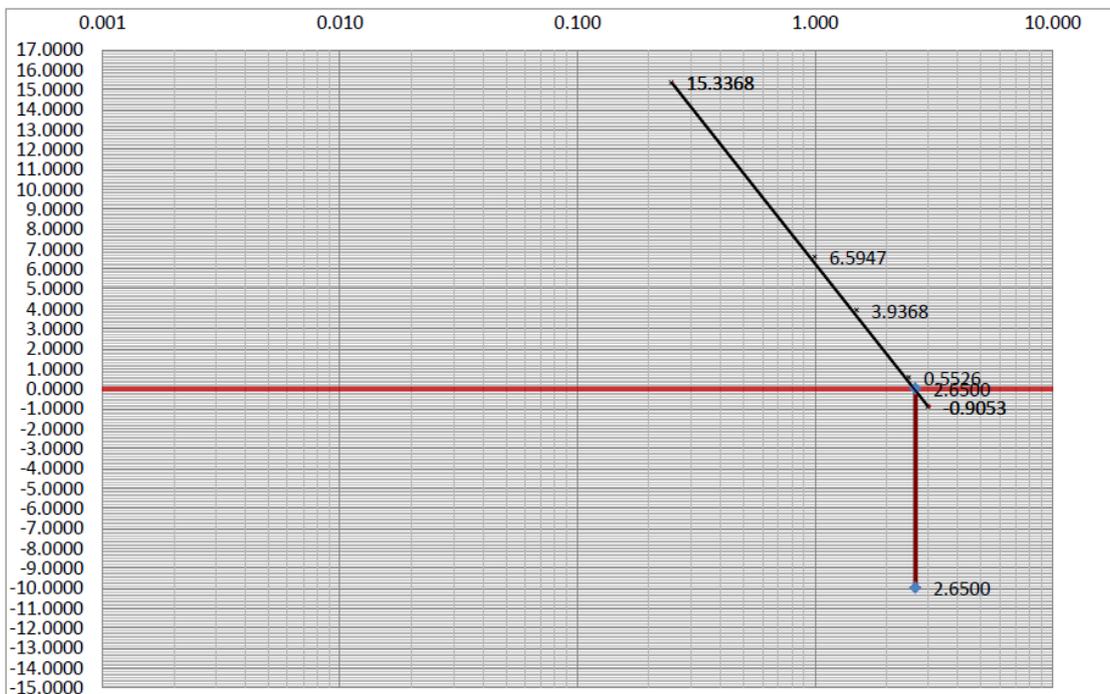


Figure 4.11 Évolution de la contrainte normale en fonction du potentiel de Gonflement.

(Sol naturel compacté + 4% poudre du marbre).

Chapitre 4 : Essais expérimentaux au laboratoire Pour l'amélioration des sols gonflant

