

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

جامعة محمد الصديق بن يحيى - جيجل
Université Mohammed Seddik Benyahia - Jijel



Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie
Département des Sciences de la Terre et de
L'univers.

كلية علوم الطبيعة و الحياة
قسم علوم الارض و الكون

Mémoire de fin d'études

En vue de l'obtention du diplôme : **Master Académique en Géologie**

Option : Génie Géologique

Thème

**Comportement au laboratoire des sols plastiques
traités à la chaux ou aux liants hydrauliques**

Membres de Jury

Président : Mr. TEKKOUK Mustapha

Examinatrice : Mme ILLAS Chahra

Encadrants : Dr. BENZAID Riad

Mme KHERROUBA Hassiba

Présenté par :

BOUROUMA Maha

CHEBBAH Wahiba

Année Universitaire 2016-2017

Numéro d'ordre (bibliothèque) :

Remerciements

Louange a Dieu le Clément Miséricorde qui nous a donné force et volonté pour venir à terme de ce travail si humble soit-il.

Nos remerciements vont tout d'abord à nos parents pour leurs encouragements et soutien qu'ils nous ont réservés tout au long de notre formation.

Nos remerciements aussi à **M^r D^r RIAD BENZAID** pour nous avoir initié, guidé et encadré dans la conduite du travail au sein du laboratoire et dans la confection de ce mémoire et pour avoir supporter nos maladresses et carences .

Nous remercions également notre Co-encadreur M^{elle} **KHERROUBA Hassiba** pour son assistance, ses conseils et ses remarques fructueuses dans les tâches du laboratoire.

Qu'elle trouve ici toute notre reconnaissance et sympathie.

Nous remercions vivement les membres du Jury chacun en son nom pour avoir accepté de donner de leur temps pour avoir conduit , lire et examiner notre travail de fin d'étude .

Nous tenons aussi remercier tout le personnel du laboratoire des matériaux pour leur disponibilité.

Et particulièrement, nous remercions vivement **M^r YUCEF ROUIKHA** pour l'aide précieuse qu'il nous a octroyée tout au long de notre cursus ,ses corrections de langue française et sa disponibilité infailible.

Que toutes les personnes qui nous ont apporté leur soutien de près et de loin trouvent ici nos sincères reconnaissances

MERCI A TOUS

MAHA WAHIBA





Dédicace

*Ce travail a couronné mes cinq longues années d'études
partagées entre bonheur, satisfaction
et parfois certaines épreuves.*

Je dédie ce mémoire

*A mon adorable maman **FATIHA***

*qui a tout sacrifier pour me procurer amour
et affection qui continue à être à mes côtés à tout instant*

*A mon aimable papa **ELKHIARI***

*qui s'est consacré pleinement
à notre bien être avec bonté et tendresse.*

A mes frères et sœurs :

BILAL, BADIS, SARA, MASSIKA** et **MANAL

*Tous leurs enfants, et toute la famille **CHEBBAH***

*A mes sincères amies: **ZAHIA, FATIMA, IBTISSEM MINGO,
DALILA, SOUHEILA, MARWA, AMINA, KHADIDJA, SAMAH.***

*et spécialement **MAMIYOO***

A toutes mes amies de Mila

*A mes collègues de la promotion **M II GG 2017***

*A ma collègue à chère sœur : **MAHA***

Wahiba

Dédicace

*Ce modeste travail, fruit de cinq années passées
au seuil du savoir est dédié*

*A ma mère **Hassina** en témoignage de ma reconnaissance et ma profonde
affection*

*A mon père **Abdelhamid** à qui je dois tout.*

*Leur grande générosité, leur bonté et leur constantes disponibilité
particulièrement dans les moments difficiles, leur sacrifice aussi. Toutes ces
valeurs ne me laissent pas indifférente.*

*A mon cher fiancé **Youcef Djihad** l'homme de ma confiance qui m'a donné
courage et soutien pour atteindre mon but*

*A mes chers frères **Abderraouf, Ilyes, farouk** et sa fiancée **Hanan***

Ames chères amies

*Imen, Zahiya, Fatima, Ibtissem, Asma, Samah, Dalila, Bissam, Kouka, Souhila, Marwa
Amina et spécialement NAHLA.*

A tous mes collègues de la promotion M II GG 2017.

*A ma collègue à chère sœur : **WAHIBA**.*

*Aux familles **Bourouma, Boukazzoula** et **Boulghalegh**.*



Résumé

Dans le cadre de la réutilisation des sols plastiques dans la réalisation des remblais routiers et afin de préserver les géo-ressources, le présent travail consiste à une étude expérimentale des paramètres et facteurs pertinents qui gouvernent le comportement en laboratoire de quelques sols plastiques extraits de la région de Jijel (nord-est Algérien) traités à la chaux et/ou aux liants hydrauliques.

Ce mémoire dresse en premier lieu une revue bibliographique de quelques travaux de recherche sur la stabilisation des sols plastiques. Il présente par la suite, une étude en laboratoire sur deux types de sol plastique (argiles et marnes) stabilisés selon divers dosages de chaux, de ciment et dans un troisième volet selon un traitement mixte chaux-ciment. Les résultats obtenus montrent que l'incidence du traitement par la chaux rend le mélange moins sensible à l'eau d'où l'aplatissement de la courbe Proctor et l'augmentation de la teneur en eau optimale. Contrairement à l'utilisation du ciment où du traitement mixte (chaux-ciment) ou la teneur en eau du mélange sol-ciment ou sol-chaux-ciment se trouve abaissée, en revanche on ne note pas de modifications importantes sur la courbe Proctor.

Mots-clés : liants hydrauliques, argiles et marnes, teneur en eau, courbe Proctor

Abstract

As part of the reuse of plastic soils in road embankments and in order to preserve geo-resources, this work consists of an experimental study of the relevant parameters and factors that govern the laboratory behavior of some plastic soils extracted from the soil. Region of Jijel (North-East of Algeria) treated with lime and / or hydraulic binders.

This paper firstly provides a bibliographical review of some research on the stabilization of plastic soils. It then presents a laboratory study on two types of plastic soil (clays and marls) stabilized according to various dosages of lime, cement and in a third shutter according to a mixed lime-cement treatment. The results obtained show that the incidence of lime treatment makes the mixture less sensitive to water, hence the flattening of the Proctor curve and the increase in the optimum water content. Unlike the use of cement or mixed lime-cement or the water content of the soil-cement or soil-lime-cement mixture is lowered, on the other hand, there are no significant changes in the Proctor curve.

Keywords: hydraulic binders, clays and marls, optimum water content, Proctor curve.

ملخص

كجزء من إعادة استخدام الأتربة الطينية في تنفيذ السدود والحفاظ على الموارد الجيولوجية. هذا العمل هو عبارة عن دراسة تجريبية للعوامل التي تحكم سلوك مختبر لبعض الأتربة الطينية في منطقة جيجل (شمال شرق الجزائر) معالجة بالجير والإسمنت.

وتستند هذه المذكرة في مقامها الأول الى استعراض بيليوغرافي لبعض البحوث على استقرار هذه الأتربة الطينة متمثلة في دراسة نوعين من التربة (الطين والمارن) والتي استقرت وفقا لنسب مختلفة من الجير والإسمنت ،وعنصر ثالث مختلط بكميات متساوية من الروابط السابق ذكرها .

وتظهر لنا النتائج أن العلاج بالجير يجعل من الخليط أقل حساسية من الماء وزيادة في نسبة محتوى الماء الأمثل بحيث يجعل من منحنى بروكتور مسطح أكثر .

على عكس ذلك فإن استخدام الإسمنت أو المعالجة المختلطة (الجير - الإسمنت) او محتوى الماء في التربة مع الإسمنت أو التربة مع الإسمنت والجير ،فإن كمية محتوى الماء الأمثل منخفضة ولا نلاحظ أي تغيرات على منحنى بروكتور .

الكلمات المفتاحية: دمك، الجير والإسمنت، الطين والمارن، محتوى الماء الأمثل، منحنى بروكتور .

Sommaire

Introduction Générale.....	1
----------------------------	---

Chapitre 1 : Etude bibliographique

1.1. Introduction	3
1.2. Développement des techniques de traitement des sols.....	4
1.3. Domaines d'application.....	5
1.4. Processus de stabilisation	5
1.4.1. Utilisation de la chaux.....	6
1.4.2. Utilisation du ciment	6
1.4.3. Utilisation mixte chaux-ciment	7
1.5. Avantages des techniques de traitement des sols	8
1.5.1. Avantages techniques	8
1.5.2. Avantages économiques	8
1.5.3. Avantages écologiques et environnementaux	8
1.6. Les sols aptes au traitement.....	9
1.7. Quel liant et pour quel traitement ?.....	10

Chapitre 2 : Essai de compactage au laboratoire

2. 1. Introduction	11
2.2. Principe de l'essai Proctor normal et Proctor modifié (NF P 94-093)	11
2.3. Préparation des éprouvettes.....	12
2.4. Mode opératoire	13
2.4.1. Choix du type de moule	13
2.4.2. Exécution de l'essai.....	14
2.4.3. Présentation des résultats	16

Chapitre 3 : Matériels et exécution des travaux in-situ

3.1. Introduction	19
3.2. Matériels utilisés dans les chantiers de traitement des sols.....	19
3.2.1. Matériels de stockage	19

3.2.2. Matériels d'épandage	19
3.2.3. Matériels de malaxage.....	20
3.2.4. Matériels d'arrosage	21
3.2.5. Matériels de compactage	21
3.3. Conditions de mise en œuvre et exécution des travaux de traitement des sols	22
3.3.1. Préparation du sol à traiter	22
3.3.2. Ajustement de l'état hydrique du sol.....	22
3.3.3. Epandage du liant	23
3.3.4. Malaxage	23
3.3.5. Compactage partiel.....	24
3.3.6. Réglage.....	25
3.3.7. Compactage final.....	25
3.3.8. Protection de surface	26
3.4. Conclusion.....	26

Chapitre 4 :Étude expérimentale

4.1. Provenance et caractéristiques physiques des sols étudiés.....	27
4.1.1. Situation géographique et localisation des deux sites de prélèvement.....	27
4.1.2. Caractéristiques physiques des sols étudiés	28
4.2. Programme expérimental	32
4.3. Présentation des résultats expérimentaux.....	33
4.3.1. Effet du traitement avec la chaux et/ou le ciment sur les limites d'Atterberg	33
4.3.2. Effet du traitement avec la chaux et/ou le ciment sur les courbes Proctor.....	36
Conclusion Générale	43

Références bibliographiques

Annexes

Notations :

Paramètres	symboles
Poids volumique du sol	γ
Poids volumique de sol sec	γ_d
Poids volumique humide	γ_h
Poids volumique d'eau	γ_w
La teneur en eau	W
La teneur en eau optimum	W_{opt}
Le degré de saturation	S_r
Limite de plasticité	W_p
Limite de liquidité	W_L
Indice de plasticité	I_p
Indice de consistance	I_c

Liste des figures

Figure 1.1. Classification des matériaux	9
Figure 2.1. Appareillage Proctor et C.B.R	14
Figure 2.2. Schéma de principe de la répartition des coups de dame sur une couche	15
Figure 2.3. Courbe expérimentale schématique d'un essai Proctor.....	17
Figure 2.4. Courbe de compactage pour différents efforts de compactage sur un même sol	18
Figure 3.1. Matériel d'épandage : épandeur/tombereau articulé	20
Figure 3.2. Matériel de malaxage :engin pulvi-mixeur	21
Figure 3.3. Arroseuse enfouisseuse, équipée d'un débitmètre	22
Figure 3.4. Vue d'un chantier en préparation pour un traitement	22
Figure 3.5. La phase de l'épandage du liant sur le sol à traiter	23
Figure 3.6. Le malaxage du liant avec le sol	24
Figure 3.7. L'opération du compactage partiel.....	25
Figure 3.8. Compactage final des sols traités	25
Figure 3.9. Protection de surface de la couche traitée	26
Figure 4.1. Situation géographique des deux sites de prélèvement (Extrait de la carte topographique de Djidjelli N°28 feuille 3-4 à l'échelle 1/25.000).....	27
Figure 4.2. Représentation des limites d'Atterberg	29
Figure 4.3. Classification des sols étudiés par le diagramme de plasticité de Casagrande	30
Figure 4.4. Influence du traitement à la chaux sur les courbes Proctor des argiles	38
Figure 4.5. Influence du traitement à la chaux sur les courbes Proctor des marnes	38
Figure 4.6. Influence du traitement au ciment sur les courbes Proctor des argiles	39
Figure 4.7. Influence du traitement au ciment sur les courbes Proctor des marnes.....	40
Figure 4.8. Influence du traitement mixte (chaux + ciment) sur les courbes Proctor des argiles.....	41
Figure 4.9. Influence du traitement mixte (chaux + ciment) sur les courbes Proctor des marnes.....	41

Liste des tableaux

Tableau 2.1. Dimensions des moules Proctor et CBR.....	13
Tableau 2.2. Modalités d'exécution des essais Proctor normal et modifié	14
Tableau 2.3. Quantité du sol utilisé pour chaque couche	15
Tableau 4.1. Coordonnées géographiques des deux sites de prélèvement	28
Tableau 4.2. Caractéristiques physiques des deux sols utilisés dans la présente étude.....	28
Tableau 4.3. Résultats des essais des limites d'Atterberg	29
Tableau 4.4. Consistance du sol en fonction de l'indice I_P	30
Tableau 4.5. Classification des sols en fonction de l'indice I_P	30
Tableau 4.6. Consistance du sol en fonction de l'indice I_C	30
Tableau 4.7. Évaluation du potentiel de gonflement en fonction d' I_P	31
Tableau 4.8. Estimation du potentiel de gonflement en fonction d' I_P des deux sols étudiés	31
Tableau 4.9. Résultats de l'essai au bleu de méthylène sur les deux sols étudiés	31
Tableau 4.10. Classification des sols en fonction de VBS	32
Tableau 4.11. Classification GTR des sols étudiés	32
Tableau 4.12. Détail du programme expérimental.....	33
Tableau 4.13. Résultats des limites d'Atterberg pour l'échantillon d'argile	33
Tableau 4.14. Résultats des limites d'Atterberg pour l'échantillon de marnes	34
Tableau 4.15. Effet de l'ajout de chaux sur les limites d'Atterberg du sol argileux	34
Tableau 4.16. Effet de l'ajout de chaux sur les limites d'Atterberg du sol marneux	34
Tableau 4.17. Effet de l'ajout de ciment sur les limites d'Atterberg du sol marneux	35
Tableau 4.18. Effet de l'ajout de ciment sur les limites d'Atterberg du sol argileux.....	35
Tableau 4.19. Effet du traitement mixte (chaux et ciment) sur les limites d'Atterberg des argiles	36
Tableau 4.20. Effet du traitement mixte (chaux et ciment) sur les limites d'Atterberg des marnes	36
Tableau 4.21. Teneur en eau optimale des sols traités à la chaux	39
Tableau 4.22. Teneur en eau optimale des sols traités à la chaux et au ciment.....	42



***Introduction
Générale***

Introduction Générale

La technique du traitement des sols est connue depuis de longue date (muraille de Chine, chaussées romaines, etc.). A travers le monde, elle a été utilisée à grande échelle dans les années 1960 (Bereterbide et Puiatti 1990, CRR 2010). Alors que, jusqu'aux années 1970, la technique du traitement des sols a essentiellement intéressé la réutilisation en remblai des sols sensibles à l'eau et/ou humides, notamment lors de la réalisation des grands chantiers autoroutiers ou des pistes et d'aires d'aéroports. Par la suite, la technique s'est étendue à la réalisation des couches de forme, en commençant par la réutilisation des sols fins, plus particulièrement des limons, puis progressivement une gamme de plus en plus étendue de matériaux comme les graves argileuses, voire les mélanges de sols fins avec des éléments caillouteux ou des graves naturelles (Rossi et al. 2008).

La recherche des zones de dépôts et d'emprunts à des distances économiquement rentables et préservant l'harmonie naturelle des paysages, devient de plus en plus problématique pour les chantiers de terrassement ; ces difficultés, associées à l'optimisation du mouvement des terres et au respect des délais d'exécution (aléas climatiques) ont privilégié au cours des deux dernières décennies la technique de traitement des sols (Bereterbide et Puiatti 1990).

Dans ce mémoire nous nous intéressons au traitement des sols à la chaux et/ou au ciment qui est une technique éprouvée et parfaitement au point, qui a connu un très fort développement depuis une vingtaine d'années. Selon le centre d'information sur le ciment et ses applications, ce développement est dû essentiellement à deux causes (CIM béton, 2004 et 2009) : **La première** est liée à des impératifs économiques associés à un souci écologique croissant. En effet, alors que les profils géométriques des projets routiers deviennent de plus en plus contraignants et demandent des mouvements de terre importants dans des sols parfois difficilement réutilisables, les gisements naturels de matériaux nobles, inégalement répartis, s'épuisent. Il convient donc d'épargner les ressources existantes, d'autant plus que le coût du transport est élevé. Ajouté à ces impératifs économiques, son succès actuel est dû également à l'apparition d'un nouveau contexte prenant en compte l'amélioration du cadre de vie et la protection de l'environnement, notamment dans la limitation de la constitution de décharges de matériaux impropres à la réutilisation et la préservation des ressources naturelles utilisées par les techniques dites traditionnelles dans

l'exécution des remblais et des couches de forme. **La seconde** cause repose sur les progrès technologiques réalisés ces dernières années par les matériels de traitement. Les perfectionnements énormes apportés aux matériels d'épandage et de malaxage et l'augmentation du parc de matériel de traitement ainsi que sa diversification ont permis d'améliorer sensiblement les rendements et la qualité du travail réalisé.

Dans le cadre de la réutilisation des sols plastiques dans la réalisation des remblais routiers et afin de préserver les géo-ressources, le présent travail consiste à une étude expérimentale des paramètres et facteurs pertinents qui gouvernent le comportement en laboratoire de quelques sols plastiques extraits de la région de Jijel (nord-est Algérien) traités à la chaux et/ou aux liants hydrauliques.

