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*

جـــامعـــة محمد الصديق بن يحي- 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

كليـة عـــلوم الطـــبيعـة و الحـــــياة
قســـــم: علوم الأرض والكون

Mémoire de fin d'études

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

Option : **Génie Géologique**

Thème

Traitement des sols plastiques avec des déchets inertes du secteur « bâtiments et travaux publics - BTP »

Membres de Jury
Président : Mr RAMOUM Karim
Examinateur : Mme BOUROUDI Nihed
Encadrants : Dr. BENZAID Riad

Présenté par :
Melle BOUKEZOULA Soumia

Année Universitaire 2017-2018

Numéro d'ordre (bibliothèque) :……..…

Remerciements

Tout d'abord et avant tout, je remercie DIEU tout le puissant qui m'a donné la force, volonté et le courage pour accomplir ce travail.

Mes remerciements vont tout spécialement à mes parents qui ont su me supporter et encourager tout au long de ma vie, ainsi que pour leur aide inestimable, leur patience, et leur soutien indéfectible.

*C'est avec un grand plaisir que je tiens à exprimer mes sincères remerciements à mon promoteur **Dr BENZAID Riad,** vous avez su et pu faire de mon travail l'une de mes expériences les plus enrichissants, veuillez trouver ici l'expression de mes sentiments de respect, les meilleurs.*

*Je remercie également **Mr Tekkouk Mustapha** pour ses conseils et sa disponibilité ainsi que tous les membres du jury qui vont examiner ce travail.*

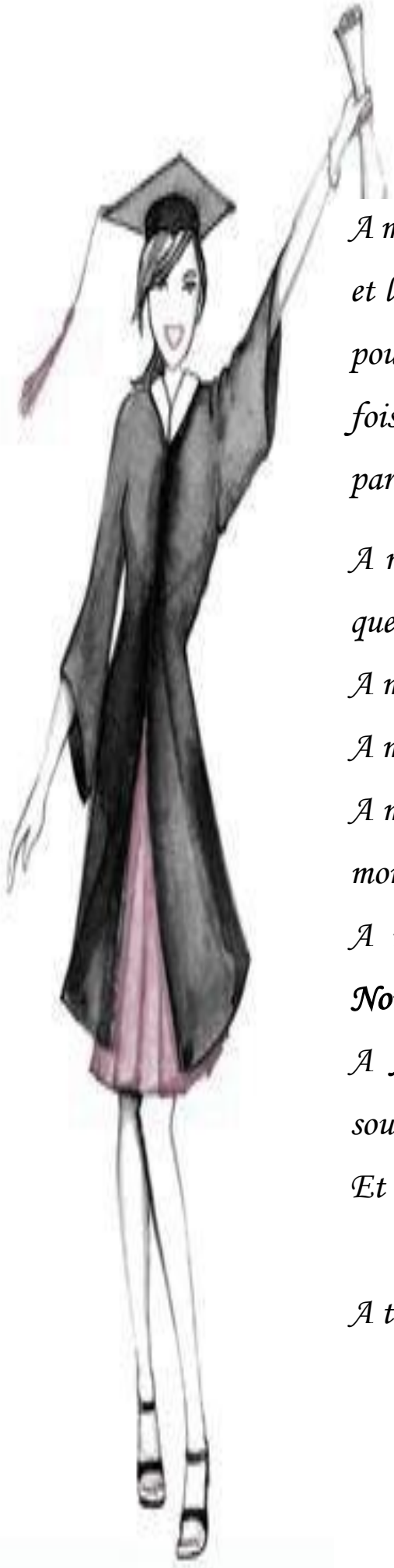
*Avec sa disponibilité sans faille **Mr Y. DAKSI** directeur de sols et fondations au **LVB ZEKKOUR**; je peux maintenant vous dire quelle a été ma joie de vous côtoyer, votre disponibilité tout au long de mon stage au sein de votre laboratoire, votre attention inlassable, votre soutien moral m'ont toujours guidé je ne sauri assez-vous remercier.*

J'adresse mes plus sincères remerciements à mes amies et mes proches qui m'ont toujours soutenue et encouragée continuellement au cours de la réalisation de ce mémoire.

Enfin j'adresse mes remerciements à tout le personnel du laboratoire des matériaux pour leur disponibilité.

A tous, un grand Merci

Dédicaces



A mes parents pour votre énorme sacrifice à m'offrir le repos et le bonheur, pour l'éducation que vous m'avez inculquée, pour votre entier engagement à être à mes côtés à chaque fois que j'ai besoin d'un soutien moral et matériel. Très chers parents, je ne vous remercierai jamais assez pour vos actes.

A ma grande mère Que Dieu ait pitié d'elle ; je souhaitais que tu sois être présente pour me partager ma joie.

A mes chers frères ***Houssem*** *et* ***Mouhamed Ali.***

A mes chères sœurs ***Hasna*** *et* ***Djouhaina.***

A mes chères amies : ***Asma, Rima, Aya, Hadjer, Samiha,*** *et mon amie intime* ***Ghada.***

A mes cousines : ***Ilham, Amina, Souad, Lamia, Oulia, Noujoud, Fariel , Wassila, et Noura.***

A ***Abderrahim BOUMANA*** *qui m'a encouragé et m'a soutenu.*

Et spécialement à mes petits princes ***Daïa*** *et* ***Sadjed.***

A tous mes collègues de la promotion M II GG 2018.

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 avec des déchets du secteur « bâtiments et travaux publics – BTP ».

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 déchets (briques et de plâtre). Les résultats obtenus montrent que l'incidence du traitement par ces deux type de déchets rend le mélange moins sensible à l'eau d'où l'aplatissement de la courbe Proctor avec une légère augmentation de la teneur en eau optimale.

Mots-clés : Déchets du BTP, argiles et marnes, teneur en eau, courbe Proctor

ملخص

في سياق إعادة استخدام التربة البلاستيكية في بناء الطرق، وللحفاظ على الموارد الجغرافية، يتكون العمل الحالي من دراسة تجريبية للعوامل ذات الصلة التي تحكم السلوك المختبري لبعض التربة البلاستيكية المستخرجة من منطقة جيجل (شمال شرق الجزائر) بنفايات من قطاع "البناء والأشغال العامة" هذه الأطروحة هي في المقام الأول مراجعة ببليوغرافية لبعض الأبحاث حول استقرار التربة البلاستيكية .ثم تقديم دراسة مختبرية على نوعين من التربة البلاستيكية (الطين والمارل) وفقا لجرعات مختلفة من النفايات (الأجور والجبس). تظهر النتائج التي تم الحصول عليها أن العلاج بهذين النوعين من النفايات يجعل المزيج أقل حساسية للماء، وبالتالي تسطيح منحنى بروكتور مع زيادة طفيفة في المحتوى المائي الأمثل.

الكلمات المفتاحية: مخلفات البناء، الطين والمارل، محتوى الماء، منحنى بروكتور

Abstract

In the context of the reuse of plastic soils in the construction of road embankments and in order to preserve the geo-resources, the present work consists of an experimental study of the relevant parameters and factors that govern the laboratory behavior of some plastic soils extracted from the Jijel region (northeastern Algeria) treated with waste from the sector "buildings and public works - construction".