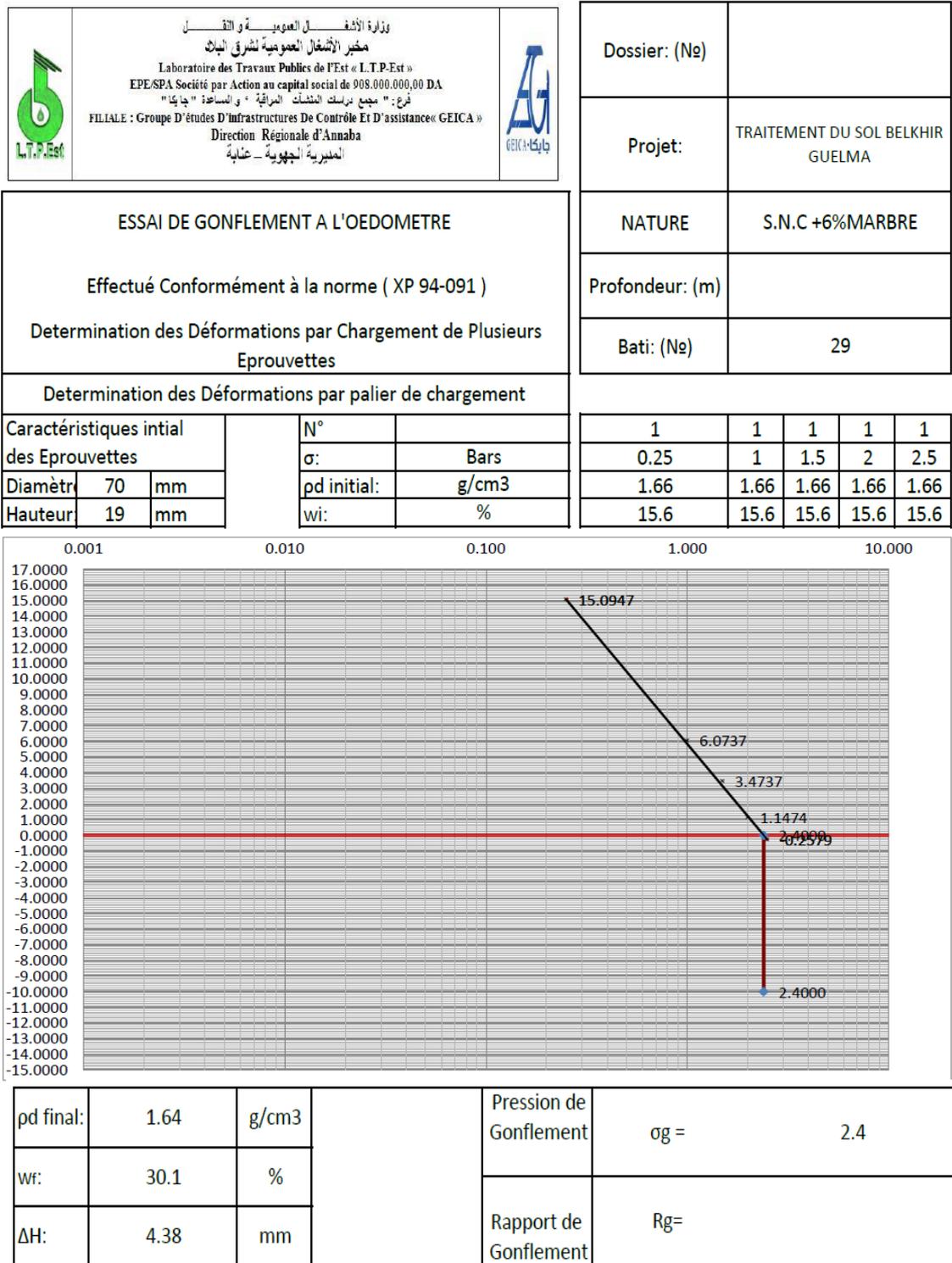


Figure 4.12 Évolution de la contrainte normale en fonction du potentiel de gonflement.

(sol naturel compacté + 6% poudre du marbre)

Chapitre 4 : Essais expérimentaux au laboratoire Pour l'amélioration des sols gonflant