CHAPITRE 1

Étude bibliographique



1.1. Introduction

La prise en compte des problématiques de développement durable tend à modifier les pratiques des entreprises de terrassement. La valorisation de l'ensemble des matériaux naturels extraits dans l'emprise d'un chantier est devenue une priorité au même titre que la réduction de la consommation d'eau et d'énergie. Les techniques de traitement des sols à la chaux ou aux liants hydrauliques sont couramment utilisées afin d'améliorer les caractéristiques géotechniques des sols et de limiter les emprunts de matériaux extérieurs (Sahraoui et Rouikha, 2016). D'autre part, la construction des chaussées sur un remblai évolutif ou médiocre est l'un des problèmes les plus communs dans les projets routiers à travers le monde. L'approche habituelle de remplacer les sols argileux de faibles résistances par des sols plus résistants n'est plus compétitive ; car la recherche des zones de dépôts et d'emprunts à des distances et prix économiquement rentables et préservant l'harmonie naturelle des paysages, devient de plus en plus problématique pour les chantiers de terrassement. Ces contraintes à la fois économique et écologique ont conduit les ingénieurs à utiliser les techniques de stabilisation des sols en place.

Un matériau évolutif peut être défini comme un matériau dont les propriétés physiques et mécaniques évoluent dans le temps. Les sols qui ont un caractère évolutif sont généralement les sols fins tels que les argiles et les marnes qui peuvent être à l'origine de plusieurs types de désordres dans les ouvrages géotechniques tels que le tassement, le gonflement ou le glissement (Mellal et Lamri, 2010).

L'ajout de la chaux aux sols argileux permet de réduire la sensibilité des sols à l'eau par une augmentation immédiate de la limite de plasticité W_P , la limite de retrait W_r et la valeur de la teneur en eau optimale W_{opt} , une réduction de l'indice de plasticité et de retrait, la valeur au bleu de méthylène et la valeur maximale de la masse volumique sèche, avec une conservation de la valeur de la limite de liquidité W_L (Yucel et al., 2007 ; Bengraa, 2004 ; Afes, 2003, Koliass et al., 2005). A long terme, la chaux implique une augmentation de l'indice CBR, de la résistance à la compression R_c et une diminution des paramètres de compressibilité (indice de compressibilité C_c et indice de gonflement C_g (Yi et al., 2006 ; Deneele, 2008 ; Afes, 2003 ; Raymond et Vahid, 2007 ; Koliass et al., 2005). L'amélioration du comportement des sols traités est justifiée par la présence des réactions chimiques entre les minéraux argileux et la chaux hydratée, un changement cationique puis

une floculation qui sont responsables de l'amélioration des propriétés physiques et une réaction pouzzolanique qui donne les deux principaux agents de cimentation qui sont les responsables de la solidification du sol par la suite (Bengraa, 2004). Les réactions de stabilisation peuvent être bloquées par le risque de formation des deux minéraux expansifs nommés ettringite ⁽¹⁾ et thaumasite² qui sont dues à la présence du sulfate dans le sol (Mellal et Lamri, 2010).

1.2. Développement des techniques de traitement des sols

Le traitement des sols avec un liant est une technique qui consiste à incorporer, au sein du sol, un élément d'apport avec éventuellement de l'eau et de les mélanger in situ, jusqu'à l'obtention d'un matériau homogène pour lui conférer des propriétés meilleures. Il s'agit d'un traitement qui utilise les affinités chimiques du sol et du liant, par opposition au traitement mécanique, comme le compactage, qui peut se superposer au premier.

Le traitement des sols pour l'exécution des remblais et des couches de forme, a pour objet de rendre utilisable un sol qui ne présente pas les caractéristiques requises pour servir sans préparation, à supporter une assise de chaussée, de parking ou de plate-forme (Routes, 2004).

Les avancées de ces techniques sont impressionnantes, elles se basent essentiellement sur les éléments suivants (Rossi et al ;2008) :

- La progression des méthodologies et procédés ;
- La connaissance de la nature et la maîtrise du comportement des matériaux,
- L'apparition de nouveaux liants hydrauliques, spécialement adaptés au traitement de différentes classes de matériaux ;
- Les progrès enregistrés sur les matériels, en matière de malaxage, de précision de dosage et de guidage et, également, les progrès accomplis sur la maîtrise de la teneur en eau.

⁽¹⁾ L'**ettringite** est une espèce minérale, composée de sulfate de calcium et d'aluminium hydraté, de formule : $\text{Ca}_6\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3(\text{OH})_{12}\cdot 26\text{H}_2\text{O}$ (Wikipédia).

⁽²⁾ **Thaumasite** est un minéral silicate de formule : $\text{Ca}_3\text{Si}(\text{OH})_6(\text{CO}_3)(\text{SO}_4)\cdot 12\text{H}_2\text{O}$. Il se présente sous la forme de cristaux hexagonaux prismatiques incolores à blanc (Wikipédia).

1.3. Domaines d'application

Le développement des techniques de réalisation des traitements s'applique aux ouvrages en remblais, aux plates-formes supérieures de terrassement, aux couches de forme et couches de fondation notamment.

Le domaine d'activité le plus concerné est celui des infrastructures routières et autoroutières. Les techniques de traitement se sont développées également dans le domaine ferroviaire. D'autres applications importantes interviennent sur les pistes d'aérodromes, ou même sur des plates-formes portuaires, industrielles ou logistiques. Très peu d'applications sont connues dans les ouvrages en terre d'aménagements hydrauliques tels que : endiguements, canaux et barrages (Rossi et al ; 2008).

1.4. Processus de stabilisation

La plupart des sols requièrent souvent une certaine stabilisation afin d'améliorer leur stabilité mécanique et leur performance. La technique de stabilisation la plus utilisée est le compactage physico-mécanique qui augmente la stabilité mécanique du sol traité (Little, 1995 ; Légère, 2001 ; Sahraoui et Rouikha, 2016 et bien d'autres). Par contre, le compactage à lui seul n'est pas toujours suffisant surtout dans le cas des sols à granulométrie fine.

Une autre forme de stabilisation peut se faire simplement en modifiant la courbe granulométrique du sol. Il s'agit de la correction granulométrique en mélangeant avec le sol des granulats de différentes dimensions pour lui donner une granulométrie étalée.

Pour les granulats fins, on peut citer la stabilisation électrochimique. Cette dernière est réalisée par l'ajout d'une huile sulfurée au sol traité. La stabilisation électrochimique a été utilisée sur plusieurs routes en Asie, en Amérique du Sud et en Europe depuis environ 30 ans (Puffer et al ; 1983).

La stabilisation chimique (ou physico-chimique) est aussi une des techniques dont le but est d'améliorer les propriétés mécaniques des sols argileux. En effet, ces pratiques de stabilisation sont utilisées depuis plusieurs millénaires. A cette époque, les pyramides de

Shersi au Tibet ⁽³⁾ étaient construites à partir d'un mélange de chaux et d'argile compactée (Rogers et al ; 1996). Aujourd'hui, ces divers produits et techniques de traitement font partie d'une pratique courante dans les travaux publics et le génie civil à travers le monde. La chaux, le ciment et les cendres volantes sont les produits stabilisants les plus couramment utilisés.

1.4.1. Utilisation de la chaux

Depuis plusieurs décennies, l'utilisation de la chaux pour stabiliser les argiles a connu beaucoup de succès. En effet, plusieurs études ont démontré que les propriétés mécaniques d'un sol traité à la chaux peuvent être modifiées de façon permanente (Biczysko, 1996 ; Greaves, 1996 ; Kelley, 1988 ; Afes, 2003 ; Koliass et al ; 2005, Yi et al ; 2006, Raymond et Vahid 2007, Deneele 2008). Un sol stabilisé à la chaux fournit une rigidité et performance structurale presque équivalente à celle d'une couche de fondation en gravier (Little, 1995).

Lors de l'ajout de la chaux à un sol fin, deux principales réactions sont initiées (Moore, 1987) : d'abord l'échange cationique et la floculation modifient la plasticité, la maniabilité, la résistance et les propriétés de déformation du sol traité. Ces deux premières réactions constituent une modification à la structure mécanique du sol. Une telle modification peut généralement être atteinte avec aussi peu que 1 % de chaux. Ensuite, un deuxième type de réactions appelées réactions pouzzolaniques, constitue la période de stabilisation. Durant cette réaction, le mélange chaux-argile forme des agents de cimentation qui augmentent la résistance ainsi que la durabilité du mélange. Les réactions pouzzolaniques dépendent de la température et évoluent avec le temps.

1.4.2. Utilisation du ciment

Le Ciment est un autre produit qui peut être utilisé pour la stabilisation de certaines catégories de sols dans les projets routiers. En tant que stabilisant, il existe plusieurs similarités entre la chaux et le ciment, malgré cette ressemblance, certaines distinctions doivent être connues avant de faire le choix entre les deux. Ces différences incluent la

⁽³⁾ Le **Tibet**, ou anciennement **Thibet** est une région de plateau située au nord de l'Himalaya en Asie, habitée traditionnellement par les Tibétains. Le Tibet est le plateau habité le plus élevé de la planète, avec une altitude moyenne de 4 900 m (Wikipédia).

durabilité et la permanence des effets du traitement, la résistance initiale, le développement de la résistance en fonction du temps et le temps de cure (Légère, 2001).

Le processus de stabilisation initié par l'ajout du ciment à un sol argileux engendre quatre étapes distinctes (Prusinski et al ; 1999 ; Légère, 2001) : (a) l'échange cationique, (b) la floculation et l'agglomération de l'argile, (c) l'hydratation par cimentation, (d) les réactions pouzzolaniques.

1.4.3. Utilisation mixte chaux-ciment

L'ajout du ciment conjointement avec la chaux aide à améliorer les propriétés mécaniques du sol traité. Dans ce cas, le sol est traité dans un premier temps avec la chaux, en préparation à l'ajout du ciment. Cette première étape permet d'assécher le sol par absorption et évaporation de l'eau et nécessite seulement une faible application de chaux de l'ordre de 1% environ. Ce processus de modification réduit considérablement l'indice de plasticité ce qui rend le sol plus friable et donc plus maniable. Ensuite vient l'ajout du ciment pour procurer au mélange les pouzzolanes nécessaires afin que le sol puisse gagner de la résistance mécanique dans le temps. Les sols possédant un faible pourcentage d'argile, donc moins de silice et d'alumine, ont besoin de cet apport en ciment si les réactions pouzzolaniques (responsables de la stabilisation) sont désirées (Légère, 2001).

Little (1995), reporte que le ciment peut généralement être utilisé dans les mêmes types de sols que la chaux. Prusinski et al., (1999), confirme que le ciment peut stabiliser efficacement des sols ayant un indice de plasticité (I_p) pouvant atteindre la valeur de 50. Enfin, comparativement à un traitement à la chaux seule, Chaddock (1996) confirme que de plus grandes résistances ont été atteintes après sept jours sur une argile sableuse et une argile silteuse avec un traitement de chaux-ciment.

1.5. Avantages des techniques de traitement des sols

Le traitement des sols en place à la chaux et/ou au ciment ou au liant hydraulique routier (LHR) est une technique qui offre trois types d'avantages : techniques, économiques, écologiques et environnementaux (CIM Béton, 2004 et 2009).

1.5.1. Avantages techniques

Le traitement des sols en place à la chaux et/ou au liant hydraulique permet la réalisation en remblais et en couches de forme, d'une couche traitée homogène, durable et stable, présentant des caractéristiques mécaniques comparables à celles d'une grave-ciment ou grave hydraulique. En outre, cette technique assure une bonne répartition des charges sur le support, grâce à la rigidité de la nouvelle structure. Cette technique assure un bon comportement par temps chaud sans déformation, ni orniérage et un bon comportement vis-à-vis des cycles de gel-dégel, grâce à la rigidité du matériau et à l'effet de dalle induit. Enfin, le traitement des sols en place est une technique possédant une facilité d'adaptation aux contraintes d'exploitation.

1.5.2. Avantages économiques

Le traitement des sols en place à la chaux et/ou au liant hydraulique est une technique de traitement à froid, donc utilisant peu d'énergie. La réutilisation des matériaux en place est un facteur d'économie important puisqu'il réduit au minimum les déblais issus du décaissement, la mise en décharge, l'apport de granulats et le coût de leur transport. L'absence de transport de granulats ou des déblais en décharge contribue à la préservation du réseau routier situé au voisinage du chantier. Enfin, le traitement des sols en place est une technique très économique, notamment du fait de la durée plus courte des travaux par rapport à une solution avec décaissement.

1.5.3. Avantages écologiques et environnementaux

Le travail à froid réduit sensiblement la pollution et le rejet de vapeurs nocives dans l'atmosphère. En outre, cette technique permet une importante économie d'énergie globale, par la réduction des matériaux à transporter, des matériaux à mettre en décharge et donc une diminution des impacts indirects, des gênes à l'utilisateur et aux riverains et une réduction de la fatigue du réseau routier adjacent au chantier. La réutilisation des matériaux en place limite l'exploitation des gisements de granulats (carrières, ballastières), ressources naturelles non renouvelables. Ce qui contribue à préserver l'environnement.

1.6. Les sols aptes au traitement

Le mélange sol-liant doit être en adéquation avec la nature de son application (remblai ou couche de forme) et le niveau de performance recherchée. Ainsi une caractérisation du sol utilisé doit être effectuée. La norme **NF P 11-300** « *Classification de matériaux utilisables dans la construction des remblais et couches de formes d'infrastructure routières* » permet de classer les sols en fonction d'un certain nombre de paramètres (Figure 1.1) :

- Classe A - Sols fins,
- Classe B - Sols sableux et graveleux avec des particules fines,
- Classe C - Sols comportant des fines et des gros éléments,
- Classe D - Sols insensibles à l'eau.

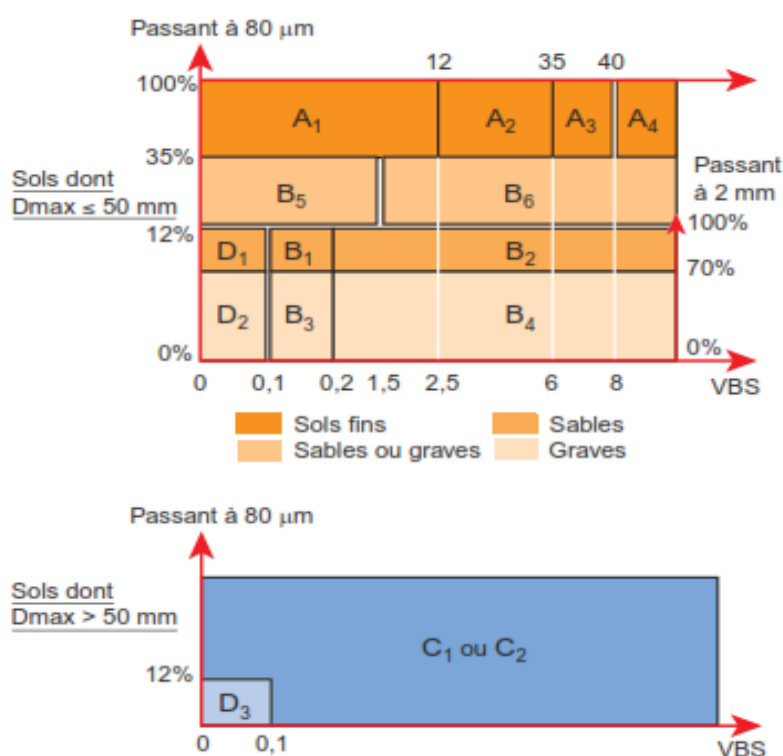


Figure 1.1. Classification des matériaux (norme NF P 11-300)

Le traitement est indiqué pour la plupart des sols des classes A, B et C, dans certaines conditions (élimination des gros éléments). Les sols de classe D peuvent nécessiter un traitement aux liants hydrauliques pour être utilisés en couche de forme (Rossi et al. 2008).

1.7. Quel liant et pour quel traitement ?

En fonction du type de sol à stabiliser et selon l'utilisation prévue pour le traitement (en couches de forme ou en remblais), il existe plusieurs types de traitements des sols qui ne diffèrent que par la nature du liant utilisé. Généralement les traitements les plus utilisés sont les suivants :

- Le traitement à la chaux (selon les normes **NF EN 459-1** et **NF P 98-101**) dans le cas de sols fins destinés à une utilisation en remblais ou en couches de forme ;
- Le traitement au ciment (selon la norme **NF EN 197-1**) ou au liant hydraulique routier (LHR) (selon les normes **NF P 15-108** et **ENV 13 282**) dans le cas de sols peu plastiques ou peu argileux destinés à une utilisation en remblais ou en couches de forme.
- Le traitement mixte à la chaux puis au ciment ou au liant hydraulique routier destiné à une utilisation en couches de forme.

CHAPITRE 2

L'essai de compactage au laboratoire



2. 1. Introduction

Le sol est l'un des matériaux le plus disponible sur site. Son utilisation dans la construction des barrages en terre, des routes, des aéroports et des lignes de chemin de fer est très économique. Toutefois, la mise des remblais au hasard sans aucune intention d'améliorer leur qualité entraîne la réalisation des structures instables. Il est donc très important de bien placer le matériau et de le compacter.

Le compactage est l'ensemble des opérations mécanique qui conduisent à accroître la densité en place d'un sol. Celle-ci est due essentiellement à la diminution de la quantité d'air dans ses pores. Le changement de volume d'eau n'est pas significatif, c'est ce qui différencie fondamentalement de la consolidation. Le but de compactage est de resserrer la texture du sol, réduire les possibilités de déformation, augmenter sa capacité portante et sa résistance au cisaillement (Chelghoum, 2006).

Le degré de compactage d'un sol se mesure en fonction de sa masse volumique sèche γ_d c'est à dire la masse de particules solides par unité de volume du sol. Si la masse volumique de sol est γ et la teneur en eau w alors la densité sèche est donnée par l'équation suivante :

$$\gamma_d = \gamma / (1 + w) \quad (2.1)$$

2.2. Principe de l'essai Proctor normal et Proctor modifié (NF P 94-093)

Le principe de ces essais consiste à humidifier un matériau à plusieurs teneurs en eau et à le compacter, pour chacune des teneurs en eau, selon un procédé et une énergie conventionnels. Pour chacune des valeurs de teneur en eau considérées, on détermine la masse volumique sèche du matériau et on trace la courbe des variations de cette masse volumique en fonction de la teneur en eau.

D'une manière générale cette courbe, appelée courbe Proctor, présente une valeur maximale de la masse volumique du matériau sec qui est obtenue pour une valeur particulière de la teneur en eau. Ce sont ces deux valeurs qui sont appelées caractéristiques optimales de compactage Proctor normal ou modifié suivant l'essai réalisé. Les deux essais

sont identiques dans leur principe, seules diffèrent les valeurs des paramètres qui définissent l'énergie de compactage appliquée.