This thesis is first of all a bibliographic review of some research on the stabilization of plastic soils. He then presented a laboratory study on two types of plastic soils (clays and marl) stabilized according to various dosages of waste (bricks and plaster). The results obtained show that the incidence of treatment with these two types of waste makes the mixture less sensitive to water, hence the flattening of the Proctor curve with a slight increase in the optimum water content.

Key words: Construction waste, clay and marl, water content, Proctor curve

Liste des figures

Figure 1.1. Courbes de compactage suivant la nature du sol. 11
Figure 2.1. Appareillage Proctor et C.B.R 17
Figure 2.2. Schéma de principe de la répartition des coups de dame sur une couche..... 18
Figure 2.3. Courbe expérimentale schématique d'un essai Proctor 19
Figure 2.4. Courbe de compactage pour différents efforts de compactage sur un même sol.... 20
Figure 3.1. Matériel d'épandage : épandeuse/tombereau articulé..... 21
Figure 3.2. Matériel de malaxage : engin pulvi-mixeur..... 22
Figure 3.3. Arroseuse enfouisseuse, équipée d'un débitmètre 23
Figure 3.4. Vue d'un chantier en préparation pour un traitement 24
Figure 3.5. La phase de l'épandage du liant sur le sol à traiter 24
Figure 3.6. Le malaxage du liant avec le sol 25
Figure 3.7. L'opération du compactage partiel 26
Figure 3.8. Compactage final des sols traités 26
Figure 3.9. Protection de surface de la couche traitée..... 27
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) 28
Figure 4.2. Représentation des limites d'Atterberg 30
Figure 4.3. Classification des sols étudiés par le diagramme de plasticité de Casagrande 31
Figure 4.4. Influence du traitement à la chaux sur les courbes Proctor des argiles..... 37
Figure 4.5. Influence du traitement à la chaux sur les courbes Proctor des marnes..... 37
Figure 4.6. Influence du traitement au ciment sur les courbes Proctor des argiles 40
Figure 4.7. Influence du traitement au ciment sur les courbes Proctor des marnes 40

Liste des tableaux

Tableau 1.1. Classification des déchets inertes du BTP 5
Tableau 2.1. Dimensions des moules CBR et proctor 16
Tableau 2.2. Modalités d'exécution des essais Proctor normal et modifié 17
Tableau 2.3. Quantité du sol utilisé pour chaque couche 18
Tableau. 4.1. Coordonnées géographiques des deux sites de prélèvement 29
Tableau 4.2. Caractéristiques physiques des deux sols utilisés dans la présente étude 29
Tableau 4.3. Résultats des essais des limites d'Atterberg 30
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 31
Tableau 4.6. Consistance du sol en fonction de l'indice I_C 31
Tableau 4.7. Évaluation du potentiel de gonflement en fonction d'I_P 32
Tableau 4.8. Estimation du potentiel de gonflement en fonction d'I_P des deux sols étudiés.... 32
Tableau 4.9. Résultats de l'essai au bleu de méthylène sur les deux sols étudiés 32
Tableau 4.10. Classification des sols en fonction de VBS 32
Tableau 4.11. Classification GTR des sols étudiés 33
Tableau 4.12. Détail du programme expérimental 33
Tableau 4.13. Résultats du traitement des sols argileux avec les déchets des briques 34
Tableau 4.14. Récapitulatif de l'effet de l'ajout de déchets de briques sur les argiles 35
Tableau 4.15. Résultats du traitement des sols marneux avec les déchets des briques..... 35
Tableau 4.16. Récapitulatif de l'effet de l'ajout de déchets de briques sur les marnes 36
Tableau 4.17. Résultats du traitement des sols argileux avec les déchets de plâtre..... 38
Tableau 4.18. Récapitulatif de l'effet de l'ajout de déchets de plâtre sur les argiles..... 38
Tableau 4.19. Résultats du traitement des sols marneux avec les déchets de plâtre..... 39
Tableau 4.20. Récapitulatif de l'effet de l'ajout de déchets de plâtre sur les marnes..... 39

Sommaire

Introduction Générale..... 1

Chapitre 1 : Etude bibliographique

1.1. Introduction 3

1.2. Les déchets inertes du BTP « Bâtiment et Travaux Publics » 4

1.3. Typologie des matières inertes et des déchets du BTP 4

1.3.1. Le béton..... 5

1.3.2. La brique 5

1.3.3. Tuiles et céramiques..... 6

1.3.4. Le verre 6

1.3.5. Les enrobés..... 6

1.3.6. Terres et cailloux..... 7

1.3.7. Ballast de voie 7

1.4. Les sols évolutifs..... 8

1.4.1. Les argiles 8

1.4.2. Les limons 8

1.4.3. Les marnes..... 8

1.5. Les principaux problèmes des sols argileux..... 9

1.5.1. Phénomènes de retrait-gonflement..... 9

1.5.2. Les tassements..... 10

1.5.3. Les glissements de terrain 10

1.6. Traitement des sols évolutifs..... 10

1.6.1. Le compactage des sols 10

1.6.2. Traitement des sols à la chaux..... 11

1.6.3. Traitement des sols au liant hydraulique..... 12

1.6.4. Autres traitements 12

Chapitre 2 : Essai de compactage au laboratoire

2. 1. Introduction 14

2.2. Principe de l'essai Proctor normal et Proctor modifié (NF P 94-093) 14

2.3. Préparation des éprouvettes 15
2.4. Mode opératoire 16
2.4.1. Choix du type de moule 16
2.4.2. Exécution de l'essai 16
2.4.3. Présentation des résultats 19

Chapitre 3 : Matériels et exécution des travaux in-situ

3.1. Introduction 21
3.2. Matériels utilisés dans les chantiers de traitement des sols 21
3.2.1. Matériels de stockage 21
3.2.2. Matériels d'épandage 21
3.2.3. Matériels de malaxage 22
3.2.4. Matériels d'arrosage 23
3.2.5. Matériels de compactage 23
3.3. Conditions de mise en œuvre et exécution des travaux de traitement des sols 23
3.3.1. Préparation du sol à traiter 23
3.3.2. Ajustement de l'état hydrique du sol 24
3.3.3. Epandage du liant 24
3.3.4. Malaxage 24
3.3.5. Compactage partiel 25
3.3.6. Réglage 26
3.3.7. Compactage final 26
3.3.8. Protection de surface 27
3.4. Conclusion 27

Chapitre 4 : Étude expérimentale

4.1. Provenance et caractéristiques physiques des sols étudiés 28
4.1.1. Situation géographique et localisation des deux sites de prélèvement 28
4.1.2. Caractéristiques physiques des sols étudiés 29
4.2. Programme expérimental 33
4.3. Présentation des résultats expérimentaux 34
4.3.1. Effet du traitement avec les déchets des briques sur les caractéristiques proctor 34

4.3.1.1. Sol argileux avec ajout de déchets de briques 34

4.3.1.2. Sol marneux avec ajout de déchets de briques 35

4.3.1.3. Analyses et discussion des résultats obtenus 36

4.3.2. Effet du traitement avec les déchets du plâtre sur les courbes Proctor 38

4.3.2.1. Sol argileux avec ajout de déchets de plâtre 38

4.3.2.2. Sol marneux avec ajout de déchets de plâtre 39

4.3.2.3. Analyses et discussion des résultats obtenus 39

Conclusion générale 42

Références bibliographiques 44

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 plastiques avec quelques déchets issus du secteur « bâtiments et travaux publics - BTP » à savoir le déchet des briques et du plâtre. L'idée est en développement croissant en matière de recherche ces dernières années. Ce développement est dû essentiellement à deux causes :

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 développement 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 le matériel de traitement. Les perfectionnements énormes apportés aux matériels d'épandage et de malaxage et l'augmentation du parc des engins 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 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 vis-à-vis le compactage de quelques sols plastiques extraits de la région de Jijel (nord-est Algérien) traités avec les déchets du secteur du bâtiments et travaux publics (BTP).