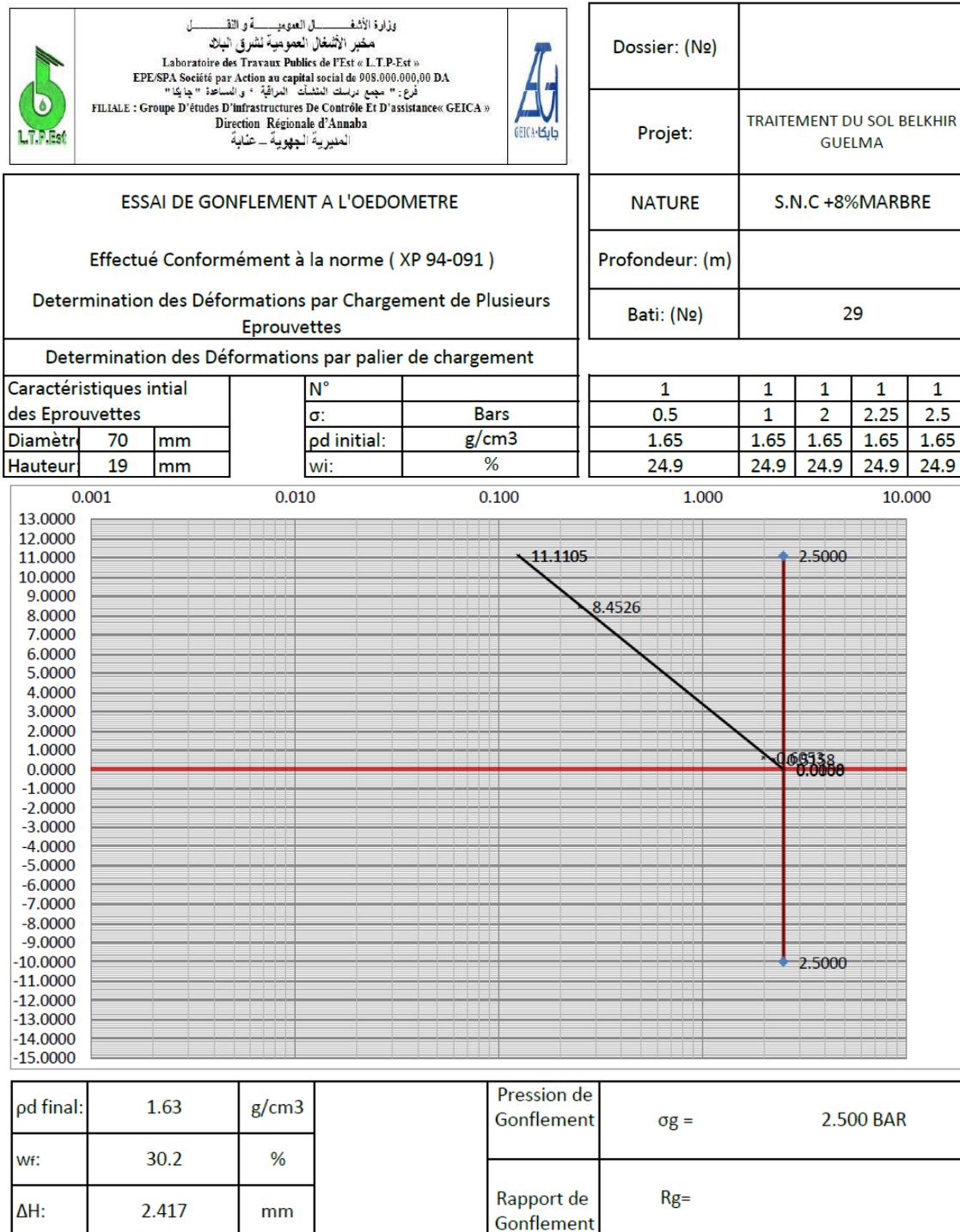


Figure 4.13 Évolution de la contrainte normale en fonction du potentiel de gonflement. (sol naturel compacté + 8% poudre du marbre).

Tableau 4.4 Les résultats des coefficients de gonflement pour sol naturel sans traitement et avec différents pourcentages de la poudre du marbre.

L'état de sol	Potentiel de gonflement Cg (%)
Sol sans traitement (naturel intact)	3.43
Sol naturel après compactage	18.68
Sol compacté et traité avec 4% poudre du marbre	19.47
Sol compacté et traité avec 6% poudre du marbre	23.05
Sol compacté et traité avec 8% poudre du marbre	12.72