2.3. Préparation des éprouvettes

La totalité du matériau prélevé est, si nécessaire, séchée à l'air ou dans une étuve réglée à 50°C maximum jusqu'à un état hydrique jugé suffisamment sec pour commencer l'essai. Après séchage, le matériau est tamisé à 20 mm et seul le tamisât est conservé pour l'exécution de l'essai. Le matériau est homogénéisé et divisé par appréciation visuelle en au moins cinq parts égales. Les parts sont humidifiées à une teneur en eau telle que les teneurs en eau de trois parts au moins et quatre au plus soient réparties entre :

$$0,8 w_{OPN} \text{ (ou OPM)} \text{ et } 1,2 w_{OPN} \text{ (ou OPM)} \quad (2.2)$$

Après humidification, chaque part est conservée en boîtes ou sacs hermétiques durant un temps fonction de l'argilosité du matériau pour parfaire la diffusion de l'eau. C'est à partir de chacune de ces parts que seront confectionnées les éprouvettes destinées à la détermination des points de la courbe Proctor. L'humidification de chacune des parts du matériau constitue la phase la plus délicate de l'essai.

La première difficulté est celle du choix des teneurs en eau à attribuer à chaque part étant donné que l'on ne connaît pas la w_{OPN} ou w_{OPM} du matériau. L'opérateur doit donc en estimer une valeur approchée. Pour cela, il a recours à des tests tactiles et visuels et son expérience est déterminante dans la justesse de cette estimation. À défaut d'une expérience suffisante, l'opérateur doit envisager une détermination de la courbe Proctor en plus de cinq points et préparer les quantités de matériaux et le nombre de parts en conséquence.

Une seconde difficulté réside dans les modalités d'incorporation de l'eau au sein du matériau qui dans tous les cas doit se faire lentement, de manière bien répartie à la surface du matériau et dans toute la mesure du possible à l'aide d'un pulvérisateur, en maintenant le malaxage pendant l'introduction de l'eau. En outre, ces modalités dépendent de l'argilosité des matériaux (définie selon la norme NF P 11-300) :

- dans le cas des matériaux sableux et graveleux, le malaxage peut se faire manuellement ou à l'aide de n'importe quel type de malaxeur. L'observation d'une durée de conservation pour homogénéisation de 15 min en boîtes ou sacs hermétiques est suffisante ;
- dans le cas des matériaux limoneux et sablo-limoneux, les modes de malaxage indiqués pour les matériaux sableux et graveleux sont conservés mais le temps de conservation en boîtes ou sacs étanches doit être porté à 2 h ou 3 h ;
- dans le cas des matériaux argileux, il convient d'abord de les réduire en une mouture 0/2 (évaluée de visu). L'exécution manuelle de cette opération est le plus souvent fastidieuse, elle peut être grandement facilitée par l'emploi d'un malaxeur-désagrégateur.

Le matériau réduit est ensuite humidifié à l'aide d'un pulvérisateur, tout en maintenant le malaxage. Celui-ci peut se faire manuellement ou plus avantageusement à l'aide du malaxeur-désagrégateur. Après introduction de l'eau et constatation visuelle d'une stabilisation du comportement du matériau sous l'action du malaxage, il est introduit dans des boîtes ou sacs hermétiques et conservé entre 24 h et 48 h selon l'argilosité.

2.4. Mode opératoire

2.4.1. Choix du type de moule

Le choix du type de moule (moule Proctor ou CBR) est imposé par la granularité du matériau et l'utilisation envisagée des résultats de l'essai. Leurs dimensions respectives sont aussi données dans le Tableau 2.1.

Tableau 2.1. Dimensions des moules Proctor et CBR

Moule Proctor	Moule C.B.R
Hauteur : 11,70 cm	Hauteur : 15,20 cm
Diamètre : 10,16 cm	Diamètre : 15,20 cm
Dimension des grains : ≤ 5 mm	Dimension des grains : $5 \text{ mm} \leq d \leq 20 \text{ mm}$

2.4.2. Exécution de l'essai

- Dans l'essai **Proctor normal**, un échantillon de sol à particules inférieures à 20 mm est compacté en 3 couches dans un moule standard (Figure 2.1) avec une certaine énergie fournie par une dame d'un poids de 2,5 kg tombant d'une hauteur constante.
- L'essai **Proctor modifié** été par la suite proposé par l'A.A.S.H.O⁽¹⁾ pour des échantillons de sol à particules inférieures à 37,5 mm est compacté en 5 couches dans le même moule mais avec une dame de 4,5 kg. Chaque couche est compactée pour une période de 60 secondes.

Le Tableau 2.2 donne les différentes caractéristiques pour les essais Proctor et Proctor modifié, où deux types de moules sont indiqués à savoir le moule Proctor et le moule C.B.R⁽²⁾.

Tableau 2.2. Modalités d'exécution des essais Proctor normal et modifié

Essai Proctor	Masse de la dame (kg)	Hauteur de chute (cm)	Nombre de coups par couche	Nombre de couches	Energie de compactage (kj/dm ³)
Normal	2,490	30,50	25 (moule PROCTOR)	3	0,59
			56 (moule CBR)	3	0,53
Modifié	4,535	45,70	25 (moule PROCTOR)	5	2,71
			56 (moule CBR)	5	2,41



Figure 2.1. Appareillage Proctor et C.B.R (moules avec accessoires)

⁽¹⁾ A.A.S.H.O : American Association of State Highway Officials.

⁽²⁾ C.B.R : Californian Bearing Ratio.

Pour les deux méthodes de compactage, l'essai est réalisé sur plusieurs échantillons chacun à une teneur en eau différentes, un nombre de 5 échantillons est recommandé. Mais il est préférable, si cela est possible, d'en obtenir un 6^{ème} échantillon. La quantité de sol à préparer pour réaliser 6 essais sera :

- Dans le cas d'utilisation du moule **Proctor** : $6 \times 2,5 \text{ kg} = 15 \text{ kg}$ de sol,
- Dans le cas du moule **C.B.R** : $6 \times 5,5 \text{ kg} = 33 \text{ kg}$ au moins.

La quantité de matériau à utiliser pour chaque couche est approximativement indiquée dans le Tableau 2.3 :

Tableau 2.3. Quantité du sol utilisé pour chaque couche

Moule	Essai Proctor normal (3 couches)	Essai Proctor modifié (5 couches)
Proctor	650 g	400 g
C.B.R	1700 g	1050 g

Le compactage s'effectue selon le schéma de la Figure 2.2, le nombre de coups par couche est :

- Pour le moule **Proctor** et par couche : **6 séquences de 4 coups** dans chaque quadrant et le **25^{ème} coup** au centre.
- Pour le moule **C.B.R** et par couche : **8 séquences de 7 coups** (six approximativement tangents à la périphérie et le 7^{ème} au centre).

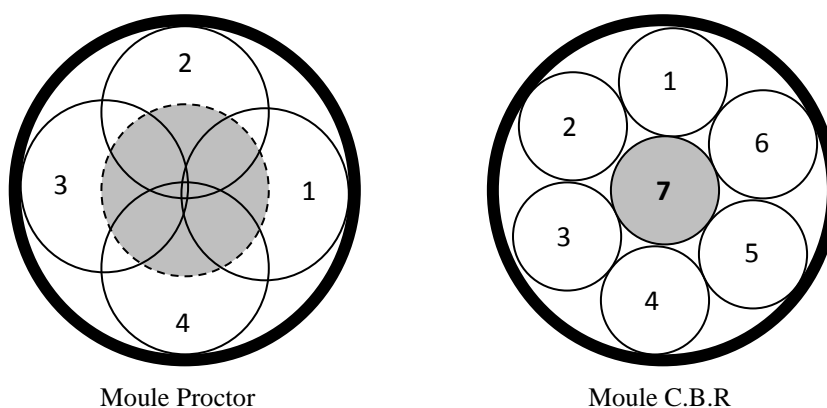


Figure 2.2. Schéma de principe de la répartition des coups de dame sur une couche

Remarques utiles au bon déroulement de l'essai :

- Avant introduction du matériau dans le moule il y a lieu de :
 - solidariser : moule, embase et rehausse ;
 - lubrifier le cas échéant les parois du moule ;
 - placer le disque d'espacement au fond du moule CBR lorsqu'il est utilisé ;
 - placer éventuellement un papier-filtre ou un film plastique au fond du moule Proctor ou sur le disque d'espacement du moule CBR pour faciliter le démoulage.

- Introduire alors la quantité de matériau pour que la hauteur de la première couche après compactage soit légèrement supérieure au tiers ou au cinquième de la hauteur du moule respectivement pour l'essai Proctor normal et pour l'essai Proctor modifié.

- Compacter cette couche avec la dame correspondante en appliquant respectivement 25 coups ou 56 coups par couche suivant le schéma de la Figure 2.2, et répéter l'opération autant de fois que l'exige le nombre de couches à réaliser.

Après compactage de la dernière couche, retirer la rehausse, le matériau doit alors dépasser du moule d'une hauteur d'un centimètre au maximum. Cet excédent est arasé soigneusement au niveau du moule en opérant radialement du centre vers la périphérie du moule. Si des éléments > 10 mm sont entraînés dans cette opération, en laissant des vides à la surface de l'éprouvette, combler ceux-ci avec des éléments fins qui sont lissés avec la règle à araser. Peser l'ensemble du moule avec le matériau, démouler l'éprouvette pour extraire un échantillon représentatif pour en déterminer la teneur en eau.

2.4.3. Présentation des résultats

Les résultats sont interprétés en traçant la courbe de la teneur en eau (w) mesurée après chaque essai en fonction du poids volumiques sec (γ_d) obtenu (Figure 2.3). Le tracé de cette courbe permet de déterminer la valeur maximale du poids volumique sec (γ_{dmax}) au quelle correspond la teneur en eau optimum (w_{opt}). C'est l'**optimum Proctor normal** (γ_{dmax}, w_{optn}) ou **modifié** (γ_{dmax}, w_{optm}).

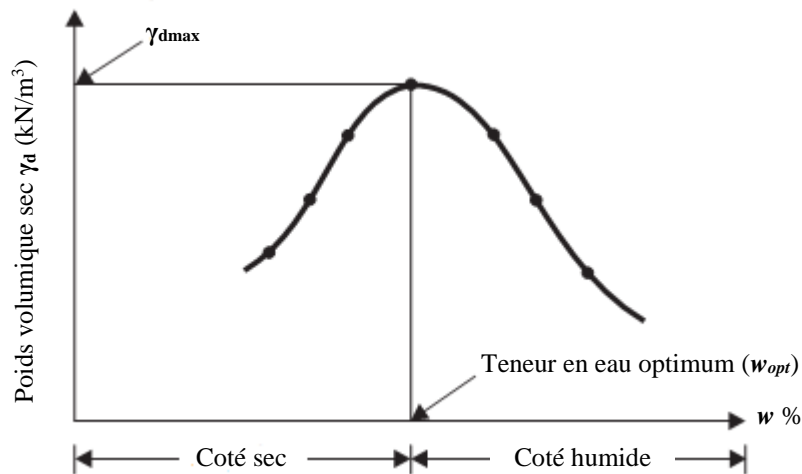


Figure 2.3. Courbe expérimentale schématique d'un essai Proctor

Si tout l'air contenu dans le sol est expulsé par le compactage, celui-ci sera dans un état de saturation complet ($S_r = 100\%$). La masse volumique sèche sera la valeur maximale possible pour une teneur en eau correspondante. Cette valeur maximale possible $\gamma_{d \max}$ est appelé « valeur de saturation » et peut être calculée par l'expression suivante :

$$\gamma_d = \frac{G_s}{1+w \cdot G_s} \gamma_w \quad (2.3)$$

En pratique il est impossible d'atteindre la valeur de saturation complète. Quel que soit la méthode et l'effort de compactage utilisé une quantité d'air demeure néanmoins dans le sol. Ainsi, la masse volumique sèche peut être exprimée comme suit :

$$\gamma_d = \frac{G_s(1-A)}{1+w \cdot G_s} \cdot \gamma_w \quad (2.4)$$

La Figure 2.4 (Chelghoum 2006) montre que les courbes de compactage pour différentes énergies de compactage sont toujours du côté gauche de cette ligne de saturation ($S_r = 100\%$).

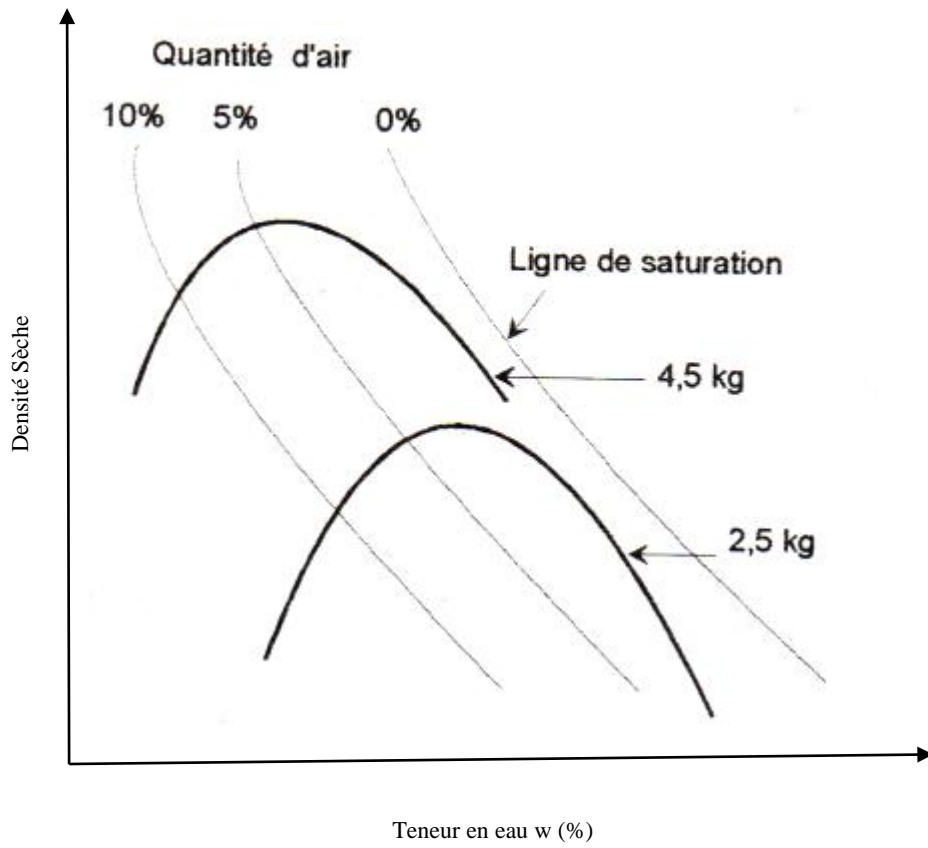


Figure 2.4. Courbe de compactage pour différents efforts de compactage sur un même sol

CHAPITRE 3

Matériels et exécution des travaux in-situ



3.1. Introduction

In-situ le traitement des sols se fait selon des conditions de mises en œuvre spécifiques et avec un matériel de chantier adapté. Ce matériel est en perpétuelle renouvellement et évolution afin de répondre continuellement aux nouveaux critères de précision (dosage en liants, épaisseur des couches, etc.), de fiabilité et à des exigences accrues en matière de sécurité et d'environnement (réductions des poussières notamment). Les matériels les plus représentatifs sont énumérés ci-après et traitent respectivement du stockage, de l'épandage, du malaxage, de l'arrosage et du compactage (Rossi et al ; 2008).

3.2. Matériels utilisés dans les chantiers de traitement des sols

3.2.1. Matériels de stockage

Les produits de traitement se présentent quasi exclusivement sous forme pulvérulente et sont livrés en vrac sur chantier par transport routier, à l'aide de silos tractés. Ils sont stockés soit dans des silos mobiles, adaptés aux chantiers de traitement en place ; soit dans des silos fixes, s'il s'agit de traitement en centrale. Les silos ont des contenances comprises entre 20 et 100 tonnes.

3.2.2. Matériels d'épandage

Les épandeurs de première génération, jusque vers les années 1980, étaient des engins à doseurs volumétriques. Ceux de deuxième génération étaient également des épandeurs à doseurs volumétriques, mais asservis à la vitesse de déplacement. Les épandeurs de dernière génération comportent les outils décrits ci-avant et disposent en outre, de l'ajustement des quantités de liant à l'aide de dispositifs pondéraux (Figure 3.1).



Figure 3.1. Matériel d'épandage : épandeur/tombereau articulé (Rossi et al., 2008)

3.2.3. Matériels de malaxage

Les malaxeurs sont de différentes natures. On distingue : les roto-bèches, les malaxeurs à outils fixes ou animés, les centrales de malaxage.

(a) Roto-bèches : ce sont des engins issus du domaine agricole, adaptés en fonction des besoins au domaine du génie civil.

(b) Malaxeurs à outils fixes : les malaxeurs de ce type sont réservés au traitement des sols avec de la chaux vive pour leur utilisation dans les corps des remblais, hors zones spécifiques (pistes, base, etc.). Il s'agit : des charrues à disques, des charrues à socs, des engins à lames (bouteurs, niveleuses).

(c) Malaxeurs à outils animés : les malaxeurs de première génération, à axe horizontal, ont leur chambre de malaxage à l'arrière de l'appareil. Ceux des générations suivantes ont leur chambre de malaxage située entre les trains avant et arrière. Les améliorations concernant les dernières générations d'appareils ont essentiellement porté sur : la profondeur de malaxage (aujourd'hui de l'ordre de cinquante centimètres) ; la puissance des engins (jusqu'à six cents chevaux) et l'amélioration des outils d'attaque au sol.

Certains malaxeurs sont équipés d'un système d'injection d'eau disposé à l'intérieur de la chambre de malaxage, ainsi que d'un système de guidage GPS (Figure 3.2).



Figure 3.2. Matériel de malaxage : engin pulvi-mixeur (Rossi et al., 2008)

(d) Centrales de malaxage : l'emploi des centrales de malaxage est recommandé pour le malaxage des matériaux des couches de fondation et des couches de forme de type PF4 (selon la définition du GTR ⁽¹⁾) et, le cas échéant, elles peuvent être appropriées pour le malaxage des matériaux de couche de forme de type PF3.

3.2.4. Matériels d'arrosage : la gamme de matériel généralement utilisée est la suivantes : citerne d'eau équipée d'une queue de carpe ; citerne d'eau équipée d'une rampe d'arrosage avec ou sans débitmètre, avec ou sans système d'asservissement ; arroseuse enfouisseuse généralement équipée d'un débitmètre, avec ou sans système d'asservissement (Figure 3.3).