1.1 Introduction

Les méthodes d'amélioration mécaniques et hydromécaniques des sols sont couteuses et demandent un savoir-faire élevé ce qui n'est toujours permis dans les pays en voie de développement comme l'Algérie. De plus, les méthodes d'amélioration thermiques des sols restent elles aussi efficaces mais dont l'emploi reste limité en raison de leurs coûts très élevés.

Par ailleurs, la méthode d'amélioration chimique des sols par addition de la chaux, du ciment ou d'autres ajouts cimentaires reste la plus utilisée et la moins onéreuse. Cette technique s'est développée très rapidement à travers le monde et qui est encore menée à connaitre une importante croissance (Wild, 2009). Donc la valorisation des sols possédant des caractéristiques médiocres est devenue plus facile en les stabilisant et en assurant leur mise en œuvre pour la réalisation des plates-formes rigides et stables, sous forme de couches de forme traitées, en visant des caractéristiques mécaniques élevées. A titre d'exemple, la muraille de chine comporte des indices d'utilisation de la chaux. Dans un sol expansif, l'ajout de 2% à 8% de chaux ou de ciment diminue visiblement son potentiel de gonflement (Chen, 1988).

L'industrie des matériaux de construction est toujours accompagnée par des produits secondaires ou des déchets qui ont une incidence sur l'environnement. Dans les pays occidentaux le rejet des déchets solides, provenant des usines des matériaux de construction et des démolitions des constructions, dans les décharges publiques est strictement interdit. La gestion des déchets solides est une des principales préoccupations environnementales dans le monde entier (Bourmatte et Houari, 2013).

Les différentes sortes de déchets et sous-produits sont examinés en fonction de leurs possibilités d'emploi en technique routière, de leurs utilisations courantes et des problèmes qu'ils posent dans le contexte économique, technique et environnemental ainsi que les recherches à entreprendre en vue de promouvoir leur utilisation plus généralisée.

Des résultats préliminaires montrent que l'incorporation de 5 à 15% de déchets de briques dans un broyeur à haute énergie, permet une amélioration des principales caractéristiques physiques du nouveau liant (retrait, densités, expansion à chaud, etc.), avec des propriétés mécaniques comparables aux ciments portlands composés de classe de résistance normale de 42,5 MPa (Nigri et al., 2011).

Ces dernières années l'utilisation des déchets industriels dans la production du ciment composé à faible impact environnemental (éco-ciment) est une des grandes préoccupations environnementales et économiques des chercheurs et industriels dans le domaine de ciment (Bouhmid, 2011).

Des millions de tonnes de différents déchets industriels sont éliminés dans des lieux d'enfouissement chaque année en Algérie et ailleurs dans le monde. Une proportion importante de ces déchets possède des caractéristiques chimiques ou physiques intéressantes qui répondent aux spécifications normatives actuelles pour les matériaux cimentaires traditionnels, tels que les cendres volantes, la fumée de silice et le laitier de haut fourneau. Selon plusieurs chercheurs écologistes, la substitution d'une partie du ciment par des ajouts hydrauliques et pouzzolaniques provenant de déchets industriels, permettrait non seulement d'économiser de l'énergie et de réduire les émissions de gaz à effet de serre, mais aussi d'améliorer la résistance mécanique, la durabilité du béton et de conserver des ressources naturelles de plus en plus rares (Bouhmid, 2011).

1.2 Les déchets inertes du BTP « Bâtiment et Travaux Publics »

Les déchets inertes sont les déchets qui ne subissent aucune modification physique, chimique ou biologique importante (Conseil de l'Union Européenne 1999/31/CE du 26 avril 1999). Les déchets inertes ne se décomposent pas, ne brûlent pas et ne produisent aucune autre réaction physique ou chimique, ne sont pas biodégradables et ne détériorent pas d'autres matières avec lesquelles ils entrent en contact, d'une manière susceptible d'entraîner une pollution de l'environnement ou de nuire à la santé humaine, exemple : béton armé et non armé, les pierres, les briques, les carrelages, la faïence, les tuiles, etc.

A titre d'exemple, en Europe, les entreprises des travaux publics, pour qui ces déchets inertes représentent la quasi-totalité de la production (environ 93 %), en valorisent ou en réutilisent 63 % dès la sortie du chantier**.** Dans le bâtiment, qui génère des déchets inertes à 75 %, la valorisation dès la sortie de chantier est moitié moindre (46 %), les entreprises ayant souvent recours à un collecteur de déchets. Une simple comparaison est suffisante pour imaginer la situation en Algérie.

Les déchets de briques sont des sous-produits de l'industrie des produits rouges. Ils se trouvent en grande quantité au niveau national à cause du nombre élevé de briqueteries et des taux de rejets (briques non conformes où cassées) qu'elles génèrent et qui représentent 10 à 15 % de leurs productions (Harbi, 2009).

1.3 Typologie des matières inertes et des déchets du BPT

Afin de préciser le type de déchet issus de ces chantiers, Le Tableau 1-1 montre la liste des déchets inertes du BTP. Elle réfère les déchets de béton, briques tuiles, céramiques et ardoises », de verre, d'enrobés, de terres et cailloux et enfin de ballast de voie.

Tableau 1-1: Classification des déchets inertes du BTP (Code l'environnement Français, 2014).

Type de déchets	**Description**
Béton, briques, tuiles, céramiques, ardoises	Béton
	Brique
	Tuiles et céramiques
	Mélange de béton, briques, tuiles et céramiques ne contenant pas de substance dangereuse
Verre	Vitre (hors menuiserie)
Enrobés	Mélange bitumineux ne contenant pas de goudron
Terres et cailloux	Pierres et terres de déblais ne contenant pas de substance dangereuse
Ballast de voie	Ballast ne contenant pas de substance dangereuse

1.3.1 Le béton

Le béton est un matériau composite, c'est-à-dire que c'est un multi-matériaux. En effet, il est formé par un mélange d'eau, de granulats (sable et gravillons), de ciment (mélange en poudre de chaux et de calcaire argileux) et éventuellement complété par des adjuvants et des additions. Les proportions standards à mélanger avec un sac de ciment de 25 kg sont 50 kg de sable, 75 kg de gravier et 10 litres d'eau (France béton, 2002). Le choix du ciment, des adjuvants et de la forme des granulats permet d'obtenir des caractéristiques très diverses. Il existe plusieurs types de béton utilisés dans le secteur du BTP à savoir; le béton armé, le béton fibré, et le béton préfabriqué.