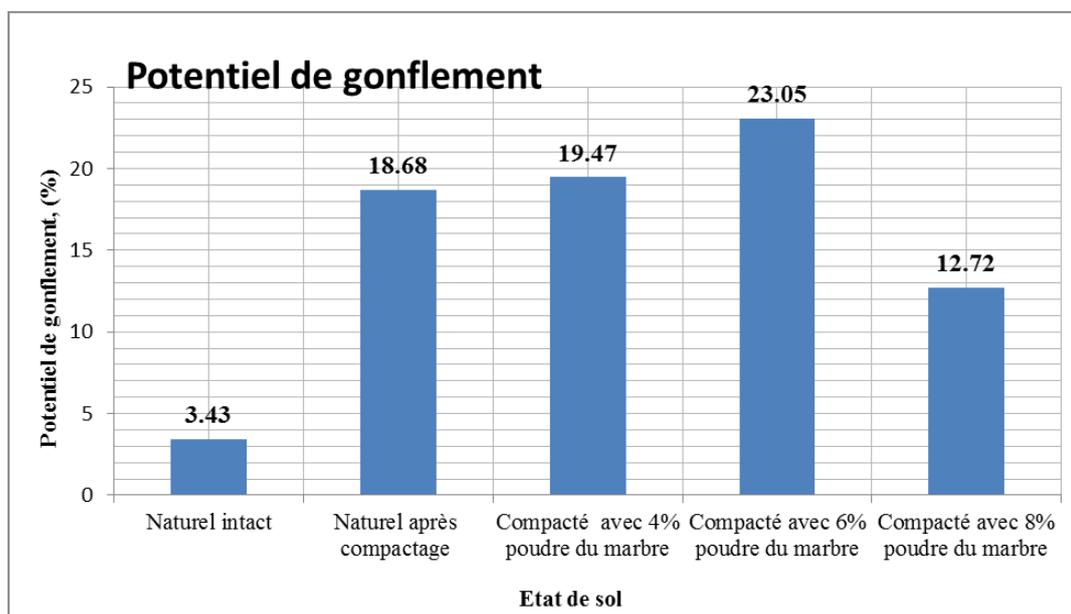


Figure 4.14 Évolution du potentiel de gonflement en fonction de l'état du sol.

On sait que La pression de gonflement représente la pression qu'il faut appliquer à un échantillon de sol pour empêcher sa déformation au cours de l'adsorption d'eau (essai à volume constant). Elle peut être également définie par la pression qu'il faut appliquer pour ramener un échantillon de sol à son volume avant saturation (essai à volume libre). On constate d'après le tableau 4.5 que la plus grande valeur de la pression de gonflement est trouvée pour le cas de sol compacté et traité avec 4% poudre du marbre.

Tableau 4.5. Les résultats de la pression de gonflement pour sol naturel sans traitement et avec différents pourcentages de la poudre du marbre

L'état de sol	Pression de gonflement
Sol sans traitement (naturel intact)	49.5
Sol naturel après compactage	222
Sol compacté et traité avec 4% poudre du marbre	265
Sol compacté et traité avec 6% poudre du marbre	240
Sol compacté et traité avec 8% poudre du marbre	250