3.2.5. Matériels de compactage : in-situ le compactage des terrains se fait en plusieurs couches d'épaisseur qui peuvent variées de 75 mm à 450 mm. Le compactage de ces couches de faibles épaisseurs dépend de la nature et l'importance du travail à effectuer. Chaque couche est compactée à un standard spécifique utilisant des engins mécaniques. L'équipement utilisé dépend du type de sol (et de l'équipement disponible chez l'entrepreneur). A titre d'exemple nous citons : les rouleaux tandem, les compacteurs pneumatiques, les rouleaux à grilles, les rouleaux à pied de mouton, les rouleaux de compactage par percussion, etc. (Sahraoui et Rouikha, 2016).

⁽¹⁾ GTR : Guide technique pour la réalisation des remblais et couches de formes.



Figure 3.3. Arroseuse enfouisseuse, équipée d'un débitmètre (Rossi et al., 2008)

3.3. Conditions de mise en œuvre et exécution des travaux de traitement des sols

Nous présentons dans cette partie une chronologie type du traitement d'un sol sur chantier. L'exécution type des travaux de traitement suit, généralement, le processus suivant (CIM Béton, 2004 et 2009) :

3.3.1. Préparation du sol à traiter

Cette opération, visant à faciliter le malaxage ultérieur, elle consiste à procéder à l'ouverture du sol au scarificateur ou au ripper (Figure 3.4).



Figure 3.4. Vue d'un chantier en préparation pour un traitement (CIM Béton, 2004 et 2009).

3.3.2. Ajustement de l'état hydrique du sol

Une teneur en eau optimale est indispensable pour obtenir, après compactage du mélange sol-liant, une densité maximale. Ainsi, il est possible soit d'assécher le sol par brassage

mécanique, soit de l'humidifier avec une arroseuse avec rampes à eau, gicleurs ou systèmes enfouisseurs.

3.3.3. Epandage du liant

Pour réduire et maîtriser la dispersion du liant (Figure 3.5), il est préférable de retenir, dans le cas de chantiers moyens ou importants, un épandeur à dosage pondéral, asservi à la vitesse d'avancement. Le contrôle de la régularité de l'épandage et de la quantité des liants est réalisé par la méthode dite « à la bêche ».



Figure 3.5. La phase de l'épandage du liant sur le sol à traiter (CIM Béton, 2004 et 2009).

3.3.4. Malaxage

Pour assurer une bonne homogénéité du matériau et une profondeur importante du malaxage, il est judicieux de retenir un malaxeur ou un pulvi-mixer à rotor horizontal. D'autre part, le malaxage foisonnant énormément les matériaux, il faut donc veiller lorsqu'on traite par bandes jointives à mordre suffisamment (environ 20 cm) dans la partie déjà foisonnée, pour ne pas laisser de matériau non malaxé en bordures de bandes (Figure 3.6).



Figure 3.6. Le malaxage du liant avec le sol (CIM Béton, 2004 et 2009).

3.3.5. Compactage partiel

La qualité du compactage est déterminée par un objectif de densification. Ainsi, pour le compactage des remblais, l'objectif de densification est une énergie de compactage qui correspond succinctement à 95 % de la densité optimale de l'essai Proctor Normal et pour le compactage des couches de forme, il est une énergie de compactage qui correspond succinctement à 98,5 % de la densité optimale de l'essai Proctor Normal. Le guide technique Sétra / LCPC sur la « *Réalisation des remblais et des couches de forme* » (GTR) de septembre 1992 donne une détermination pratique des conditions de compactage, sur la base du paramètre Q/S , "épaisseur unitaire de compactage" (Q étant le volume de sol compacté pendant un temps donné et S la surface balayée par le compacteur pendant le même temps). L'atelier de compactage, ainsi que le nombre de passes nécessaires, seront définis sur une planche d'essais de compactage, en respectant les épaisseurs de couches à compacter et en appliquant un plan de balayage répartissant l'énergie de compactage sur toute la surface de la couche. Le compactage partiel (Figure 3.7) doit suivre sans tarder la fin du malaxage pour ne pas laisser un matériau foisonné exposé aux intempéries et doit apporter 70 à 80 % de l'énergie exigée pour obtenir la qualité de compactage recherchée suivant la couche considérée.



Figure 3.7. L'opération du compactage partiel (CIM Béton, 2004 et 2009).

3.3.6. Réglage

Le réglage définitif doit se faire par rabotage sur toute la largeur à régler et en aucun cas par comblement des points bas par les matériaux provenant de l'écrtage des bosses. Il se fait le plus souvent à la niveleuse. Les matériaux provenant du rabotage doivent être évacués. L'épaisseur à raboter doit être prise en compte au stade du traitement, en prévoyant une surépaisseur suffisante du matériau traité (environ 3 cm).

3.3.7. Compactage final

Il doit être réalisé immédiatement après le réglage final (Figure 3.8) et, dans tous les cas, avant expiration du délai de maniabilité du mélange sol-liant, pour apporter le complément de l'énergie exigée pour obtenir la qualité de compactage recherchée suivant la couche considérée.



Figure 3.8. Compactage final des sols traités (CIM Béton, 2004 et 2009).

3.3.8. Protection de surface

Cette protection superficielle (en général, un enduit gravillonné à l'émulsion de bitume) est destinée à imperméabiliser et à protéger la couche traitée des intempéries, de l'évaporation de l'eau et du trafic (Figure 3.9). Elle doit être réalisée dans les plus brefs délais après la fin du compactage final.



Figure 3.9. Protection de surface de la couche traitée (CIM Béton, 2004 et 2009).

3.4. Conclusion

Les travaux de construction des remblais et des couches de formes représentent une part importante du coût global de réalisation des projets routiers. Cette importance justifie une recherche d'optimisation globale, visant à minimiser les coûts. L'optimisation des solutions techniques consiste, d'abord, en un choix judicieux de tracé en plan et de profil en long des terrassements pour limiter au maximum les mouvements de terre en fonction de la qualité des matériaux exigés. Optimiser, c'est aussi déterminer le couple couche de forme/chaussée le mieux adapté. Sachant que la couche de forme peut jouer un rôle structurel, on a donc intérêt à privilégier ses performances par la technique de traitement des sols à la chaux et/ou aux liants hydrauliques. D'autant plus qu'elle est une technique éprouvée et parfaitement au point, grâce notamment aux progrès réalisés dans la connaissance des sols et à l'innovation des constructeurs de matériels de Travaux Publics et leurs nouveaux matériels encore plus puissants et performants.

CHAPITRE 4

Étude expérimentale



4.1. Provenance et caractéristiques physiques des sols étudiés

4.1.1. Situation géographique et localisation des deux sites de prélèvement

Dans cette étude nous avons utilisé deux types de sol provenant de deux endroits différents (Figure 4.1.) dans la Wilaya de Jijel (Nord-Est Algérien), à savoir :

- **Sol marneux** : prélevé dans la région de *T'Hourat* située au sud de la ville de Jijel. C'est un sol fins, carbonaté représenté par de fines particules d'argile carbonatée ou « marne » de couleur sombre à bleu-gris où les particules siliceuses sont très rares.
- **Sol argileux** : prélevé au niveau du site de l'université Mohammed Seddik Benyahia (pôle de Jijel). C'est un matériau fin constitué d'argile glaise rubanée gris verdâtre et jaunâtre plus ou moins malléable et comportant de rares concrétions d'oxydes minéraux.

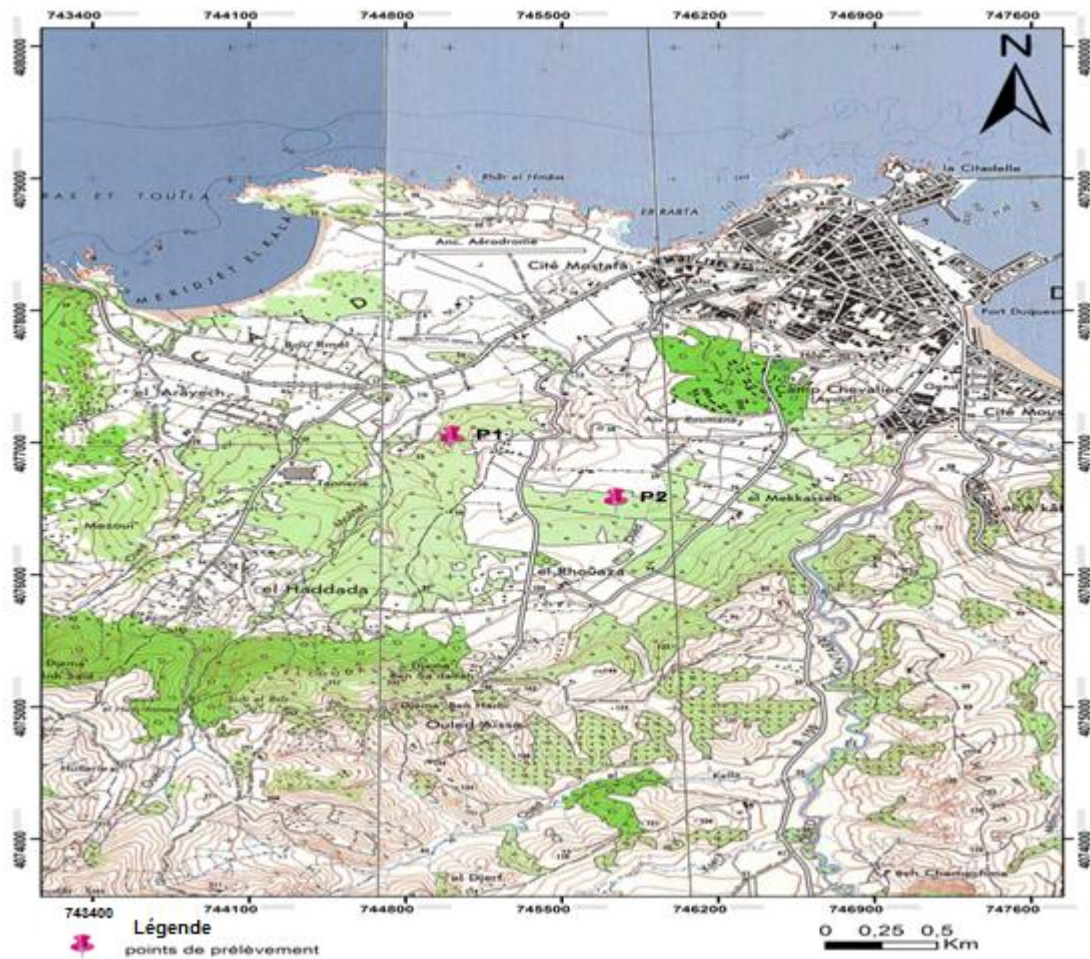


Figure 4.1. Situation géographique des deux sites de prélèvement
(Extrait de la carte topographique de Djidjelli N°28 feuille 3-4 à l'échelle 1/25.000)

Les coordonnées géographiques de ces deux sites de prélèvement sont présentées dans le Tableau. 4.1 :

Tableau 4.1. Coordonnées géographiques des deux sites de prélèvement.

Coordonnées géographiques		
Sites de prélèvement	Longitude	Latitude
Université MSB (pôle de Jijel)	745735,32	4076462,41
Localité de T'Hourat	745001,28	4076934,59

4.1.2. Caractéristiques physiques des sols étudiés

L'ensemble des essais de laboratoire a été réalisé au laboratoire des matériaux du département des Sciences de la Terre et de l'Univers de l'Université Mohamed Seddik Benyahia de Jijel.

(a) Poids volumique et teneur en eau des sols étudiés :

Nous avons commencé par la détermination des teneurs en eau (NF P 94-050) et chaque sol a un poids volumique (NF P 94-053) des sols. Le Tableau 4.2 regroupe les valeurs obtenues pour les deux sols étudiés.

Tableau 4.2. Caractéristiques physiques des deux sols utilisés dans la présente étude.

Propriétés physiques	Sol argileux	Sol marneux
Poids volumique humide γ_h (kg/m^3)	21,76	22,20
Poids volumique sec γ_d (kg/m^3)	20,00	18,77
Teneur en eau W (%)	29,00	19,00

D'après ces résultats, on constate que le **sol argileux** est humide dense à moyennement dense, alors que le **sol marneux** est plutôt un sol légèrement humide dense à moyennement dense.

(b) Détermination des limites d'Atterberg (NF P 94-051)

Selon les normes françaises (NF P 94-051), l'essai a pour but de déterminer la consistance d'un sol fin, qui varie de façon continue à chaque fin que la teneur en eau

augmente, le sol passe successivement de l'état solide à l'état plastique, puis à l'état liquide (Figure 4.2). L'essai définit conventionnellement les limites entre ces états.

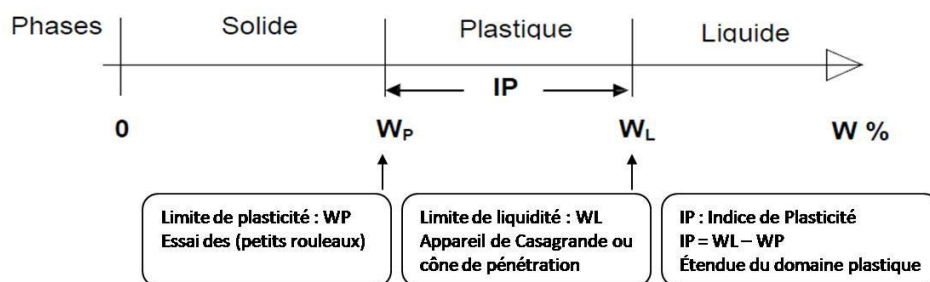


Figure 4.2. Représentation des limites d'Atterberg (Head, 1992).

Les résultats des essais des limites d'Atterberg réalisés sur les échantillons des deux sols étudiés sont donnés dans le Tableau 4.3 :

Tableau 4.3. Résultats des essais des limites d'Atterberg (NF P 94-051)

Paramètres de consistance	Sol argileux	Sol marneux
Teneur en eau W (%)	29,00	19,00
Limite de plasticité W_P (%)	23,56	18,99
Limite de liquidité W_L (%)	64,70	30,96
Indice de plasticité I_p	41,14	11,97
Indice de consistance I_c	0,87	0,99

- **Le sol argileux** : ces résultats montrent que l'indice de plasticité I_p du sol argileux est égal à 41,14 %, caractérise un sol très plastique (voir Tableau. 4.4) et indique qu'on est en présence d'un sol argileux (voir Tableau 4.5). L'indice de consistance I_c de 0,87 caractérise un sol plastique (voir Tableau 4.6).

- **Le sol marneux** : l'indice de plasticité I_p est égal à 11,97 % ce qui caractérise un sol peu plastique (voir Tableau. 4.4) et indique qu'on est en présence d'un sol limoneux (voir Tableau 4.5). L'échantillon marneux à indice de consistance I_c égal à 0,99 ce qui indique un sol plastique (voir Tableau 4.6)

Tableau 4.4. Consistance du sol en fonction de l'indice I_P (Sanglerat et Costet, 1983).

Indice de plasticité I_P	Etat de consistance du sol
$0 < I_P < 5$	Sol non plastique (sol peu sensible à l'eau)
$5 < I_P < 10$	Sol faiblement plastique
$10 < I_P < 20$	Sol moyennement plastique
$20 < I_P < 40$	Sol plastique
$I_P > 40$	Sol très plastique

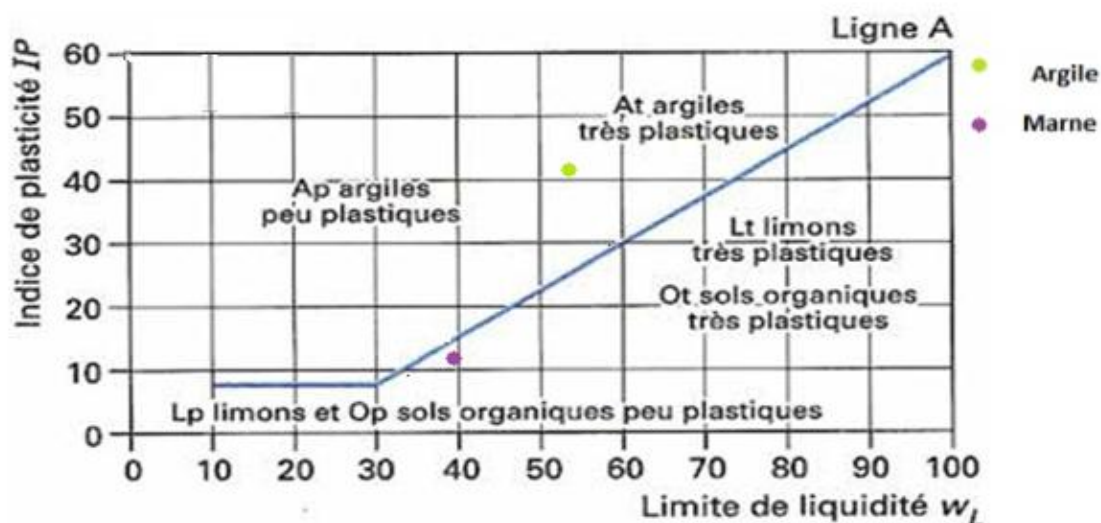
Tableau 4.5. Classification des sols en fonction de l'indice I_P (Sanglerat et Costet, 1983).

Indice de plasticité I_P	Type de sol
$I_P > 30$	Argile
$20 < I_P < 30$	Argile limoneuse
$10 < I_P < 20$	Limon
$5 < I_P < 20$	Sable argileux
$5 < I_P < 15$	Sable limoneux

Tableau 4.6. Consistance du sol en fonction de l'indice I_C (Sanglerat et Costet, 1983).

Indice de consistance I_C	Etat de consistance du sol
$I_C \leq 0$	liquide
$0 < I_C < 1$	Plastique
$I_C = 0$	Solide plastique
$I_C > 1$	Solide ou semi solide

D'après la classification des sols fins de Casagrande (Figure 4.3), le point concernant l'échantillon d'argile se situe au-dessus de la ligne A ce qui indique un **sol argileux très plastique (AT)**. Tandis que le deuxième point qui concerne l'échantillon marneux se situe en dessous de la ligne A caractérisant un **sol limoneux peu plastique (Lp)**.