1.3.2 La brique

La brique est un matériau fait d'argile ou d'autres matières argileuses, avec ajout ou non de sable ou autre adjuvant, porté à une température suffisamment élevée pour former une liaison céramique.

La brique est à la fois un isolant, un régulateur thermique et un matériau résistant. Les différents types de briques utilisés dans le bâtiment sont les suivants : briques alvéolaires et murs, briques creuses et cloisons, briques de parement. Les briques alvéolaires servent à la construction de mur porteur intérieur à un bâtiment. Les briques creuses et cloisons sont utilisées pour la construction de paroi verticale d'habillage et de protection de l'isolant dans les

systèmes constructifs. Les briques de parement peuvent être utilisées aussi bien pour la construction d'un mur porteur constitutif de l'enveloppe d'un bâtiment que pour le revêtement des murs intérieurs et extérieurs (Fédération Française des tuiles et des briques et Untec, 2013).

1.3.3 Tuiles et céramiques

Les tuiles et céramiques (cuites) utilisées dans le BTP sont elles aussi constituées principalement de matières argileuses. Leur procédé de fabrication consiste à solidifier à haute température une pâte humide plastique ou alors une poudre préalablement comprimée.

Les céramiques présentes dans le BTP sont les terres cuites utilisées afin d'obtenir des briques, des tuiles de toiture, des conduits de fumée, des tuyaux de drainage, des revêtements de sol et mur. L'autre type de céramique présent est le grès avec les carreaux de sols, les tuyaux et les équipements sanitaires.

1.3.4 Le verre

Par définition, le verre est une substance solide, transparente et cassante, obtenue par la fusion d'un sable siliceux avec du carbonate de sodium ou de potassium (Centre national de ressources textuelles et lexicales - CNRTL, 2012).

Le verre est majoritairement présent sous forme de vitre dans le secteur du bâtiment. De type silicosodocalcique, différentes configurations lui sont conférées : le verre monolithique, le verre feuilleté avec une feuille de PVB, le vitrage isolant (deux feuilles de verre séparées par une lame d'air ou de gaz d'épaisseur constante et assemblées dans un châssis), le verre teinté, le verre réfléchissant comportant du métal ou des oxydes de métal dans sa masse ou sur sa surface. La séparation du verre dans les chantiers de déconstruction et réhabilitation demande une main d'œuvre spécifique.

1.3.5 Les Enrobés

L'enrobé, aussi appelé asphalte, est un matériau composite. Il est composé de graviers de diamètre supérieur à 63 micromètres, de fillers (sable et poussière de section inférieure à 63 micromètres) et d'un liant hydrocarburé (composé essentiellement de bitume) qui assure le lien entre les granulats (Aquepa, 2014). Il faut bien distinguer les enrobés à base de liant bitumineux (issus du pétrole) des enrobés à base de liant de goudron (issue de la houille[1]), car ceux à base de goudron n'entrent pas dans la catégorie des déchets inertes.

L'enrobé est utilisé pour la construction et l'entretien des infrastructures routières, plus précisément pour le revêtement autoroutier, routier, de voirie urbaine, portuaire, aéroportuaire, etc. Il existe plusieurs types d'enrobés: les bétons bitumineux (BBSG, BBTM), les bétons

[1] **Houille** : Combustible minérale provenant de la décomposition et de la transformation des végétaux au cours des temps

bitumineux minces continus à grenailler, les bétons bitumineux drainants (BBdr), les enduits superficiels d'usure et les enrobés à liant végétal (Grand Lyon, 2010).

1.3.6 Terres et cailloux

Les terres et cailloux correspondent aux pierres et terres de déblais ne contenant pas de substance dangereuse. La norme NF P 11 300 classe les différents types de matériaux selon leurs caractéristiques géotechniques (granulométrie, valeur de bleu de méthyle VBS, coefficient Los Angeles LA, coefficient micro-deval en présence d'eau MDE, etc.).

Ainsi, se distinguent les classes de A (sols fins), B (sols sableux et graveleux avec fines), C (sols comportant des fines et des gros éléments) et D (sols sensibles à l'eau) correspondant aux différents types de sols, la classe F (sols organiques, sous-produits industriels) correspondant aux sols contaminés par au moins 3 % de matière organique, enfin la classe R représentant les matériaux rocheux. (Association française de normalisation AFNOR, 1992)

Les terres et cailloux sont utilisés comme remblais soit pour la construction de nouvelles infrastructures soit dans des carrières. Concernant les nouvelles infrastructures, il s'agit essentiellement de construction de remblais et de couches de forme.

1.3.7 Ballast de voie

Généralement le ballast est de la pierre concassée, de granulométrie variant entre 31,5 mm et 50 mm. Le type de roches utilisées varie suivant les régions et les pays en fonction du climat. Ainsi le granite, la diorite, le calcaire ou encore le calcaire siliceux sont des roches régulièrement préconisées. Encore pour le nivellement, des gravillons fins (10 mm à 35 mm) sont employés (Réseau ferré de France).

Le ballast de voie correspond au lit de pierre ou de cailloux sur lesquels usuellement reposent les lignes de chemin de fer. Il permet à la fois d'empêcher la végétation de pousser sous les voies, d'effectuer un drainage efficace lors des intempéries, de limiter les vibrations et les déformations longitudinales des voies ferrées. Afin d'avoir un ordre de grandeur sur la quantité de ballast requise, l'UNPG [2] affirme que pour un kilomètre de voie ferrée, 10.000 tonnes de granulats sont nécessaires (UNPG, 2011).

[2] **UNPG** : Union nationale des producteurs de granulats

1.4 Les sols évolutifs

On peut définir un matériau évolutif comme un matériau dont les propriétés physiques et mécaniques évoluent dans le temps. Les sols qui ont un caractère évolutif sont les sols fins (limons, argiles, marne, etc.) qui peuvent créer dans les ouvrages, des tassements, gonflements et glissements pendant leur durée de vie.

1.4.1. Les argiles

Les argiles sont des roches sédimentaires à grains fins, de taille inférieure à 5 µm, composée pour une large part de minéraux spécifiques, silicates en général, d'aluminiums plus ou moins hydratés, qui présentent une structure feuilletée qui explique leur plasticité, où bien une structure fibreuse qui explique leurs qualités d'absorption.

Elles absorbent l'eau et forment une pâte imperméable (perméabilité inférieure à 0,2 mm/h), appelée couramment terre glaise, coloriée par des oxydes de fer en ocre, rouge, vert. Les argiles peuvent être gonflantes, notamment celles de la famille des Montmorillonites lorsqu'elles absorbent l'eau et, au contraire, diminuer de volume sous l'effet de la sécheresse, allant jusqu'à craqueler en surface et même sur une profondeur de 2 à 4 m. Par ailleurs, sous l'effet d'une charge, par exemple celle d'une construction, une partie de l'eau absorbée contenue entre les grains d'argile est chassée, ce qui a pour conséquence de provoquer un tassement sensible du sol.