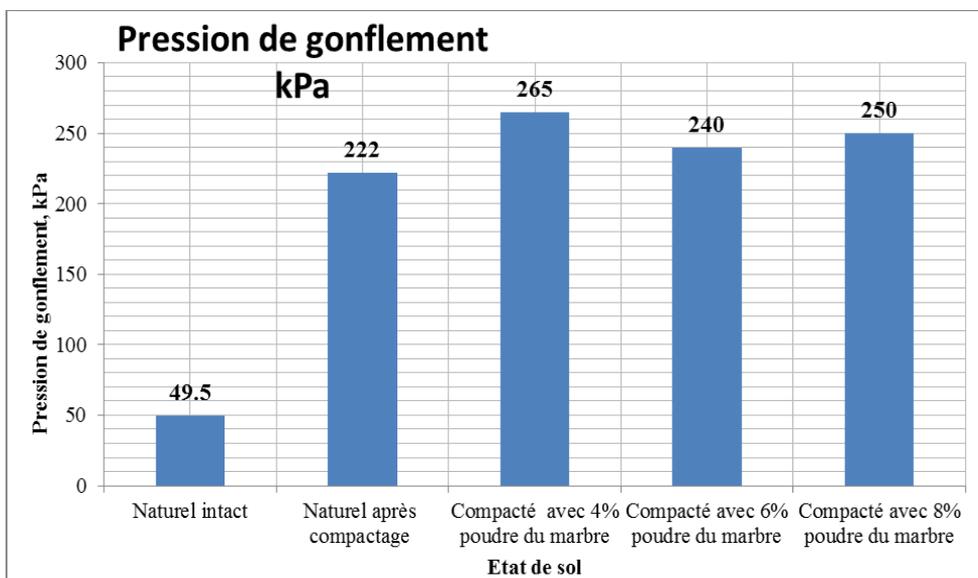


Figure 4.15 : Évolution de la pression de gonflement en fonction de l'état du sol.

4.3.6 Ciment

Le ciment Portland est composé essentiellement de silicate de calcium et d'aluminate de calcium hautement réactifs. Une fois le ciment introduit dans le sol argileux, ces composants s'hydratent avec de l'eau de sol pour produire du silicate d'hydrate de calcium (CSH) et de l'aluminate d'hydrate de calcium (CAH). Ces derniers éléments engendrent de fortes liaisons inter particules dans la matrice de sol. Ces composants cimentaires sont caractérisés par leur grande résistance et leur faible variation de volume. Le processus de cimentation est assez rapide et exothermique. L'amélioration significative de la résistance est obtenue rapidement et même des fois en quelques heures. En plus, au cours du processus d'hydratation, la chaux libre Ca(OH)_2 est produite en tant que sous-produit, ce qui permet à la fois l'échange de cations et la réaction pouzzolanique.

Djedid (2005), ont effectués des essais de gonflement libre sur des échantillons reconstitués d'argile de Tlemcen et dosés à différents taux de ciment, les résultats obtenus (figure 4.16).

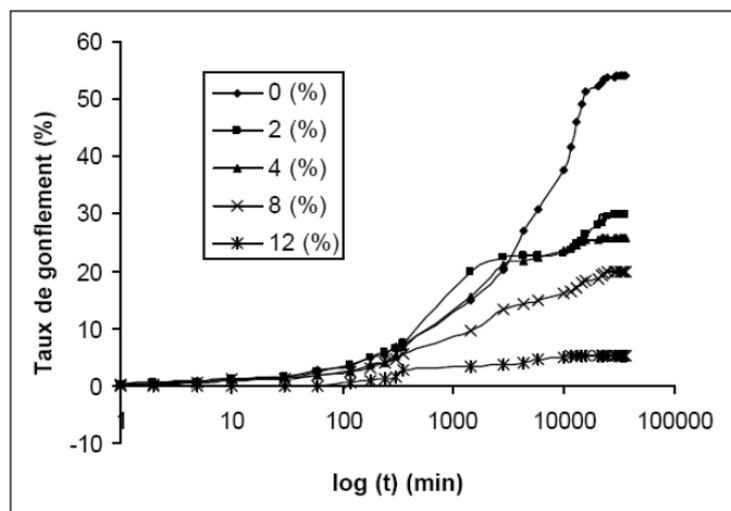


Figure 4.16 : Effet du dosage au ciment sur le gonflement de la Bentonite de Meghnia.
(Djedid, (2005))

Conclusion générale

Au cours des dernières années un développement rapide des infrastructures dans les grandes villes, aggravé par la rareté des terres utiles et obligé les ingénieurs à améliorer les propriétés du sol pour supporter la charge transférée par l'infrastructure comme les bâtiments, les ponts, les routes chemins.... etc. L'amélioration des sols est la question centrale pour un grand nombre de projets d'ingénierie, là où le bon sol se fait rare.