**Figure 4.3.** Classification des sols étudiés par le diagramme de plasticité de Casagrande.

(c) Estimation du gonflement des sols :

Selon les valeurs de l'indice de plasticité I_P , on peut évaluer le potentiel de gonflement des sols fins (Tableau 4.7). D'après Aoun (2002) les sols gonflants ont souvent un grand indice de plasticité.

Tableau 4.7. Évaluation du potentiel de gonflement en fonction d' I_P (Schlosser, 1989).

Potentiel de gonflement	Indice de plasticité I_P (%)
Faible	0 - 15
Moyen	15 - 25
Elevé	25 - 55
Très élevé	> 55

Le Tableau 4.8 présente une estimation du potentiel de gonflement en fonction de l'indice de plasticité des deux sols utilisés dans cette étude.

Tableau 4.8. Estimation du potentiel de gonflement en fonction d' I_P des deux sols étudiés

Échantillons	I_P	Potentiel de gonflement	Etat de plasticité
Sol argileux	41,14	élevé	Très Plastique
Sol marneux	11,97	faible	Peu Plastique

En fonction de l'indice de plasticité des échantillons prélevés on constate que le sol argileux présente un potentiel de gonflement élevé, alors que celui du sol marneux est faible (Tableau 4.7 et 4.8).

(d) Essai au bleu de méthylène (NF P94-068)

Conformément à **NF P94-068**, des essais au bleu de méthylène ont été effectués sur les échantillons des deux sols étudiés conformément à la norme (NF P 94-068). Les résultats obtenus sont présentés dans le Tableau 4.9 ci-dessous :

Tableau 4.9. Résultats de l'essai au bleu de méthylène sur les deux sols étudiés.

	Sol argileux	Sol marneux
Valeur au bleu du sol (VBS)	8	7

Selon la classification du Tableau 4.10, les valeurs au bleu de méthylène obtenues pour les deux sols étudiés indiquent une nature argileuse.

Tableau 4.10. Classification des sols en fonction de VBS (Philipponnat et Bertrand, 2003).

Valeur au bleu du sol (VBS)	Catégorie de sol
VBS < 0,1	Sol insensible à l'eau
0,2 < VBS < 1,5	Sol sablo limoneux, sensible à l'eau
1,5 < VBS < 2,5	Sol sablo argileux, peu plastiques
2,5 < VBS < 6,0	Sol limoneux de plasticité moyenne
6,0 < VBS < 8,0	Sol argileux
VBS > 8,0	Sol très argileux

(e) Classification GTR des sols

Le GTR 92 (*Guide des Terrassements Routiers, réalisation des remblais et des couches de forme*, LCPC, SETRA 1992) est la norme qui en découle (NF-P 11-300, Septembre 1992) proposent une classification des matériaux utilisables dans la construction des remblais et des couches de forme d'infrastructures routières.

Cette classification outre l'analyse granulométrique et les limites d'Atterberg utilise les résultats des essais supplémentaires tels que l'essai d'équivalent sable et l'essai de valeur au bleu de méthylène. Le Tableau 4.11 présente la classification des sols étudiés en fonction des recommandations du GTR.

Tableau 4.11. Classification GTR des sols étudiés

Échantillons	I_p	VBS	Classification GTR
Sol argileux	41,14	8	A4 (Argiles et argiles marneuses très plastiques)
Sol marneux	11,97	7	A2 (argiles et marnes peu plastiques)

4.2. Programme expérimental

La préparation des échantillons de sol et la réalisation des essais de compactage des différentes séries d'essais ont vigoureusement à la norme **NF P 94-093** donnée au chapitre 2.

Afin d'atteindre nos objectifs du présent travail et répondre à la problématique du comportement des sols plastiques traités à la chaux ou aux liants hydrauliques, nous avons projeté de mettre en place et de suivre le programme expérimental que nous présentons dans le Tableau 4.12.

Tableau 4.12. Détail du programme expérimental

Séries d'essais réalisés	Type de sol	Essais des limites d'Atterberg	Observations
Série N°01 : Effet du traitement du sol à la chaux et/ou au ciment sur les limites d'Atterberg	Sol argileux	Sol de référence	Sans traitement
		Sol traité à la chaux	2%, 4% et 6%
		Sol traité au ciment	2%, 4% et 6%
		Sol traité à la chaux et au ciment	2%, 4% et 6%
	Sol marneux	Sol de référence	Sans traitement
		Sol traité à la chaux	2%, 4% et 6%
		Sol traité au ciment	2%, 4% et 6%
		Sol traité à la chaux et au ciment	2%, 4% et 6%
Séries d'essais réalisés	Type de sol	Essais de compactage des sols	Observations
Série N°02 : Effet du traitement du sol à la chaux et/ou au ciment sur les caractéristiques de compactage	Sol argileux	Sol de référence	Sans traitement
		Sol traité à la chaux	2%, 4% et 6%
		Sol traité au ciment	2%, 4% et 6%
		Sol traité à la chaux et au ciment	2%, 4% et 6%
	Sol marneux	Sol de référence	Sans traitement
		Sol traité à la chaux	2%, 4% et 6%
		Sol traité au ciment	2%, 4% et 6%
		Sol traité à la chaux et au ciment	2%, 4% et 6%

4.3. Présentation des résultats expérimentaux

4.3.1. Effet du traitement à la chaux et/ou au ciment sur les limites d'Atterberg

Afin de faciliter la lecture et l'interprétation, les résultats expérimentaux de l'effet du traitement du sol avec la chaux et/ou ciment sur les limites d'Atterberg seront présentés sous forme de tableaux comme le montre à titre d'exemple les Tableaux 4.13 et 4.14. L'ensemble des tableaux de cette partie du programme expérimental seront regroupés dans l'annexe 1 à la fin de ce mémoire.

Tableau 4.13. Limites d'Atterberg pour l'échantillon argileux (essai de référence)

Essai normalisé						
N° de la tare	Limite de liquidité				Limite de plasticité	
	1	2	3	4	1	2
Nombre de coups	30	25	19	16		
Poids du sol humide	7,7	9,8	13,5	14,2	3,6	2,6
Poids du sol sec	4,7	5,95	7,91	8,13	2,78	2,21
Poids de l'eau	3	3,85	5,59	6,07	0,82	0,39
Teneur en eau W (%)	63,38	64,70	70,67	74,66	29,49	17,64
W_L (%)	64,70					
W_P (%)	23,56					
I_P (%)	41,14					

Tableau 4.14. Limites d'Atterberg pour l'échantillon de marneux (essai de référence)

Essai normalisé						
N° de la tare	Limite de liquidité				Limite de plasticité	
	1	2	3	4	1	2
Nombre de coups	23	28	25	27		
Poids du sol humide	4,86	6	4,67	4,73	4,06	3,34
Poids du sol sec	3,73	4,6	3,57	3,59	3,42	2,80
Poids de l'eau	1,13	1,4	1,1	1,14	0,64	0,54
Teneur en eau W (%)	30,29	30,43	30,81	31,75	18,71	19,28
W_L (%)	30,96					
W_P (%)	18,99					
I_P (%)	11,97					

(a) Traitement des sols avec ajout de chaux :

D'après les résultats obtenus on remarque que l'ajout de la chaux a une influence remarquable sur les limites d'Atterberg des deux types de sol étudiés (Tableaux 4.15 et 4.16). Il est clair qu'une augmentation du pourcentage de la chaux dans le sol traité induit une augmentation importante de la limite de plasticité W_P que pour la limite de liquidité W_L . Par contre, l'augmentation du pourcentage de la chaux dans le sol traité réduit considérablement l'indice de plasticité I_p . En effet avec 4% de chaux ajoutée a réduit l'indice de plasticité I_p des argiles de 37% celui des marne ne l'a été que de 22%.

Tableau 4.15. Effet de l'ajout de chaux sur les limites d'Atterberg du sol argileux

Chaux (%)	W_L (%)	W_P (%)	I_P (%)
0	64,70	23,56	41,14
2	64,82	30,50	34,32
4	63,57	37,77	25,80
6	62,85	39,83	23,02

Tableau 4.16. Effet de l'ajout de chaux sur les limites d'Atterberg du sol marneux

Chaux (%)	W_L (%)	W_P (%)	I_P (%)
0	30,96	18,99	11,97
2	34,85	25,2	9,65
4	36,89	27,60	9,29
6	37,67	28,72	8,95

(b) Traitement des sols avec l'ajout de ciment :

L'ajout du ciment aux sols a donné le même effet que celui de la chaux avec quelques exceptions pour les argiles. D'abord, le traitement du sol marneux avec du ciment a augmenté à la fois la limite de liquidité W_L et la limite de plasticité W_P avec une diminution de l'indice de plasticité I_P (Tableau 17).

En revanche, pour le sol argileux l'ajout du ciment a certainement augmenté les limites de liquidité W_L et de plasticité W_P ; ces augmentations enregistrées aux taux 2 et 4 % de ciment ont connu une baisse à 6% du produit ajouté. Les 6 % représentent due la valeur de saturation au-delà de laquelle le traitement au ciment n'est plus efficace pour l'argile, on a due atteint le seuil de saturation des argiles. L'indice de plasticité I_P du sol marneux a quant à lui a diminué.

Tableau 4.17. Effet de l'ajout de ciment sur les limites d'Atterberg du sol marneux

Ciment (%)	W_L (%)	W_P (%)	I_P (%)
0	30,96	18,99	11,97
2	35,61	24,30	11,31
4	34,60	24,77	9,83
6	35,96	26,37	9,59

Tableau 4.18. Effet de l'ajout de ciment sur les limites d'Atterberg du sol argileux

Ciment (%)	W_L (%)	W_P (%)	I_P (%)
0	64,70	23,56	41,14
2	72,09	42,43	29,66
4	69,90	46,58	23,32
6	65,22	43,83	21,39

(c) Traitement mixte avec l'ajout de chaux et de ciment :

Le traitement mixte des sols étudiés (argiles et marnes) avec la chaux et le ciment a sensiblement diminué la limite de liquidité W_L des deux sols. Par contre, pour la limite de plasticité W_P , après une augmentation avec les pourcentages du traitement mixte de 2 % et 4% on a enregistré une diminution au seuil de 6 % pour les deux sols étudiés (Tableaux 19 et 20). Ce qui confirme encore une fois que cette valeur de 6 % est une valeur de saturation au-delà de laquelle le traitement n'est plus efficace, c'est le seuil de saturation. L'indice de plasticité I_P quant à lui a diminué dans les deux cas.

Tableau 4.19. Effet du traitement mixte (chaux et ciment) sur les limites d'Atterberg des argiles

Chaux + ciment (%)	W_L (%)	W_P (%)	I_P (%)
0	64,70	23,56	41,14
2	63,78	43,80	19,98
4	56,87	43,50	13,37
6	55,42	42,05	13,37

Tableau 4.20. Effet du traitement mixte (chaux et ciment) sur les limites d'Atterberg des marnes

Chaux + ciment (%)	W_L (%)	W_P (%)	I_P (%)
0	30,96	18,99	11,97
2	35,02	24,13	10,89
4	34,83	24,75	10,08
6	34,70	25,16	9,54

4.3.2. Effet du traitement avec la chaux et/ou ciment sur les courbes Proctor

A travers la manipulation et l'exécution des essais de compactage des sols. En effet, dire qu'un sol, sauf s'il est saturé, ne peut être caractérisé par sa seule teneur en eau. A une teneur en eau donnée, il existe une infinité d'états possibles selon l'importance du volume d'air contenu dans le sol. Chaque état pouvant être défini par le poids volumique sec ou la densité sèche du sol. On conçoit qu'un *sol non saturé* puisse être « compacté » si on peut expulser l'air contenu. En pou sein la teneur en eau restera constante mais le poids volumique sec augmentera. Dans le cas d'un *sol saturé* on peut lui augmenter on poids volumique sec mais par expulsion d'eau, Il s'agit alors d'une consolidation.

Le compactage par expulsion d'air aura lieu lorsque le sol sera soumis à des efforts répétés (chocs, passages de véhicules, vibrations, etc.). Si le sol est très sec, les particules solides refuseront de se serrer par manque de cohésion. En contrepartie, si le sol est trop mouillé, il y aura déplacement de matériaux sans tassement proprement dit. En fait des moyens employés, au doit atteindre une teneur en eau optimum qui assurer un serrage maximum des grains.

Les résultats expérimentaux seront représentés et traités dans la partie «analyse et discussion » qui suit. La variation du poids volumique sec (γ_d) en fonction de la variation de la teneur en eau (w). Chacune des courbes montre un maximum auquel correspond la valeur maximale du poids volumique sec (γ_{dmax}) et la teneur en eau optimum (w_{opt}). C'est l'**optimum Proctor modifié** (γ_{dmax} , w_{opt}).

▪ Analyse et discussions des résultats obtenus

Les sols fins, c'est-à-dire les sols qui contiennent des proportions notables d'argiles et de limons, ont des propriétés routières déplorables. Ils gonflent et deviennent plastiques en présence d'eau, se rétractent avec la sécheresse, foisonnent sous l'effet du gel. Ils n'ont donc aucune stabilité face aux variations climatiques. Ils peuvent ainsi se trouver, soit dès l'extraction, soit à la suite d'intempéries, un degré de consistance faible tel que la circulation des engins devienne difficile, voire impossible, ce qui rend leur utilisation délicate.

L'incorporation de chaux dans un sol argileux, développe une agglomération des fines particules argileuses en éléments plus grossiers et friables, c'est la floculation. L'incidence de ces réactions sur le mélange sol-chaux sont :

- une diminution de l'indice de plasticité I_P (voir la partie précédente 4.3.1) ;
- un aplatissement de la courbe Proctor avec diminution de la densité de l'optimum Proctor et augmentation de la teneur en eau optimale (Figures 4.4, 4.5 et Tableau 4.21).

La sensibilité à l'eau des échantillons testés se traduit les formes variées des courbes Proctor, selon les Figures 4.4 et 4.5, on remarque que pour l'état naturel des argiles et des marnes, la courbe de compactage soit à l'optimum Proctor modifié présente une forme accentuée, ce qui explique la grande sensibilité des sols fins à l'eau.

Après traitement à la chaux avec des ajouts de 2, 4 et 6 %, les courbes Proctor des argiles sont déplacées vers la droite elles présentent une forme aplatie qui traduit la faible sensibilité de ces mélange à l'eau (Figure 4.4).

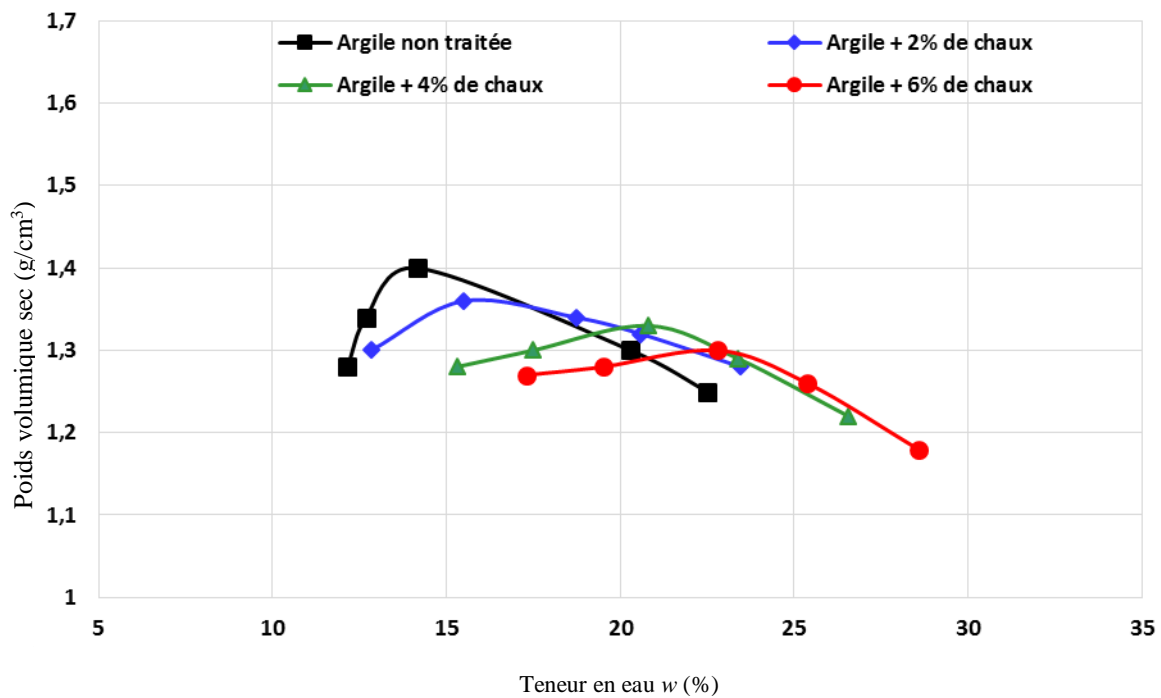


Figure 4.4. Influence du traitement à la chaux sur les courbes Proctor des argiles

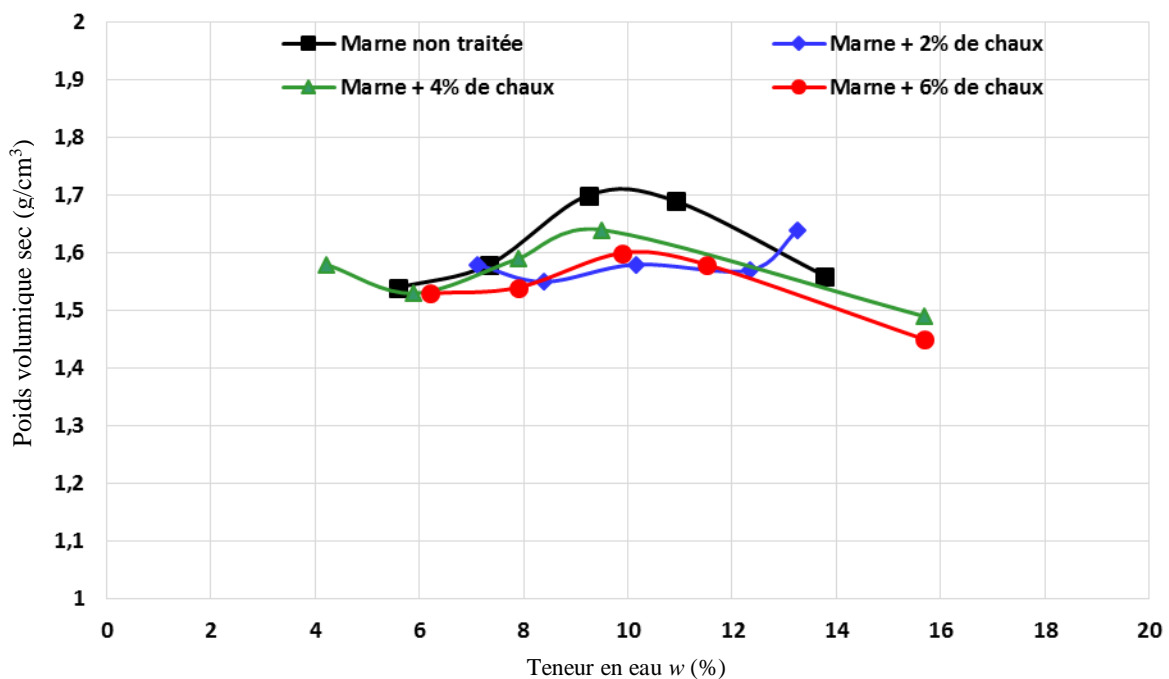


Figure 4.5. Influence du traitement à la chaux sur les courbes Proctor des marnes

Sur la Figure 4.5, le traitement à la chaux des marnes avec des ajouts de 2, 4 et 6 %, à diminuer la densité de l'optimum Proctor d'une façon moindre que celle des argiles mais sans augmentation considérable de la teneur en eau optimale (Tableau 4.21).