Les argiles représentent en général une assise acceptable à médiocre lorsqu'elles sont recouvertes par d'autres couches de terrain. En revanche, elles sont dangereuses lorsqu'elles affleurent au niveau du sol, du fait de leur instabilité, se traduisant par des variations de volume et un fluage dans les terrains en pente. D'autres types de sédiments à grains fins contiennent des argiles telles que les marnes et lœss.

1.4.2. Les limons

Les limons, constitués de silt et de lœss, possèdent un squelette siliceux à silicocalcaire à grains fins. Leur taille est située entre celle des sables et celle des argiles ; la teneur en argile est variable. Ils sont peu perméables et constituent des terres de culture fertiles. Ils sont à éviter pour les fondations.

1.4.3. Les marnes

Les marnes sont à la fois argileuses et calcaires. On considère, selon leur composition, trois grandes catégories :

- les marnes argileuses qui contiennent 5 à 35 % de carbonate de calcium ;

- les marnes proprement dites et les calcaires marneux avec des taux respectivement de 35 à 65 % et 65 à 95 %.

Comme pour les argiles, les marnes argileuses présentent notamment l'inconvénient de craqueler sur une certaine profondeur en cas de sécheresse. Les marnes ont souvent fait l'objet d'exploitation en carrières à ciel ouvert où en souterrain pour donner respectivement : de la chaux avec les marnes argileuses ; de la chaux hydraulique avec les marnes proprement dites ; et du ciment avec les marnes calcaires ou calcaires marneux. D'une façon générale, les marnes sont une assise de fondations bonne à moyenne en l'absence de gypse. En revanche, elles sont médiocres, voire dangereuses, lorsqu'elles sont très argileuses en affleurement ou lorsqu'elles se situent au-dessus d'une masse de gypse, avec risque de formation de fontis[3]. Les marnes sont des roches relativement tendres, elles subissent une géodynamique très active à leur surface et leur fragilité les rend très vulnérables aux aléas naturels et anthropiques.

On peut conclure que l'évolution des sols fins est dus à la présence des minéraux argileux dans les sols tels que : les marnes, les argiles qui manifestent une grande sensibilité à l'air (retrait, fissuration désagrégation progressive des couche de sol) et une forte affinité pour l'eau (avec les conséquences classiques de l'humidification : gonflement, déconsolidation et perte des caractéristique mécaniques).

1.5 Les principaux problèmes des sols argileux

Dans de nombreux pays du monde, le gonflement est à l'origine de fréquents désordres des ouvrages légers. Aux Etats-Unis d'Amérique les dommages provoqués par le gonflement des sols présentent un coût supérieur à celui de toutes les catastrophes naturelles. En Algérie l'urbanisation de certains quartiers des villes et la construction des routes se heurtent aux problèmes que posent les phénomènes de gonflement, tassement et glissement de terrain.

1.5.1 Phénomènes de retrait-gonflement

Ce phénomène est lié au changement d'humidité de certains sols très argileux ou tourbeux qui sont capables de fixer l'eau disponible mais aussi de la perdre en se rétractant en cas de sécheresse. Le retrait-gonflement est un mouvement de tassement différentiel du sol spécifique aux terrains argileux (les argiles sont gonflantes et varient en fonction de leur teneur en eau) ; la variation de volume d'un terrain est consécutive à l'alternance des périodes de sécheresse (déshydratation

[3] **Fontis :** éboulement de terrain localisé.

superficielle) et des périodes pluvieuses (réhydratation), et elle provoque des désordres dans les constructions (fissuration, décollement d'élément jointifs).

1.5.2 Les tassements

Il s'agit de la diminution du volume de certains sols très compressibles (vases, tourbes, argiles) sous l'effet de charges appliquées ou à cause de l'abaissement du niveau des nappes aquifères par surexploitation.

1.5.3 Les glissements de terrain

Ces mouvements, au sens large du terme, consistent en un déplacement plus ou moins continu d'un versant instable de montagne ou de colline. Le mouvement est engendré par l'action de la gravité, de forces extérieures (hydraulique ou sismiques) ou d'une modification des conditions aux limites (conditions d'équilibre initial).
La masse de matériaux meubles ou rocheux fracturés se détache suivant une ou plusieurs surfaces de rupture par cisaillement qui correspondent souvent à des discontinuités préexistantes, visibles ou non, et de formes diverses.

1.6 Traitement des sols évolutifs

Il existe plusieurs techniques permettant de valoriser les sols possédant des caractéristiques médiocres. Il s'agit de la stabilisation :

- mécanique (densification par compactage, préchargement, etc.),
- hydraulique (drainage, rabattement de la nappe, etc.),
- électrique (électro-osmose),
- thermique (congélation, cuisson, etc.),
- chimique (ajout de produits : chaux, ciment, etc.),
- Autre techniques (utilisation des déchets du BTP et sous-produit industriels).

Ces techniques permettent de densifier le sol, de réduire la teneur en eau, de modifier la fraction argileuse, ou de changer le comportement du sol par traitement (Le Borgne, 2010).

1.6.1 Le compactage des sols

Le compactage est la densification des sols par application d'une énergie mécanique, il vise à améliorer les propriétés géotechniques des sols. Il permet l'amélioration de la résistance, la diminution de la déformabilité ainsi qu'une réduction de la perméabilité. Il peut ainsi réduire ou

éliminer le risque de tassement, également augmenter la stabilité des talus, mais aussi améliorer la capacité portante. Le compactage permet aussi de limiter les variations de volumes indésirables causés, par exemple, par l'action du gel, par le gonflement ou par le retrait du sol, ou bien de prévenir la liquéfaction des sols.

La densité obtenue après compactage dépend de la teneur en eau du sol. En effet, la masse volumique sèche du sol augmente avec la teneur en eau jusqu'à un optimum, puis décroît avec l'augmentation de la teneur en eau. Sur le chantier, il est important de connaître cet optimum pour obtenir des sols suffisamment denses. C'est pour cette raison, que dans les années 1930, les principes fondamentaux du compactage des sols ont été donnés par Monsieur R., Proctor. Il construisait alors des barrages pour l'ancien Bureau de l'Aqueduc de Los Angeles ; il a alors exposé les principes du compactage dans une série d'articles (Engineering News Record). L'essai de compactage qu'il a mis au point s'appelle l'essai Proctor.

Le compactage est fonction de quatre paramètres : la masse volumique du sol sec (γd), la teneur en eau (w), le compactage (énergie et mode), et le type de sol dont l'influence est illustrée par la Figure 1.1.