- Une fois le ciment introduit dans le sol gonflant, ces composants s'hydratent avec de l'eau de sol pour produire du silicate d'hydrate de calcium et de l'aluminate d'hydrate de calcium. Ces derniers éléments engendrent de fortes liaisons inter particules dans la matrice de sol. Ces composants cimentaires sont caractérisés par leur grande résistance et leur faible variation de volume. Le processus de cimentation est assez rapide et l'amélioration significative de la résistance est obtenue rapidement et même des fois en quelques heures

- En ce qui concerne l'addition de la poudre du marbre et après compactage, il y a une augmentation du potentiel de gonflement et de la pression de gonflement. Ces résultats montrent que la poudre du marbre ne procède pas à l'amélioration du sol étudié et ne diminue pas le potentiel de gonflement.

- Un nombre d'essais de compression simple sans confinement et de compactage (Proctor normal) ont été examinés sur l'échantillon de sol sans et avec différents pourcentages de fibres plastiques et de la chaux. On peut dire que les fibres plastiques sont similaires aux racines des arbres et de la végétation qui fournissent un excellent ingrédient pour améliorer les sols gonflants et d'assurer la stabilité des pentes naturelles.

- Les quatre composés importants des cendres volantes nécessaires pour la stabilisation est la silice, l'alumine, l'oxyde de fer et la chaux, L'addition des cendres volants à l'argile peut améliorer de la texture et la plasticité des sols traités. Elles permettent de réduire l'indice de plasticité et le potentiel de gonflement. l'utilisation des cendres volant semble être une solution intéressante Et il a des perspectives.

- Pour sol A (1.86 g/cm³) traité par la chaux il a une augmentation de la masse volumique sèche à 2% (1.90g/cm³) et diminution à 4% et 6% (1.84g/cm³ et 1.77g/cm³). Et pour sol B (1.52 g/cm³) la masse volumique augment en fonction de dosage de la chaux (1.67, 1.76, 1.80 g/cm³) à 2%, 4 % et 6 %.

- Pour le sol traité avec la poudre de marbre la masse volumique sèche la plus grande est 1.69 g/cm³ de.

- Après avoir compacté le sol sans traitement et le sol traité par des pourcentages de 4%, 6% et 8% de la poudre du marbre et la réalisation des essais œdométriques. La plus grande valeur du potentiel de gonflement ($C_g=23.05\%$) est trouvée avec le sol traité avec 6% de poudre de marbre et la petite valeur ($C_g=3.43\%$) est obtenue pour le sol sans traitement et sans compactage.

- En ce qui concerne évolution de la pression de gonflement en fonction de l'état de sol. Nous constatons que la plus grande valeur de pression de gonflement (265 kN/m²) est obtenue pour le sol compact et traite avec 4% de la poudre de marbre.

- Les propriétés de gonflement de cette argile peuvent se résumer ainsi : potentiel de gonflement entre 3.43 % et 23.05% et pression de gonflement entre 49.5 et 265 kPa.

Pour les perspectives futures : Il serait souhaitable d'effectuer des études supplémentaires et approfondies sur les méthodes de stabilisations, et aussi de Penser à l'application pratique de la méthode de stabilisation combinée à un site expérimental, voir avantages et inconvénients, pour la validation de cette méthode.

De point de vue économique, il serait souhaitable, de mener une étude comparative entre les différentes méthodes de stabilisation des sols gonflants.

Référence

[1] A Elshater, MA Khashab, MA El-Sherif, ES Abu S. (2019). Geological and Engineering Characteristics of Expansive Soils in Western Desert, Egypt. *Civil Eng Res J.* 2019; 7(2): 555707.

Al-Rawas, A.A., Goosen, M.F.A., Al-Rawa, G.A., 2006. Geology, classification, and distribution of expansive soils and rocks. In: Al-Rawas, A.A., Goosen, M.F.A. (Eds.), *Expansive Soils: Recent Advances in Characterization and Treatment*. Taylor & Francis, London, pp. xi and 3.

Kariuki, P. C. (2004), *Spectroscopy and swelling soils – An integrated approach*, Department of Applied Science, Delf University of Technology in the Netherlands.

SEED, H.B., WOODWARD, R.J. & LUNDGREN, R., 1962. Prediction of swelling potential for compacted clay. *Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division*, vol. 88, pp.107-131.