Tableau 4.21. Teneur en eau optimale des sols traités à la chaux

Traitement à la chaux (%)	Sol argileux	Sol marneux
	W%	
0	14,17	9,24
2	15,52	10,15
4	20,80	9,50
6	22,80	9,89

Le traitement des sols au ciment permet d’améliorer les caractéristiques initiales des matériaux et s’appliquent à des sols fins peu ou pas plastiques, dont les teneurs naturelles en eau trop élevées ne permettent pas de réaliser des remblais ou des couches de forme dans de bonnes conditions et avec des garanties suffisantes de qualité. Il est surtout utilisé dans le but d’obtenir un développement rapide et durable des résistances mécaniques et des stabilités à l’eau et au gel.

La teneur en eau d’un mélange sol-ciment se trouve abaissée en raison de l’apport de matériaux secs ; la consommation de l’eau nécessaire à la prise hydraulique du ciment et l’évaporation d’eau par l’aération du sol lors du malaxage. En revanche, on ne note pas de modifications importantes de la courbe Proctor à part un aplatissement modéré des courbes Proctor ce qui induit la réduction de la sensibilité à l’eau du sol traité (Figures 4.6 et 4.7).

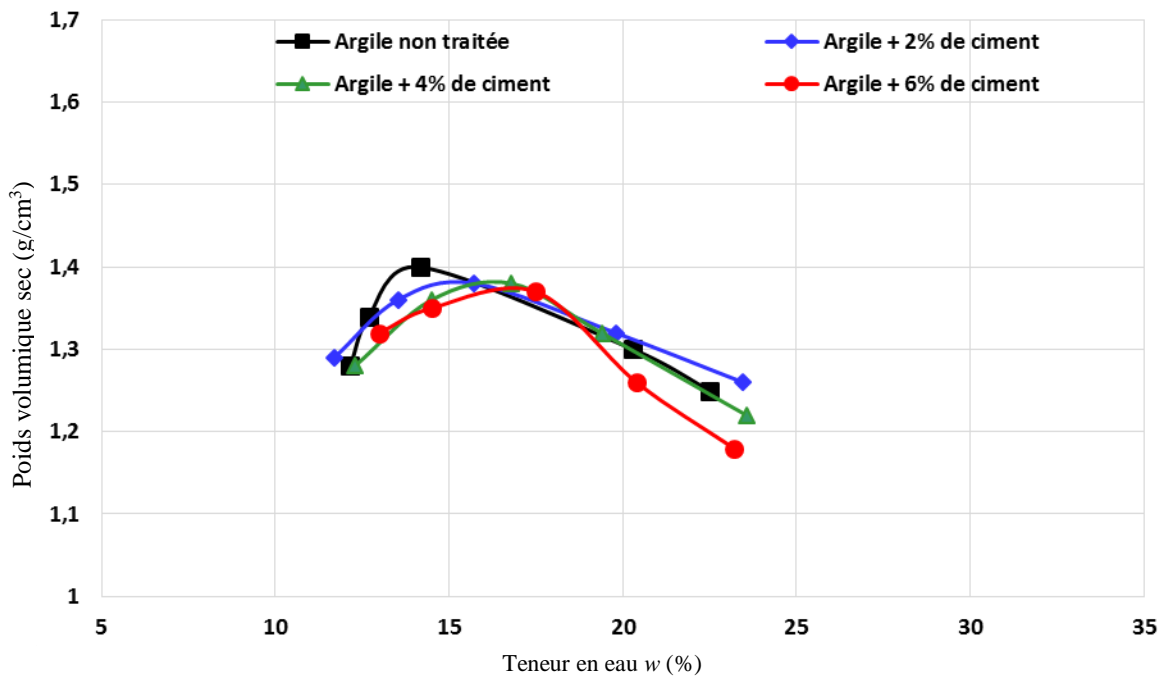


Figure 4.6. Influence du traitement au ciment sur les courbes Proctor des argiles

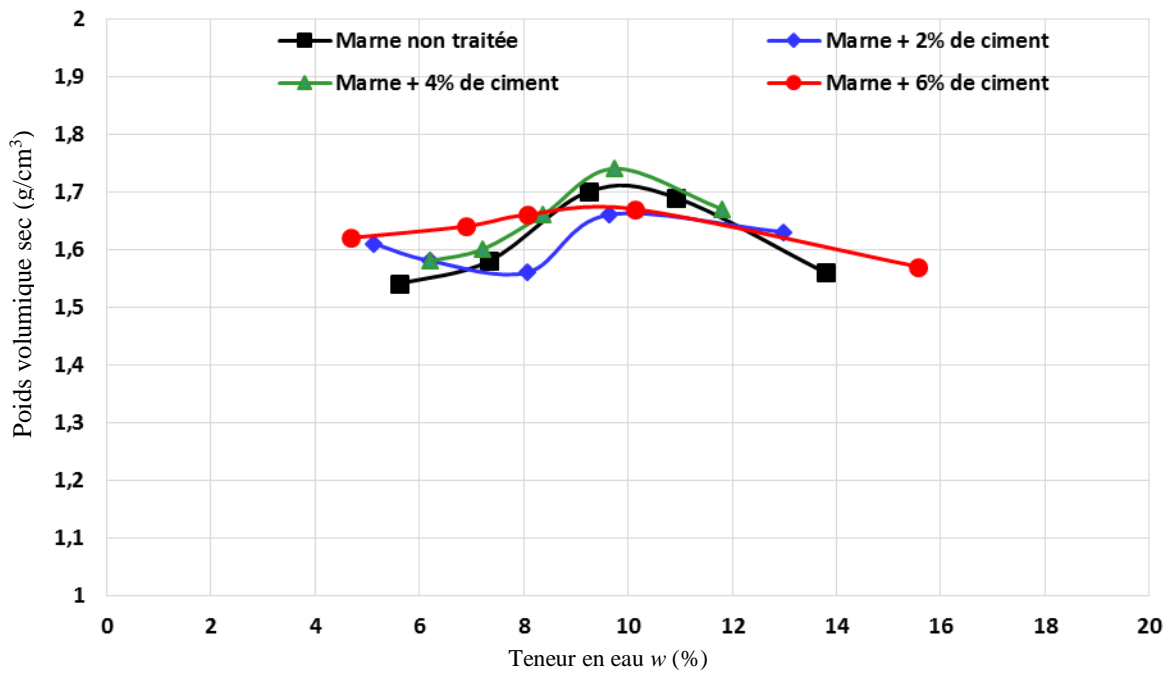


Figure 4.7. Influence du traitement au ciment sur les courbes Proctor des marnes

Le traitement mixte en utilisant la chaux puis le ciment s'applique aux sols peu plastiques destiné généralement aux couches de forme ou en couche de chaussées. L'action de la chaux permet d'amener le sol à un état optimal pour le traitement au ciment. Les courbes Proctor plus ou moins aplaties dans les Figures 4.8 et 4.9 nous indiquent que le traitement mixte rend le sol moins sensible à l'eau avec une réduction de la teneur en eau optimale par rapport aux traitements précédents (Tableau 4.22).

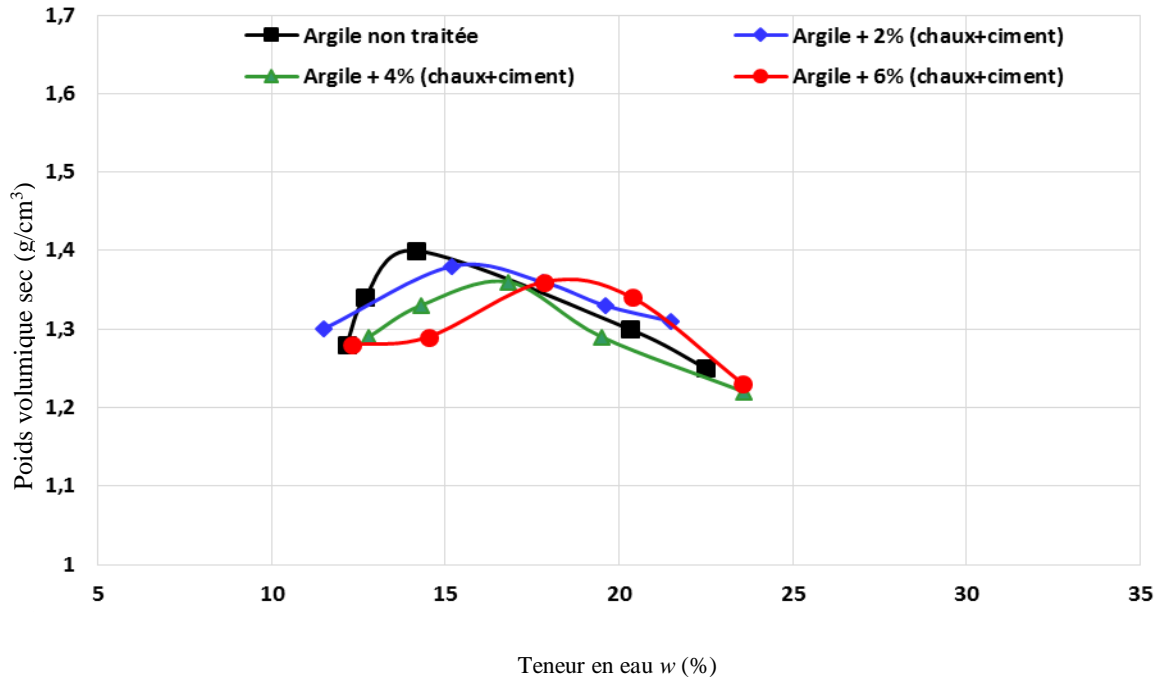


Figure 4.8. Influence du traitement mixte (chaux + ciment) sur les courbes Proctor des argiles

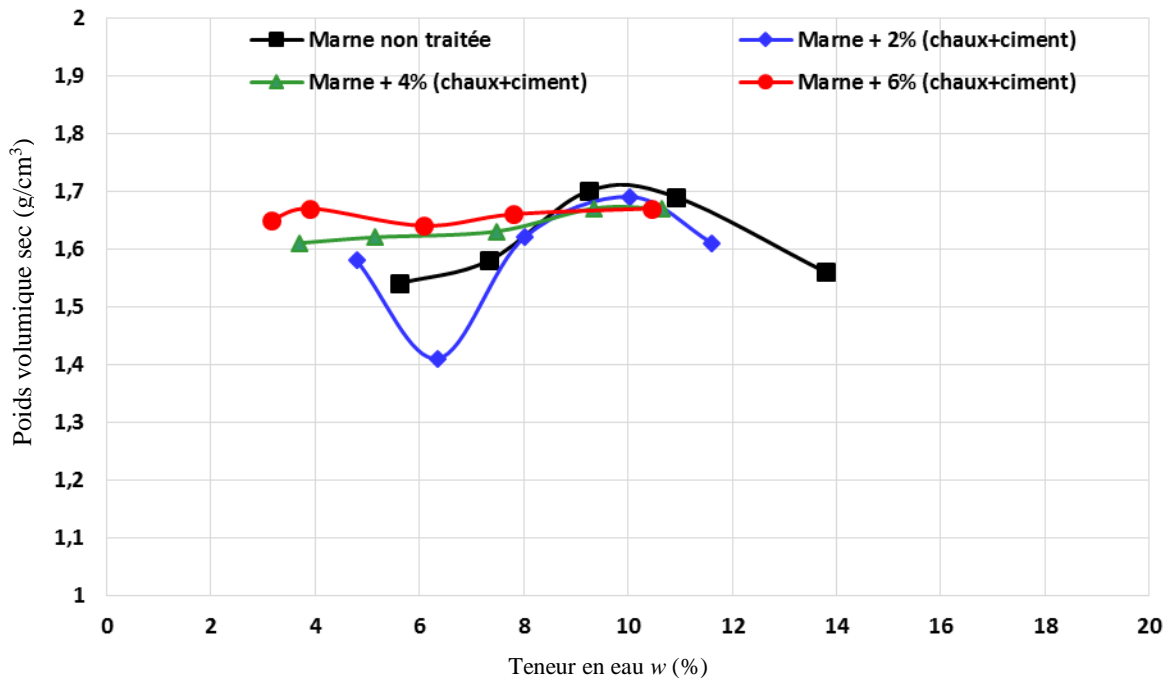


Figure 4.9. Influence du traitement mixte (chaux + ciment) sur les courbes Proctor des marnes

Tableau 4.22. Teneur en eau optimale des sols traités à la chaux et au ciment

Traitement mixte (chaux + ciment) (%)	Sol argileux	Sol marneux
0	14,17	9,24
2	15,20	10,04
4	16,82	10,64
6	17,83	10,44



*Conclusion
générale*

Conclusion générale

Le traitement des sols avec un liant est une technique qui consiste à incorporer, au sein du sol, cet élément d'apport avec éventuellement de l'eau et de les mélanger plus ou moins intimement in situ, jusqu'à l'obtention d'un matériau homogène pour lui conférer des propriétés nouvelles. Il s'agit d'un traitement qui utilise les affinités chimiques du sol et du liant, par opposition au traitement mécanique, comme le compactage, qui peut se superposer au premier.

Le traitement des sols pour l'exécution des remblais et des couches de forme, a pour objet de rendre utilisable un sol qui ne présente pas les caractéristiques requises pour servir sans préparation, à supporter une assise de chaussée, de parking ou de plate-forme.

Les sols fins, c'est-à-dire les sols qui contiennent des proportions notables d'argiles et de limons, ont des propriétés routières déplorables. Ils gonflent et deviennent plastiques en présence d'eau, se rétractent avec la sécheresse, foisonnent sous l'effet du gel. Ils n'ont donc aucune stabilité face aux variations climatiques. Ils peuvent ainsi se trouver, soit dès l'extraction, soit à la suite d'intempéries, à un degré de consistance faible tel que la circulation des engins devienne difficile, voire impossible, ce qui rend leur utilisation délicate.

Compte tenu de ses propriétés, **la chaux** modifie de façon sensible le comportement des sols fins argileux ou limoneux, grâce à trois actions distinctes :

- Une diminution de la teneur en eau : la teneur en eau d'un mélange sol-chaux se trouve abaissée en raison de : l'apport de matériaux secs ; la consommation de l'eau nécessaire à l'hydratation de la chaux (chaux vive) ; l'évaporation d'eau suite à la chaleur dégagée par la réaction d'hydratation et par l'aération provoquée par le malaxage.

En moyenne, la diminution de la teneur en eau d'un sol traité est de l'ordre de 1 à 2 % pour 1 % de chaux.

- Des modifications immédiates des propriétés géotechniques du sol : l'incorporation de chaux dans un sol argileux, développe une agglomération des fines particules argileuses en éléments plus grossiers et friables, c'est la floculation. L'incidence de ces réactions sur le

mélange sol-chaux sont : une diminution de l'indice de plasticité I_P ; un aplatissement de la courbe Proctor avec diminution de la densité de l'optimum Proctor et augmentation de la teneur en eau optimale.

- Modification à long terme : la chaux, en tant que base forte, élève le pH du sol et provoque l'attaque des constituants du sol (silice et alumine). Il se forme alors des aluminates et des silicates de calcium hydratés (réaction pouzzolanique) qui, en cristallisant, agissent comme un liant entre les grains. Il est à noter que l'intensité et la vitesse de ces réactions à long terme dépendent d'un certain nombre de caractéristiques du sol (pH, teneur en matières organiques, quantité et la nature de la fraction argileuse, teneur en eau, dosage en chaux maximal et surtout la température).

Le traitement des sols au **ciment** permet d'améliorer les caractéristiques initiales des matériaux et s'appliquent à des sols fins prétraités à la chaux ou des sols peu ou pas plastiques, dont les teneurs naturelles en eau trop élevées ne permettent pas de réaliser des remblais ou des couches de forme dans de bonnes conditions et avec des garanties suffisantes de qualité. Il est surtout utilisé dans le but d'obtenir un développement rapide et durable des résistances mécaniques et des stabilités à l'eau et au gel.

Compte tenu de leurs propriétés, le ciment modifie de façon sensible le comportement des sols peu ou pas plastiques, grâce à deux actions distinctes :

- Des modifications immédiates et à long terme des propriétés géotechniques et mécaniques du sol : les réactions du ciment avec un sol consistent essentiellement en une hydratation des silicates et aluminates de calcium anhydres, avec passage par la phase soluté suivie de la cristallisation des produits hydratés, c'est la prise hydraulique.

La croissance des microcristaux formés, leur enchevêtrement, leur feutrage progressif, enrobent et relient les grains du matériau entre eux, formant des ponts de plus en plus nombreux et solides. Ce qui conduit rapidement au durcissement du mélange, à l'obtention de caractéristiques mécaniques élevées et sa stabilité à l'eau et au gel.

- Une diminution de la teneur en eau : la teneur en eau d'un mélange sol-ciment se trouve abaissée en raison de l'apport de matériaux secs ; la consommation de l'eau nécessaire à la prise hydraulique du ciment ; l'évaporation d'eau par l'aération du sol lors du malaxage.

En revanche, on ne note pas de modifications importantes de la courbe Proctor.