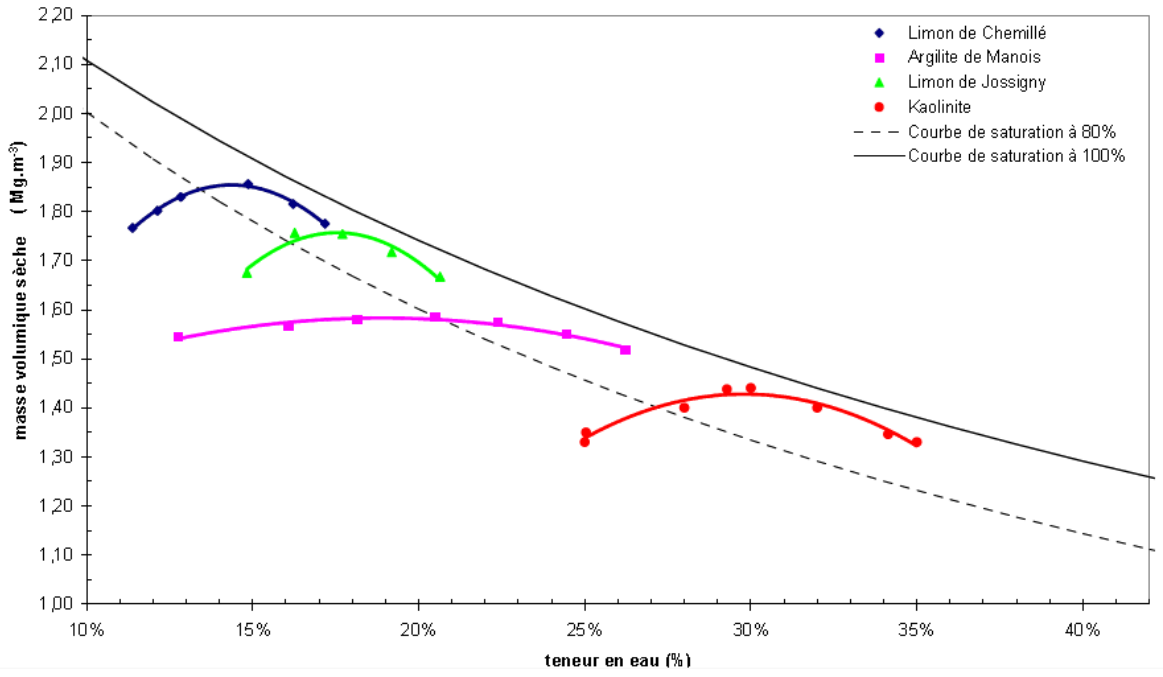


Figure 1.1 : Courbes de compactage suivant la nature du sol (Le Borgne, 2006).

1.6.2 Le traitement des sols à la chaux

La technique du traitement des sols à la chaux est utilisée en France depuis les années 1960. Dans un premier temps, elle a essentiellement intéressé la réutilisation en remblais des sols sensibles et/ou humides. Par la suite, la technique s'est étendue à la réalisation des couches de formes, en

commençant par la réutilisation des sols fins, puis progressivement une gamme de plus en plus étendue de matériaux. Dès 1972, un premier guide est élaboré par le LCPC et le SETRA « Recommandation pour le traitement des sols fins à la chaux ». Le guide technique GTS « Traitement des sols à la chaux et/ou aux liants hydrauliques » est le guide le plus complet en la matière (LCPC-SETRA, 2000). Ce guide complète le guide des terrassements routiers (LCPC-SETRA, 1992).

1.6.3 Traitement des sols au liant hydraulique

Il fallut attendre la fin du XVIIIe siècle pour que la science et la technique naissante entrevoient le mécanisme de la prise et jettent les bases de l'industrie cimentière. Dès 1825, le ciment Portland artificiel, ainsi appelé car, après durcissement, son aspect rappelait celui de la pierre calcaire de l'île de Portland, était fabriqué industriellement en Angleterre et vers 1850 en France grâce aux travaux réalisés par Louis Vicat. Par la suite, ces liants ont été utilisés pour le traitement des sols, dès les années 1960 en France.

1.6.4 Autres traitements

Il existe d'autres méthodes de traitement, qui sont plus marginales et utilisées dans des cas particuliers. Cette stabilisation chimique consiste à ajouter un composé chimique au sol. Ce composé va soit permettre au sol d'augmenter ses caractéristiques mécaniques, soit d'éviter des gonflements trop importants. Cette stabilisation va également améliorer le comportement mécanique des sols (Le Borgne, 2010). Ingles et Metcalf (1970) ont montrés que les sols peuvent être traités à l'aide d'acide phosphorique ou hydrofluorique. Les minéraux argileux réagissent avec l'acide phosphorique et l'action dispersive du phosphate sur les ions des argiles améliore la densification du sol.

L'acide phosphorique donne de bons résultats sur les jeunes sols des régions volcaniques. Cette méthode est utilisée seulement sur les sols acides et est inefficace sur les sols alcalins. Ceci est dû au fait que l'action de ce liant dépend de l'attaque acide, dissolvant les minéraux argileux, et sur la reprécipitation en phosphate d'alumine hydraté. L'acide hydrofluorique peut stabiliser les sols, sauf les sols riches en aluminium. Cet acide va attaquer les silicates du sol et former des silicates de fluor insolubles et fortement résistants. Cette méthode, marchant bien en laboratoire, ne peut être appliquée en chantier car l'acide hydrofluorique est trop corrosif et coûteux.

Les sels minéraux peuvent potentiellement être remplacés par des cations compensateurs initiaux des argiles. Ceci peut entraîner une réduction des gonflements des argiles lorsque du sodium est remplacé par du calcium (Suratman, 1995).

Hachichi et Fleureau, en 1999, ont étudié le gonflement d'une argile immergée dans des solutions chargées en différents sels. Les auteurs montrent que l'ajout de sel de chlorure réduit les gonflements d'une argile de moitié lorsque le chlorure de sodium est utilisé.

Singh et Das, en 1999, ont étudié les caractéristiques mécaniques des sols traités au chlorure de sodium. Les éprouvettes de sols sont laissées à l'air libre pendant toute leur cure. Alors, le traitement au chlorure de sodium a amélioré les résistances à la compression simple du sol le plus argileux. De plus, les auteurs précisent que cette augmentation de résistance dépend des conditions de cure, les meilleures caractéristiques sont obtenues quand le sol subit une cure à l'air libre.

Les polymères sont des résines qui confèrent au sol une cohésion plus forte par formation de gels qui cimente les particules. Ces polymères peuvent diminuer les gonflements des argiles (Suratman, 1995). Santoni et al. (2001) ont étudié l'effet de l'ajout de certains agents chimiques, dont des polymères, sur les résistances à la compression simple d'un sable limoneux. Les résistances à la compression simple augmentent lorsque les polymères sont utilisés comme stabilisateur.

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 entraine 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 accroitre 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_dc'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 :

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

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 :

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

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 : $\leq$ 5 mm	Dimension des grains : 5 mm $\leq$ d $\leq$ 20 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) 56 (moule CBR)	3 3	0,59 0,53
Modifié	4,535	45,70	25 (moule PROCTOR) 56 (moule CBR)	5 5	2,71 2,41

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

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 6ème échantillon. La quantité de sol à préparer pour réaliser 6 essais sera :

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

[1] A.A.S.H.O : American Association of State Highways Officials.
[2] C.B.R : Californian Bearing Ratio.