ALTMAYER, W.T., 1955. Discussion of engineering properties of expansive clays. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, American Society of Testing and Materials*, vol. 81, n°SM2, pp. 17-19

BRE (1993) *Low-rise buildings on shrinkable clay soils: BRE Digest, Vols. 240, 241.& 242.* CRC, London.

BRE Building Research Establishment, 1980. *The effect of a roof on a fire within a building.* IP 3/80.

CHEN F. H. (1975). *Foundations on Expansive Soils.* Elsevier, Amsterdam.

CUISINIER, O., 2002. *Comportement hydromécanique des sols gonflants compactés.* ThèseDe l'INPL, 176 p.

Holtz, W.G., & Kovacs, W. G. (1981). An Introduction to Geotechnical Engineering. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall.

Day, R. W. (1999), Geotechnical and foundation engineering design and construction, McGrawHill Companies, New York.

Jones, D. E., and Holtz, W. G. (1973), Expansive soils – the hidden disaster. Civil Engineering ASCE, 43(8), 49-51.

BUREAU OF BUREAU OF INDIAN STANDARDS. (1970). Indian Standard Classification and Identification of Soils for General Engineering Purposes. BIS, New Delhi, 1970, (Revised 1987), IS 1498.

Holtz, W. G. and Gibbs, H. J. (1956), Engineering properties of expansive clays. Transactions, American Society of Civil Engineers, vol. 121, pp. 641-677.

Nelson J D, Miller D J. Expansive Soils, Problems and Practice in Foundation and Pavement Engineering. New York: Wiley, 1992.

AZZOUZ .F.Z, (2006) :«Contribution à l'étude de la stabilisation chimique de quelques argiles gonflantes de la région de Tlemcen», mémoire de magister université de Tlemcen, Algérie.

BEKKOUCHE.A, DJEDID.A et AISSA MAMOUNE .S.M, (2001) : « Identification et prévision du gonflement de quelques sols de la région de Tlemcen (Algérie) », Bulletin des laboratoires des ponts et chaussées, Réf 4375 – PP (67-75) .

Bledzki, A. K., Gassan, J., (1999).Composites reinforced with cellulose based fibers, Elsevier, Progress in polymer science, volume 24, pp.221-274.

BENGRAA .H, (2004) :« Contribution a l'étude de la stabilisation du gonflement par ajout du sable », Thèse de magister Université de Mohamed Boudiaf, Oran, Algérie.

M. Bekhiti, H. Trouzine, F. Belabelouahab, (2016). Influence des fibres de caoutchouc sur le potentiel de gonflement des argiles. Journée d'Étude Scientifique et Technique sur les Produits Géosynthétiques, Ouargla, Algeria.

Lav, A.H., et Kenny, P.J., (1997). Fly ash production and its utilisation in road construction. Road and Transportation Research, Vol. 6, N°3, 7p.

Trouzine, H., Bekhiti, M., Asroun, N., (2012). Effects of scrap tire rubber fibre on swelling behaviour of two clayey soils in Algeria, Geosynthetics International, 19, N°

DJEDID. A.(2005). L'identification des sols gonflants : pour une démarche unifiée. 2ème JESG (Journées d'Études sur les Sols Gonflants).

Trouzine, H., Bekhiti, M., Asroun, N.(2012). Effects of scrap tire rubber fibre on swelling behaviour of two clayey soils in Algeria, Geosynthetics International, 19, N°. 2.

Bekhiti, M., Trouzine, H., Belabdelouahab, F. (2016). Influence des fibres de caoutchouc sur le potentiel de gonflement des argiles. Journée d'Étude Scientifique et Technique sur les Produits Géosynthétiques, Ouargla, Algeria.

Mémoire master (Rouabhia / Zedadra) juin 2017/ 08 mai 1945 Guelma

Mémoire master (Benayache /Yahamdi) juin 2018/ 08 mai 1945 Guelma