En fin le **traitement mixte** (chaux + ciment) s'applique aux sols peu à moyennement plastiques utilisés en couches de forme et le cas échéant, en couche de chaussées. L'action de la chaux permet d'amener le sol à un état optimal pour le traitement au ciment. Un sol argileux humide passe ainsi de manière quasi-instantanée d'un état plastique à un état solide, friable, non collant et perd partiellement sa sensibilité à l'eau. Sa manipulation sur chantier devient aisée, son comportement à la mise en œuvre et sa portance sont améliorés. L'homogénéité qu'il acquiert le place dans des conditions idéales pour subir le traitement au ciment.

Références

Bibliographiques

Références bibliographiques

Aoun M ; (2002), Problèmes géologiques et géotechniques dans le bassin de Mila : leur impact sur les ouvrages d'art. Mémoire. magi. Univ. Tébessa, 156 p.

Afes, M ; Didier ;(1999) Bull Eng GeolEnv, Stabilization des sols gonflants : cas d'une argile en provenance de Mila (Algérie), vol. 59, p 75–83.

Bengraa, H ;(2004), Contribution à l'Etude de la stabilisation du gonflement par ajout du sable, Thèse de magister. Université Mohamed Boudiaf U.S.T.O, Oran.

Biczysko, S.J;(1996). Long-Term Performance of Lime Stabilized Road Subgrade. p.5-12. Dans Rogers, C.D.F., Glendinning, S., Dixon, N. (éditeurs). Proceedings of the seminar on Lime Stabilization held at Lough borough University Civil& Building Engineering Department. 25septembre. Thomas Telford, London, England. 183p.

Chaddock, B.C.J;(1996). The Stuctural Performanceof Stabilised Soi/ in Road Foundations. p.75-94. Dans Rogers, C.D.F., Glendinning, S., Dixon, N.(éditeurs). Proceedings of the seminar on Lime Stabilization held at Lough borough University Civil& Building Engineering Department. 25septembre. Thomas Telford, London, England. 183 p.

Chelghoum, N ; (2006). Eléments de base en mécanique des sols". Publications de l'université Badji Mokhtar- Annaba, 318 p.

CIM Béton ;(2009) Centre d'information sur le ciment et ses applications, Collection technique, Terrassements et assises de chaussées (148p).

CIM Béton ;(2004) Centre d'information sur le ciment et ses applications. "Documentation technique", Routes N°89, 14 p.

Deneele, D ;(2008) communication, Processus physico-chimiques et comportement géotechnique des sols traités, laboratoire centrale des ponts et chaussé.

Gombalet ,J ; (2004), Le gonflement des argiles et ses effets sur les ouvrages souterrains de stockage. Thèse de doctorat d'état, école polytechnique – France, 297p.

Reaves, H.M ; (1996). An Introduction to Lime Stabilization. pp. 5-12. Dans Rogers, C.D.F., Glendinning, S., Dixon, N. (éditeurs). Proceedings of the seminar on Lime Stabilization held at Lough borough University Civil & Building Engineering Department. 25 septembre, 1996. Thomas Telford, London, England. 183 p.

Habib, P ;(1997). Génie géotechnique - Applications de la mécanique des sols et des roches, ELLIPSES, 222 p.

Head; (1992), Manuel of Soil Laboratory Testing, Vol. 1, 2 et 3; Second Edition; Pentech Press.

Kelley, C.M ;(1988). A Long Range Durability Study of Lime Stabilized Bases at Military Posts in the Southwest. National Lime Association, Bulletin 328.

Kolias,S; Kasselouri-Rigopoulou,V;Karahalios,A;(2005), Cement & Concrete Composites, Stabilization of clayey soils with high calcium fly ash and cement., vol. 27, pp.301–313.

Légère, G ; (2001). Etude technico-économique de la stabilisation à la chaux des sols argileux en voirie forestière. Maîtrise en génie de la construction, université du Québec, 109 p.

Little, D.N ;(1995). Handbook for stabilization of pavement subgrades and base courses with lime. The National Lime Association, Washington, D.C. 219 p.

Mellal, F ; Lamri, B ; (2010). Symposium international sur la construction en zone sismique. Université Hassiba Benbouali de Chlef, Algérie, 26-27 octobre 2010.

Moore, R.K ; (1987). Lime Stabilization. Transportation Research Board Committee on Lime and Lime-FlyAsh Stabilization. Transportation Research Board, National Research Council, Washington, D.C.State of the art report 5. 59 p.

Philipponnat G ; & Bertrand H ; (2003), Fondations et ouvrages en terre. Ed. Eyrolles. Paris, 548P

Prusinski, J.R., Bhattacharja, S; (1999).Effectiveness of Portland Cement and Lime in Stabilizing Clay Soi/s. pp. 215-227. Seventh International Conference on Low-Volume Roads. 23-26 Mai, 1999, Baton Rouge, Louisiana. Transportation Research Record No. 1652, Volume 1.National Academy Press, Washington, D.C. 275 p.

Puffer, W; Gearhart, R.C; Escobar, R. (1983). New stabilization method uses chemicals, geotextiles. Forest Industries, Miller Freeman Publications, 3 p.

Raymond, N; Yong; Vahid,O ;(2007). Applied Clay Science Experimental study on instability of bases on natural and lime/cement-stabilized clayey soils, vol.35, p. 238–249.

Rogers, C.D.F; Glendinning, S; Dixon, N. (1996). Lime Stabilisation Proceedings of the seminar held at Lough borough University, Civil and Building Engineering Department, 25 September 1996. Thomas Telford, London, 183 p.

Rossi, P ; Gavois, L ; Raoul, G ;(2008) "Traitement des matériaux", Techniques de l'ingénieur, C 5 362. 19 p.

Sahraoui, K ; Rouikha, A ; (2016).Etude expérimentale des facteurs qui gouvernent le compactage des sols. Mémoire de Master académique en génie géologique, Université Mohamed Seddik Benyahia- Jijel, Algérie.

Sanglerat, G. & Costet, J ;(1983), Cours pratique de mécanique des sols, Tome II-calcul des ouvrages. 3e Ed. Dunod, Paris, 447 P.

Schlosser , F ; (1989), Eléments de mécanique des sols, Presses de l'ENPC,
280 p.

Yi, C; Bin, S; Charles,W; Chao-Sheng,T; (2006).Effect of polypropylene fibre and lime admixture on engineering properties of clayey soil. Engineering Geology,
Vol. 87, pp. 230-240.

Yucel ,G;Dursun, S ; Murat Cetin, M ;(2007). Building and Environment, Impact of cyclic wetting–drying %Mon swelling behaviour of lime-stabilized soil, vol. 42,
p. 681–688.

Normalisations

NF EN 197-1 -Avril 2012 « Ciment - Partie 1 : composition, spécifications et critères de conformité des ciments courants »

NF EN 459-1- 2012, « Chaux de construction-Partie 1: Définitions, spécifications et critères de conformité »

NF EN 13282- 3 Décembre 2015 « Liants hydrauliques routiers - Partie 3 : évaluation de la conformité »

NF P15-108 - Décembre 2000 « Liants hydrauliques - Liants hydrauliques routiers - Composition, spécifications et critères de conformité »

NF P 94-050 “Sols : reconnaissance et essais - Détermination de la teneur en eau pondérale des matériaux - Méthode par étuvage”. Septembre 1995.

NF P 94-051 “Sols : reconnaissance et essais - Détermination des limites d'Atterberg – Limite de liquidité à la coupelle - Limite de plasticité au rouleau”. Mars 1993.

NF P 94-053 “Sols : reconnaissance et essais - Détermination de la masse volumique des sols fins en laboratoire – Méthode de la trousse coupante, du moule et de l'immersion dans l'eau”.Octobre 1991.

NF P 94-068 “Sols : reconnaissance et essais - Mesure de la capacité d’adsorption de bleu de méthylène d’un sol ou d’un matériau rocheux - Détermination de la valeur de bleu de méthylène d’un sol ou d’un matériau rocheux par l’essai à la tâche”. Octobre 1998.

NF P 94-093 “Sols : reconnaissance et essais - Détermination des références de compactage d’un matériau - Essai Proctor Normal - Essai Proctor modifié”. Octobre 2014.



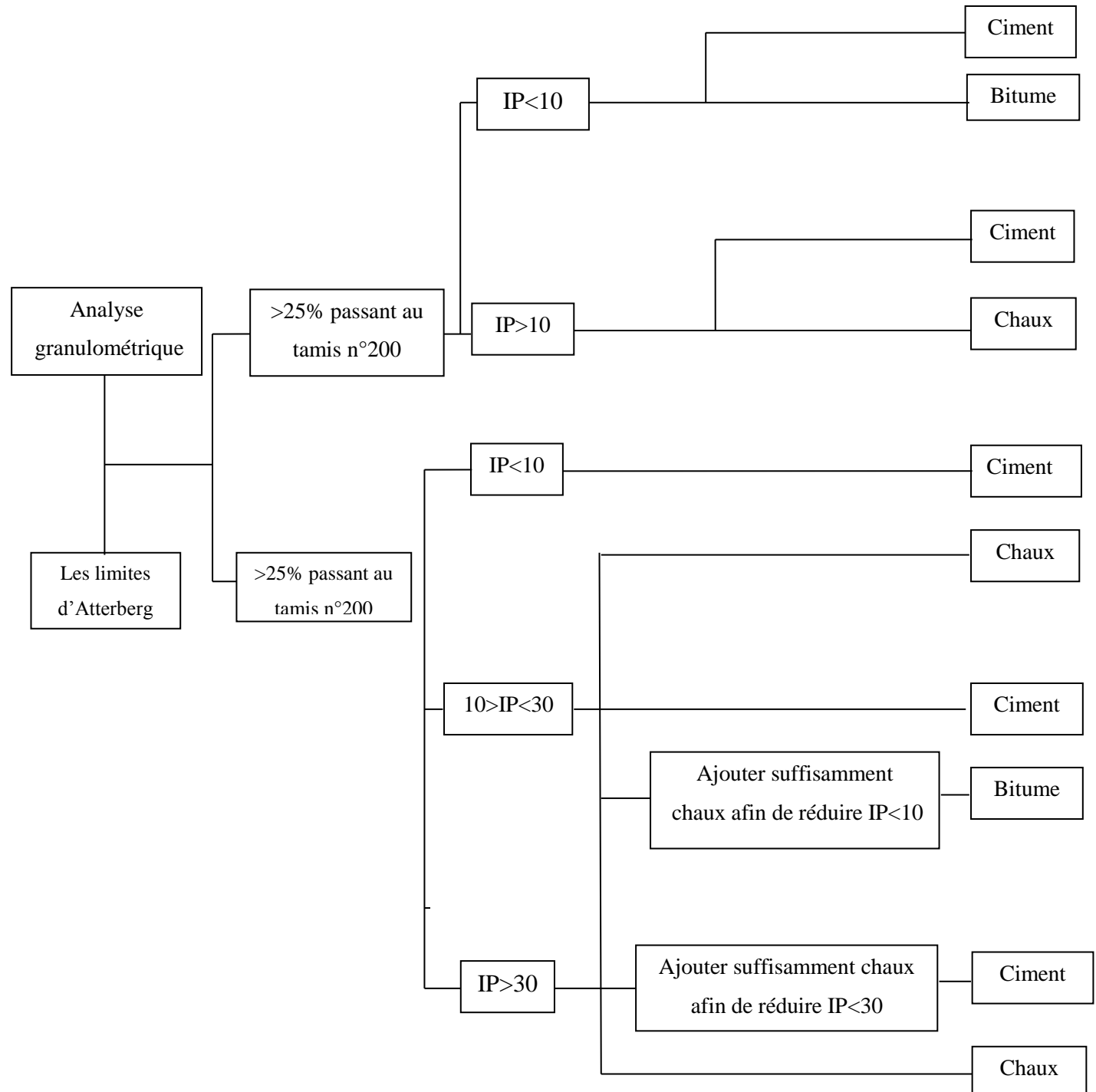
Annexes

Annexe 1

ANNEXE 1

Matrice pour le choix d'un produit de stabilisation (Little 1995)

Little (1995), a développé une grille de décision qui fournit le stabilisant le plus approprié en fonction de la granulométrie et les limites d'Atterberg du sol à traité.



Caractéristique du ciment





Annexe 2

ANNEXE 2

L'ESSAI DES LIMITES D'ALTERBERG

1. Essais des limites d'Atterberg sur les argiles

	Limite de liquidité				Limite de plasticité	
Nombre de coups	30	25	19	16		
N ⁰ tare	1	2	3	4	1	2
Poids total humide	7,7	9,8	13,5	14,2	3,6	2,6
Poids sec	4,7	5,95	7,91	8,13	2,78	2,21
Poids eau	3	3,85	5,59	6,07	0,82	0,39
W%	63,38	64,70	70,67	74,66	29,49	17,64
W_L (%)	64,70					
W_P (%)	23,56					
I_P (%)	41,14					

1.1.Effet de la chaux sur les argiles :

- 2% de chaux :

	Limite de liquidité				Limite de plasticité	
Nombre de coups	26	22	20	19		
N ⁰ tare	1	2	4	3	1	2
Poids total humide	3,94	3,40	3,95	3,96	4,44	3,03
Poids sec	2,38	2,05	2,38	2,39	3,39	2,33
Poids eau	1,56	1,35	1,57	1,58	1,05	0,70
W%	65,54	65,85	65,96	66,38	30,97	30,04
W_L (%)	64,82					
W_P (%)	30,50					
I_P (%)	34,32					

- 4% de la chaux :

	Limite de liquidité				Limite de plasticité	
Nombre de coups	35	34	25	22		
N ⁰ tare	1	2	3	4	1	2
Poids total humide	4,36	4,95	4,76	4,86	2,55	3,33
Poids sec	2,69	3,03	2,91	2,97	1,88	2,38
Poids eau	1,67	1,92	1,85	1,89	0,67	0,95
W%	62,08	63,36	63,57	63,63	53,63	39,91
W_L (%)	63,57					
W_P (%)	37,77					
I_P (%)	25,80					

- 6% de la chaux :

	Limite de liquidité				Limite de plasticité	
	17	25	22	19		
Nombre de coups	17	25	22	19		
N ^o tare	1	2	3	4	1	2
Poids total humide	4,15	2,85	1,86	4,18	3,52	1,51
Poids sec	2,53	1,75	1,14	2,56	2,41	1,13
Poids eau	1,62	1,10	0,72	1,62	1,11	0,38
W%	64,03	62,85	63,15	63,28	46,05	33,62
<hr/>						
W_L (%)	62,85					
W_P (%)	39,83					
I_P (%)	23,02					

Récapitulatif de l'effet de l'ajout de chaux sur les argiles :

Chaux %	w _l	w _p	I _p
0	64,70	23,56	41,14
2	64,82	30,50	34,32
4	63,57	37,77	25,80
6	62,85	39,83	23,02

1.2.Effet de ciment sur les argiles :

- 2% de ciment :

	Limite de liquidité				Limite de plasticité	
	32	29	21	20		
Nombre de coups	32	29	21	20		
N ^o tare	1	2	3	4	1	2
Poids total humide	4,63	5,38	4,89	4,72	3,10	2,04
Poids sec	2,73	3,12	2,82	2,74	2,15	1,45
Poids eau	1,9	2,26	2,07	1,98	0,95	0,59
W%	69,59	72,43	73,40	72,26	44,18	40,68
<hr/>						
W_L (%)	72,09					
W_P (%)	42,43					
I_P (%)	29,66					

- 4% de ciment :

Nombre de coups	Limite de liquidité				Limite de plasticité	
	29	25	20	17		
N ⁰ tare	1	2	3	4	1	2
Poids total humide	4,42	5,11	3,94	4,27	1,74	1,61
Poids sec	2,64	3,01	2,37	2,51	1,19	1,10
Poids eau	1,78	2,10	1,57	1,76	0,55	0,51
W%	59,72	69,76	60,15	58,78	46,21	46,36
W_L (%)	69,76					
W_P (%)	46,58					
I_P (%)	23,32					

- 6% de ciment :

Nombre de coups	Limite de liquidité				Limite de plasticité	
	34	21	19	18		
N ⁰ tare	1	2	3	4	1	2
Poids total humide	4,37	3,66	4,75	4,59	1,44	1,25
Poids sec	2,68	2,20	2,85	2,74	1,00	0,87
Poids eau	1,69	1,46	1,9	1,85	0,44	0,38
W%	63,05	66,36	66,66	67,51	44	43,67
W_L (%)	65,22					
W_P (%)	43,83					
I_P (%)	21,39					

Récapitulatif de l'effet de l'ajout de ciment sur les argiles :

Ciment %	w_l	w_p	I_p
0	67,70	23,56	41,14
2	72,09	42,43	29,66
4	69,90	46,58	23,32
6	65,22	43,83	21,39

1.3.Effet du traitement mixte (chaux + ciment) sur les argiles :

- 2% de chaux et ciment :

	Limite de liquidité				Limite de plasticité	
Nombre de coups	27	20	19	18		
N ⁰ tare	1	2	3	4	1	2
Poids total humide	4,26	6,63	6,22	6,27	1,77	1,13
Poids sec	2,62	4,02	3,76	3,74	1,24	0,78
Poids eau	1,64	2,61	2,46	2,53	0,53	0,35
W%	62,59	64,92	65,42	67,64	42,74	44,87
W_L (%)	63,78					
W_P (%)	43,80					
I_P (%)	19,98					

- 4% de chaux et ciment :

	Limite de liquidité				Limite de plasticité	
Nombre de coups	18	18	17	16		
N ⁰ tare	1	2	3	4	1	2
Poids total humide	7,30	4,94	6,81	6,24	1,04	1,46
Poids sec	4,57	3,11	4,25	3,92	0,73	1,01
Poids eau	2,73	1,83	2,56	2,32	0,31	0,45
W%	59,73	58,84	60,23	59,18	42,46	44,55
W_L (%)	56,87					
W_P (%)	43,50					
I_P (%)	13,37					

- 6% de chaux et ciment :

	Limite de liquidité				Limite de plasticité	
Nombre de coups	18	17	16	15		
N ⁰ tare	1	2	3	4	1	2
Poids total humide	4,70	3,77	4,46	4,21	1,40	1,13
Poids sec	2,98	2,38	2,82	2,65	0,98	0,80
Poids eau	1,72	1,39	1,64	1,56	0,42	0,33
W%	57,71	58,40	58,15	58,86	42,85	41,25
W_L (%)	55,42					
W_P (%)	42,05					
I_P (%)	13,37					

Récapitulatif de l'effet de l'ajout mixte de chaux et ciment sur les argiles :

Chaux et ciment %	w_l	w_p	I_p
0	64,70	23,56	41,14
2	63,78	43,80	19,98
4	56,87	43,50	13,37
6	55,42	42,05	13,37