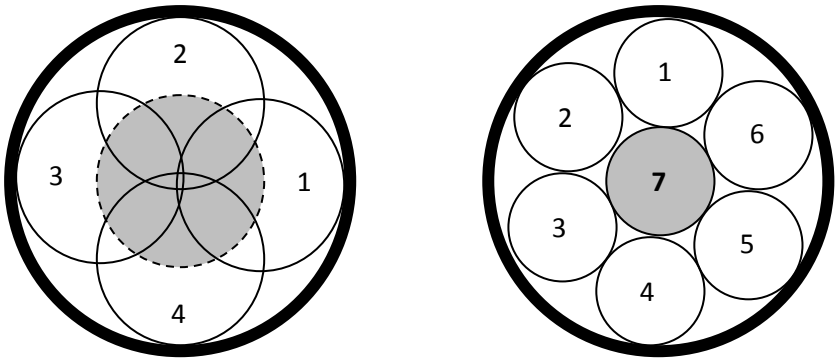
La quantité de matériau à utiliser pour chaque couche est approximativement indiquée dans le Tableau 2.3 :

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 **25eme 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 7ème au centre).



Moule Proctor Moule C.B.R

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 ($\gamma_{d\max}$) au quelle correspond la teneur en eau optimum (w_{opt}). C'est **l'optimum Proctor normal** ($\gamma_{d\max}$,w_{opn}) ou **modifié** ($\gamma_{d\max}$,w_{opm}).

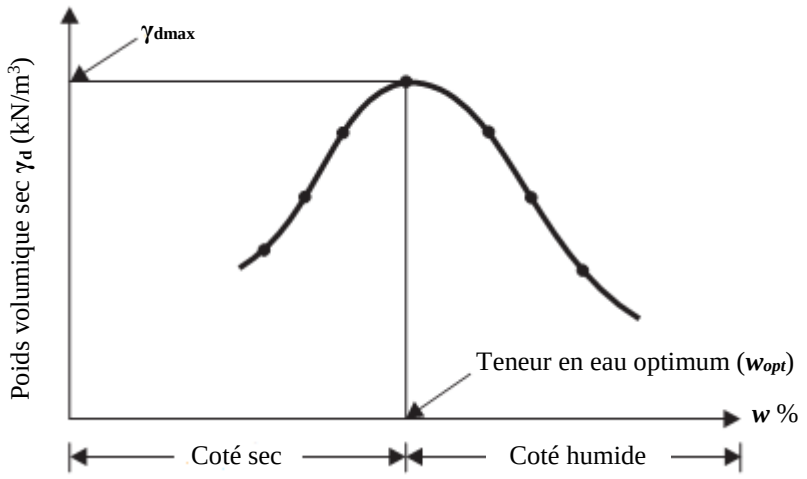


Figure 2.3. Courbe expérimentale schématique d'un essai Proctor

Si tout l'air contenu dans le sol est expulsé par le compactage, celui-ci sera dans un état de saturation complet (Sr = 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 :

$$\gamma_d = \frac{Gs}{1+w.Gs}.\gamma_w \qquad (2.3)$$

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 :

$$\gamma_d = \frac{Gs(1-A)}{1+w.Gs} \cdot \gamma_w \qquad (2.4)$$

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%).

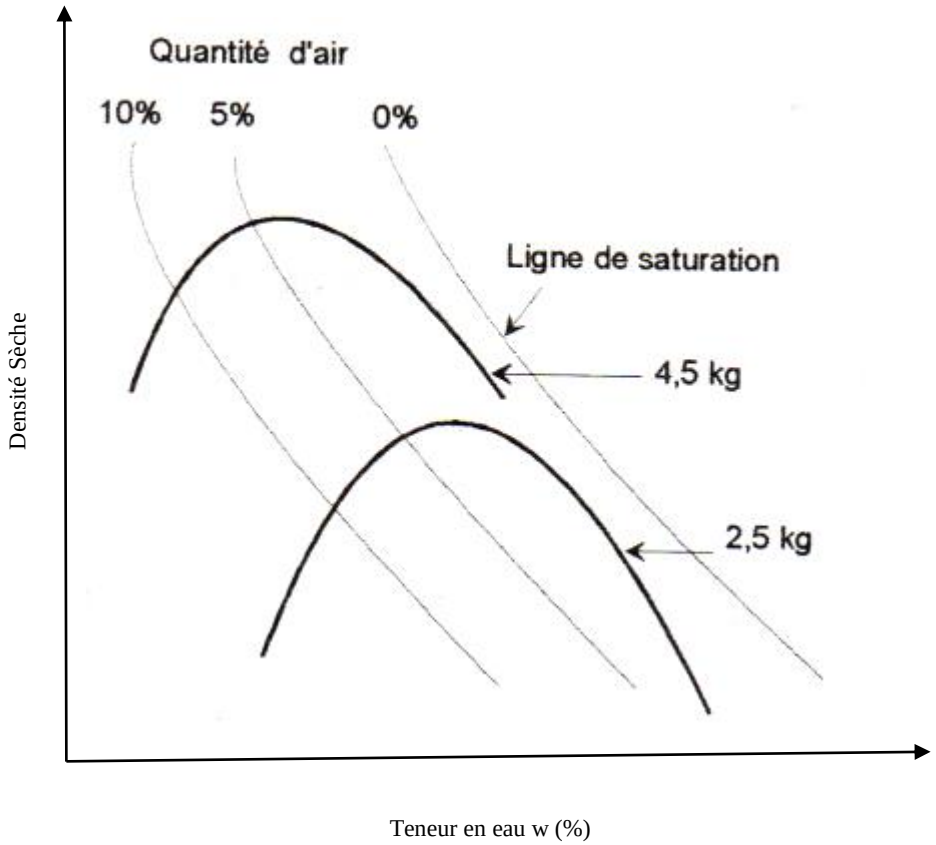


Figure 2.4. Courbe de compactage pour différents efforts de compactage sur un même sol

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 : épandeuse/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.

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

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).

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 bâche ».

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'écrêtage 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.

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.