2. Essais des limites d'Atterberg sur les marnes

	Limite de liquidité				Limite de plasticité	
	23	28	25	27		
Nombre de coups	23	28	25	27		
N ⁰ tare	1	2	3	4	1	2
Poids total humide	4.86	6	4.67	4.73	4.06	3.34
Poids sec	3.73	4.6	3.57	3.59	3.42	2.80
Poids eau	1.13	1.4	1.1	1.14	0.64	0.54
W%	30.29	30.43	30.81	31.75	18.71	19.28
<hr/>						
W_L (%)	30.96					
W_P (%)	18.99					
I_P (%)	11.97					

2.1. Effet de la chaux sur les marnes :

- 2% de chaux:

	Limite de liquidité				Limite de plasticité	
	20	22	24	26		
Nombre de coups	20	22	24	26		
N ⁰ tare	1	2	3	4	1	2
Poids total humide	6.85	6.17	6.69	5.78	3.61	3.97
Poids sec	5.06	4.56	4.94	4.29	2.89	3.17
Poids eau	1.79	1.61	1.75	1.49	0.72	0.80
W%	35.37	35.30	35.42	34.73	25.17	25.23
<hr/>						
W_L (%)	34.85					
W_P (%)	25.2					
I_P (%)	9.65					

- 4% de chaux:

	Limite de liquidité				Limite de plasticité	
Nombre de coups	29	27	29	18		
N ⁰ tare	1	2	3	4	1	2
Poids total humide	5.35	4.79	4.40	5.22	4.49	5.09
Poids sec	3.92	3.51	3.20	3.82	3.50	4.01
Poids eau	1.43	1.28	1.2	1.4	0.99	1.08
W%	36.47	36.46	37.5	36.64	28.28	26.93
<hr/>						
W_L(%)	36.89					
W_P(%)	27.60					
I_P(%)	9.29					

- 6% de chaux:

	Limite de liquidité				Limite de plasticité	
Nombre de coups	15	18	20	16		
N ⁰ tare	1	2	3	4	1	2
Poids total humide	5.80	5.02	5.31	5.69	2.73	2.79
Poids sec	4.12	3.60	3.82	4.11	2.25	2.17
Poids eau	1.68	1.42	1.49	1.58	0.48	0.62
W%	40.77	39.44	39.00	38.44	21.33	28.57
<hr/>						
W_L(%)	37,67					
W_P(%)	28,72					
I_P(%)	8,95					

Récapitulatif de l'effet de l'ajout de chaux sur les marnes

Chaux %	w _l	w _p	I _p
0	30.96	18.99	11.97
2	34.85	25.2	9.65
4	36.89	27.60	9.29
6	37.67	28,72	8,95

2.2. Effet de ciment sur les marnes

- 2% de ciment :

	Limite de liquidité				Limite de plasticité	
Nombre de coups	32	30	24	18		
N ⁰ tare	1	2	3	4	1	2
Poids total humide	4.87	4.75	4.53	3.69	1.53	2.07
Poids sec	3.64	3.50	3.34	2.70	1.25	1.64
Poids eau	1.23	1.25	1.19	0.99	0.28	0.43
W%	33.79	35.71	35.62	36.66	22.40	26.21
W_L(%)	35.61					
W_P(%)	24.30					
I_P(%)	11.31					

- 4% de ciment :

	Limite de liquidité				Limite de plasticité	
Nombre de coups	23	25	26	22		
N ⁰ tare	1	2	3	4	1	2
Poids total humide	5.41	4.00	4.79	3.22	3.22	1.77
Poids sec	4.04	2.98	3.56	2.36	2.56	1.43
Poids eau	1.37	1.02	1.23	0.86	0.66	0.34
W%	33.91	34.22	34.55	36.44	25.78	23.77
W_L(%)	34.60					
W_P(%)	24.77					
I_P(%)	9.83					

- 6% de ciment :

	Limite de liquidité				Limite de plasticité	
Nombre de coups	20	24	26	30		
N ⁰ tare	1	2	3	4	1	2
Poids total humide	3.80	4.13	2.54	3.52	2.79	3.58
Poids sec	2.81	3.06	1.88	2.54	2.21	2.83
Poids eau	0.99	1.07	0.66	0.98	0.58	0.75
W%	35.23	34.96	35.10	38.58	26.24	26.50
W_L(%)	35,96					
W_P(%)	26,37					
I_P(%)	9,59					

Récapitulatif de l'effet de l'ajout de ciment sur les marnes

Ciment%	w_l	w_p	I_p
0	30.96	18.99	11.97
2	35.61	24.30	11.31
4	34.60	24.77	9.83
6	35.96	26,37	9,59

2.3. Effet de la chaux + ciment sur les marnes

- 2% de la chaux et ciment :

Nombre de coups	Limite de liquidité				Limite de plasticité	
	18	26	19	28		
N ⁰ tare	1	2	3	4	1	2
Poids total humide	3.20	2.90	3.68	3.42	2.36	2.32
Poids sec	2.33	2.15	2.75	2.52	1.89	1.88
Poids eau	0.87	0.75	0.93	0.9	0.47	0.44
W%	37.33	34.88	33.81	35.71	24.86	23.40
W_L (%)	35,02					
W_P (%)	24,13					
I_P (%)	10,89					

- 4% de la chaux et ciment :

Nombre de coups	Limite de liquidité				Limite de plasticité	
	17	20	18	19		
N ⁰ tare	1	2	3	4	1	2
Poids total humide	3.84	3.33	3.33	3.25	1.82	1.25
Poids sec	2.82	2.43	2.44	2.41	1.42	1.03
Poids eau	1.02	0.9	0.89	0.84	0.4	0.22
W%	36.17	37.03	36.47	34.85	28.16	21.35
W_L (%)	34.83					
W_P (%)	24.75					
I_P (%)	10.08					

- 6% de la chaux et ciment :

Nombre de coups	Limite de liquidité				Limite de plasticité	
	32	28	26	17		
N ⁰ tare	1	2	3	4	1	2
Poids total humide	3.65	2.56	2.83	3.21	1.34	1,01
Poids sec	2.72	1.93	2.08	2.37	1.08	0.80
Poids eau	0.93	0.63	0.75	0.84	0.26	0.21
W%	34.19	32.64	36.05	35.44	24.07	26.25
W_L (%)	34,70					
W_P (%)	25,16					
I_P (%)	9,54					

Récapitulatif de l'effet de l'ajout mixte de chaux et ciment sur les marnes

Chaux et ciment %	w_l	w_p	I_p
0	30.96	19.30	11.66
2	35.02	24.13	10.89
4	34.83	24.75	10.08
6	34.70	25.16	9.54

LES ESSAIS PROCTOR MODIFIER

1. Sol argileux :

1.1. Essai de référence

Eau %	4	6	8	10
W%	12,70	14,17	23,39	26,572
γ_d (g/cm ³)	1,34	1,40	1,30	1,25

$\gamma_d \text{ max} = 1,40 \text{ g/cm}^3$

$W_{\text{opt}} = 14,179 \%$

1.2. Effet de la chaux sur les argiles :

- 2% de chaux :

Eau %	2	4	6	8	10
W%	12,84	15,51	18,73	20,59	23,47
γ_d (g/cm ³)	1,30	1,36	1,34	1,32	1,28

$\gamma_d \text{ max} = 1,36 \text{ g/cm}^3$

$W_{\text{opt}} = 15,51 \%$

- 4% de chaux :

Eau %	2	4	6	8	10
W%	15,3	17,5	20,80	23,39	26,57
γ_d (g/cm ³)	1,28	1,30	1,33	1,29	1,22

$\gamma_d \text{ max} = 1,33 \text{ g/cm}^3$

$W_{\text{opt}} = 20,80 \%$

- 6% de chaux :

Eau %	2	4	6	8	10
W%	17,30	19,50	22,8	25,39	28,57
γ_d (g/cm ³)	1,27	1,28	1,30	1,26	1,18

$\gamma_d \text{ max} = 1,30 \text{ g/cm}^3$

$W_{\text{opt}} = 22,80 \%$

Récapitulatif de l'effet de l'ajout de chaux sur les argiles :

Chaux %	$\gamma_{d \max}$	W_{opt}
0	1,40	14,179
2	1,36	15,51
4	1,33	20,80
6	1,30	22,80

3.2. Effet de ciment sur les argiles :

- 2% de ciment :

Eau %	2	4	6	8	10
W%	11,70	13,53	15,73	19,80	23,47
γ_d (g/cm ³)	1,29	1,36	1,38	1,32	1,26

$$\gamma_d \max = 1,38 \text{ g/cm}^3$$

$$W_{opt} = 15,73\%$$

- 4% de ciment :

Eau %	2	4	6	8	10
W%	12,3	14,5	16,80	19,39	23,57
γ_d (g/cm ³)	1,28	1,36	1,38	1,32	1,22

$$\gamma_d \max = 1,38 \text{ g/cm}^3$$

$$W_{opt} = 16,80\%$$

- 6% de ciment :

Eau %	2	4	6	8	10
W%	13	14,50	17,50	20,40	23,20
γ_d (g/cm ³)	1,32	1,35	1,37	1,26	1,18

$$\gamma_d \max = 1,37 \text{ g/cm}^3$$

$$W_{opt} = 17,50\%$$

Récapitulatif de l'effet de l'ajout de ciment sur les argiles :

Chaux %	$\gamma_{d \max}$	W_{opt}
0	1,40	14,179
2	1,38	15,73
4	1,38	16,80
6	1,37	17,50

3.3. Effet de la chaux + ciment sur les argiles

- 2% de la chaux et ciment :

Eau %	2	4	6	8	10
W%	11,50	15,20	17,80	19,60	21,50
γ_d (g/cm ³)	1,30	1,38	1,36	1,33	1,31

$\gamma_d \text{ max} = 1,38 \text{ g/cm}^3$

$W_{opt} = 15,20\%$

- 4% de la chaux et ciment :

Eau %	2	4	6	8	10
W%	12,80	14,30	16,82	19,50	23,60
γ_d (g/cm ³)	1,29	1,33	1,36	1,29	1,22

$\gamma_d \text{ max} = 1,36 \text{ g/cm}^3$

$W_{opt} = 16,82\%$

- 6% de la chaux et ciment :

Eau %	2	4	6	8	10
W%	12,32	14,52	17,83	20,39	23,57
γ_d (g/cm ³)	1,28	1,29	1,36	1,34	1,23

$\gamma_d \text{ max} = 1,36 \text{ g/cm}^3$

$W_{opt} = 17,83\%$

Récapitulatif de l'effet de l'ajout mixte de chaux et ciment sur les argiles

Chaux %	$\gamma_d \text{ max}$	W_{opt}
0	1,40	14,179
2	1,38	15,20
4	1,36	16,82
6	1,36	17,83

2. Sol marneux :

2.1. Essai de référence

Eau %	2	4	6	8	10
W%	5,60	7,34	9,24	10,91	13,78
γ_d (g/cm ³)	1,54	1,583	1,70	1,69	1,56

$$\gamma_d \max = 1,70 \text{ g/cm}^3$$

$$W_{opt} = 9,24 \%$$

4.1. Effet de la chaux sur les marnes :

- 2% de chaux:

Eau %	2	4	6	8	10
W%	7,10	8,39	10,50	12,34	13,26
γ_d (g/cm ³)	1,58	1,55	1,58	1,57	1,64

$$\gamma_d \max = 1,58 \text{ g/cm}^3$$

$$W_{opt} = 10,15 \%$$

- 4% de chaux:

Eau %	2	4	6	8	10
W%	4,21	5,89	7,89	9,50	15,69
γ_d (g/cm ³)	1,58	1,53	1,59	1,64	1,49

$$\gamma_d \max = 1,64 \text{ g/cm}^3$$

$$W_{opt} = 9,50\%$$

- 6% de chaux:

Eau %	2	4	6	8	10
W%	6,21	7,89	9,89	11,50	15,69
γ_d (g/cm ³)	1,53	1,54	1,60	1,58	1,45

$$\gamma_d \max = 1,60 \text{ g/cm}^3$$

$$W_{opt} = 9,89 \%$$

Récapitulatif de l'effet de l'ajout de chaux sur les marnes :

Chaux %	$\gamma_d \max$	W_{opt}
0	1,70	9,24
2	1,58	10,15
4	1,64	9,50
6	1,60	9,89

4.2. Effet de ciment sur les marnes :

- 2% de ciment:

Eau %	2	4	6	8	10
W%	5,12	6,21	8,07	9,63	12,99
γ_d (g/cm ³)	1,61	1,58	1,56	1,66	1,63

$$\gamma_{d \max} = 1,66 \text{ g/cm}^3$$

$$W_{opt} = 9,63 \%$$

- 4% de ciment:

Eau %	2	4	6	8	10
W%	6,20	7,20	8,37	9,74	11,80
γ_d (g/cm ³)	1,58	1,60	1,6	1,74	1,67

$$\gamma_{d \max} = 1,74 \text{ g/cm}^3$$

$$W_{opt} = 9,74\%$$

- 6% de ciment:

Eau %	2	4	6	8	10
W%	4,69	6,88	8,06	10,12	15,57
γ_d (g/cm ³)	1,62	1,64	1,66	1,67	1,57

$$\gamma_{d \max} = 1,67 \text{ g/cm}^3$$

$$W_{opt} = 10,12\%$$

Récapitulatif de l'effet de l'ajout de ciment sur les marnes :

Chaux %	$\gamma_{d \max}$	W_{opt}
0	1,70	9,24
2	1,66	9,63
4	1,74	9,74
6	1,67	10,12

4.3. Effet de la chaux + ciment sur les argiles:

- 2% de la chaux et ciment:

Eau %	2	4	6	8	10
W%	4,79	6,35	8,01	10,04	11,61
γ_d (g/cm ³)	1,58	1,41	1,62	1,69	1,61

$$\gamma_{d \max} = 1,69 \text{ g/cm}^3$$

$$W_{opt} = 10,04 \%$$

- 4% de la chaux et ciment:

Eau %	2	4	6	8	10
W%	3,70	5,15	7,47	9,34	10,64
γ_d (g/cm ³)	1,61	1,62	1,63	1,67	1,67

$$\gamma_{d \max} = 1,67 \text{ g/cm}^3$$

$$W_{opt} = 10,64 \%$$

- 6% de la chaux et ciment:

Eau %	2	4	6	8	10
W%	3,15	3,90	6,07	7,81	10,44
γ_d (g/cm ³)	1,65	1,67	1,64	1,66	1,67

$$\gamma_{d \max} = 1,67 \text{ g/cm}^3$$

$$W_{opt} = 10,44\%$$

Récapitulatif de l'effet de l'ajout mixte de chaux et ciment sur les marnes :

Chaux %	$\gamma_{d \max}$	W_{opt}
0	1,70	9,24
2	1,69	10,04
4	1,67	10,64
6	1,67	10,44

Résumé

Dans le cadre de la réutilisation des sols plastiques dans la réalisation des remblais routiers et afin de préserver les géo-ressources, le présent travail consiste en une étude expérimentale des paramètres et facteurs pertinents qui gouvernent le comportement en laboratoire de quelques sols plastiques extraits de la région de Jijel (nord-est Algérien) traités à la chaux et/ou aux liants hydrauliques.

Ce mémoire dresse en premier lieu une revue bibliographique de quelques travaux de recherche sur la stabilisation des sols plastiques. Il présente par la suite, une étude au laboratoire sur deux types des sols plastiques (argiles et marnes) stabilisés selon divers dosages de chaux, de ciment et dans un troisième volet selon un traitement mixte chaux-ciment. Les résultats obtenus montrent que l'incidence du traitement par la chaux rend le mélange moins sensible à l'eau d'où l'aplatissement de la courbe Proctor et l'augmentation de la teneur en eau optimale. Contrairement à l'utilisation du ciment où du traitement mixte (chaux-ciment) ou la teneur en eau du mélange sol-ciment ou sol-chaux-ciment se trouve diminuée, en revanche on ne note pas de modifications importantes sur la courbe Proctor.

Mots-clés : liants hydrauliques, argiles et marnes, teneur en eau, courbe Proctor

Abstract

As part of the reuse of plastic soils in road embankments and in order to preserve geo-resources, this work consists of an experimental study of the relevant parameters and factors that govern the laboratory behavior of some plastic soils extracted from the soil. Region of Jijel (North-East of Algeria) treated with lime and / or hydraulic binders.

This paper firstly provides a bibliographical review of some research on the stabilization of plastic soils. It then presents a laboratory study on two types of plastic soil (clays and marls) stabilized according to various dosages of lime, cement and in a third shutter according to a mixed lime-cement treatment. The results obtained show that the incidence of lime treatment makes the mixture less sensitive to water, hence the flattening of the Proctor curve and the increase in the optimum water content. Unlike the use of cement or mixed lime-cement or the water content of the soil-cement or soil-lime-cement mixture is lowered, on the other hand, there are no significant changes in the Proctor curve.

Keywords: hydraulic binders, clays and marls, optimum water content, Proctor curve.

ملخص

كجزء من إعادة استخدام الأتربة الطينية في تنفيذ السدود والحفاظ على الموارد الجيولوجية. هذا العمل هو عبارة عن دراسة تجريبية للعوامل التي تحكم سلوك مختبر لبعض الأتربة الطينية في منطقة جيجل (شمال شرق الجزائر) معالجة بالجير والإسمنت.

وتستند هذه المذكرة في مقامها الأول الى استعراض بيبليوغرافي لبعض البحوث على استقرار هذه الأتربة الطينية متمثلة في دراسة نوعين من التربة (الطين والمارن) والتي استقرت وفقا لنسب مختلفة من الجير والإسمنت، وعنصر ثالث مختلط بكميات متساوية من الروابط السابق ذكرها .

وتظهر لنا النتائج أن العلاج بالجير يجعل من الخليط أقل حساسية من الماء وزيادة في نسبة محتوى الماء الأمثل بحيث يجعل من منحنى بروكتور مسطح أكثر .

على عكس ذلك فإن استخدام الإسمنت أو المعالجة المختلطة (الجير - الإسمنت) او محتوى الماء في التربة مع الإسمنت أو التربة مع الإسمنت والجير، فإن كمية محتوى الماء الأمثل منخفضة ولا نلاحظ أي تغيرات على منحنى بروكتور .

الكلمات المفتاحية: دمك، الجير والإسمنت، الطين والمارن، محتوى الماء الأمثل، منحنى بروكتور.