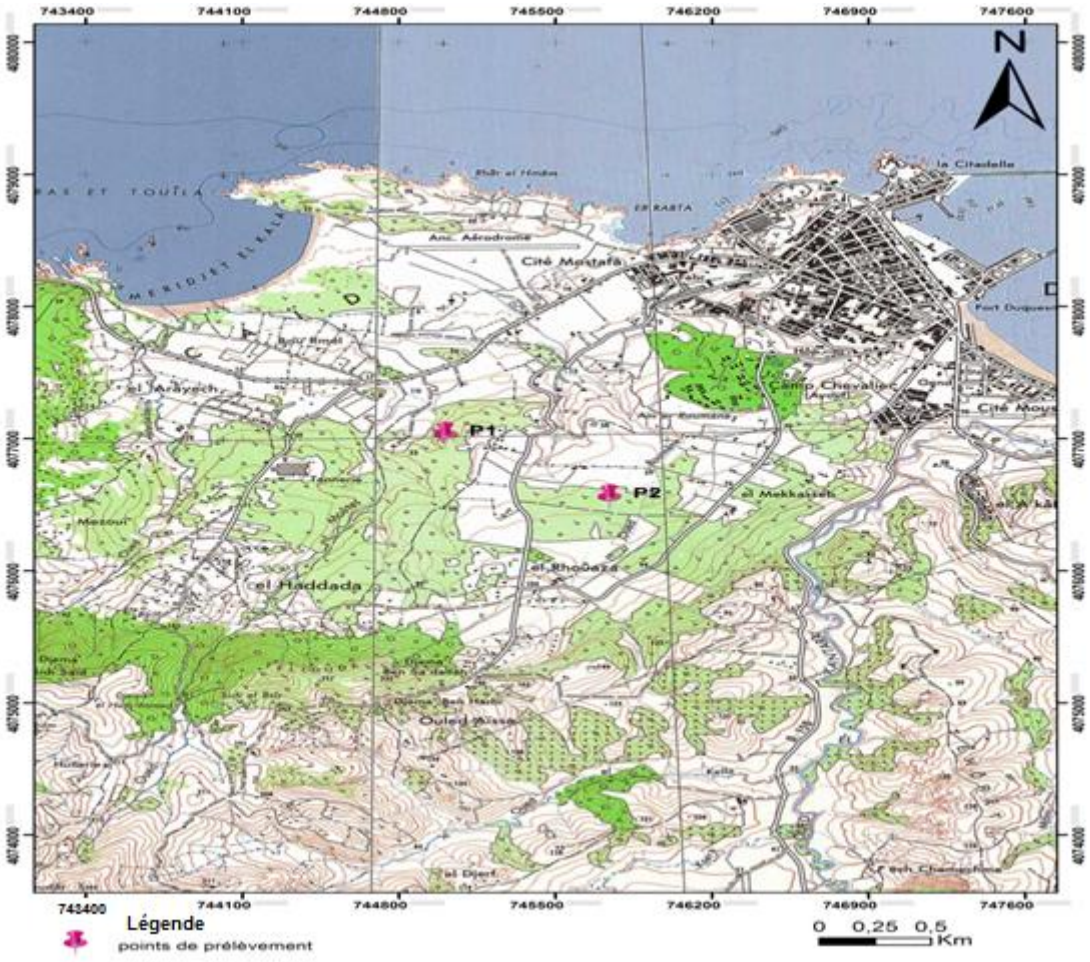


Figure 4.1. Situation géographique des deux sites de prélèvement
(Extrait de la carte topographique de Djidjelli N°28 feuille 3-4 à l'échelle 1/25.000)

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 Mohamed Seddik Benyahia (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 le 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 (KN/m^3)	21,76	22,20
Poids volumique sec γ_d (KN/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.

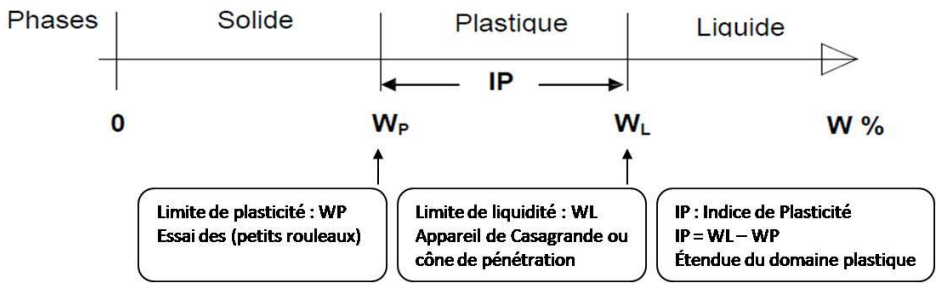


Figure 4.2. Représentation des limites d'Atterberg (Head, 1992).

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)**.

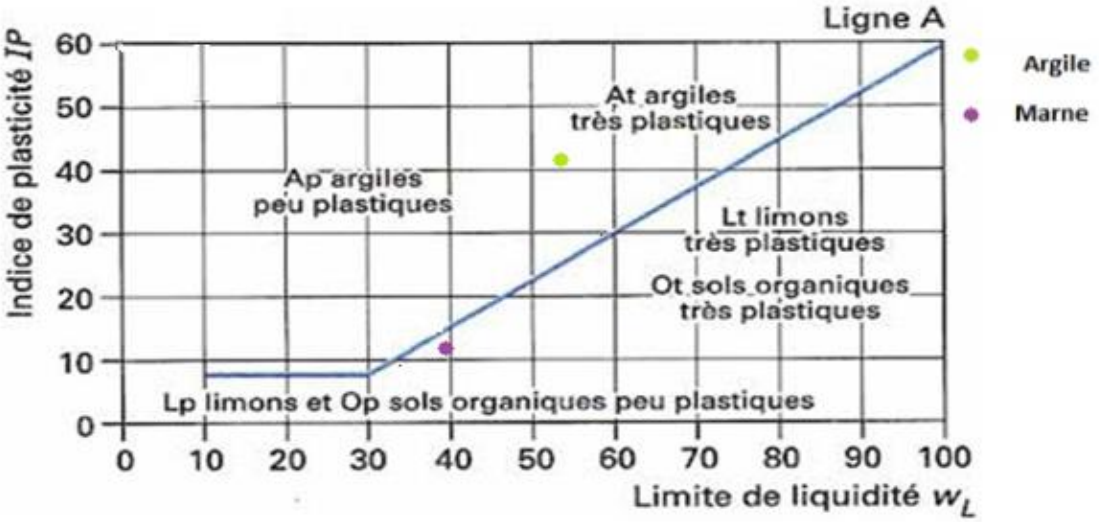


Figure 4.3. Classification des sols étudiés par le diagramme de plasticité de Casagrande.

(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 le **sol marneux** présente un **faible potentiel de gonflement** (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 étaient vigoureusement conformes 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 avec quelques déchets inertes du secteur « bâtiments et travaux publics », 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 avec les déchets des briques rouges sur les caractéristiques de compactage	Sol argileux	Sol de référence	Sans traitement
		Sol traité avec déchets de briques	2%, 4%, 6% et 25%
	Sol marneux	Sol de référence	Sans traitement
		Sol traité avec déchets de briques	2%, 4%, 6% et 25%
Séries d'essais réalisés	**Type de sol**	**Essais de compactage des sols**	**Observations**
Série N°02 : Effet du traitement du sol avec les déchets du plâtre sur les caractéristiques de compactage	Sol argileux	Sol de référence	Sans traitement
		Sol traité avec déchets de plâtre	2%, 4%, 6% et 25%
	Sol marneux	Sol de référence	Sans traitement
		Sol traité avec déchets de plâtre	2%, 4%, 6% et 25%

4.3. Présentation des résultats expérimentaux

A travers la manipulation et l'exécution des essais de compactages des sols, nous pouvons dire qu'un sol, sauf s'il est saturé, n'est pas 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. La teneur en eau restera constante mais le poids volumique sec augmentera. Dans le cas d'un *sol saturé* on peut aussi augmenter le poids volumique sec mais par expulsion d'eau. Il s'agit alors d'une consolidation. Durant la consolidation, la teneur en eau diminue.

Le compactage par expulsion d'air se produira 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. Il doit donc exister une teneur en eau optimum qui assurera un serrage maximum, compte tenu des moyens employés. C'est là l'idée maîtresse des travaux de Proctor.

Les résultats expérimentaux de cette partie seront interprétés en représentant la variation du poids volumique sec (γ_d) en fonction de la variation de la teneur en eau (w). Chaque une 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_{opm}).

4.3.1. Effet du traitement avec les déchets des briques sur les caractéristiques Proctor

Les Tableaux suivants présentent les résultats du traitement des sols étudié avec des pourcentages variables des déchets des briques rouges (2%, 4%, 6% et 25%).

4.3.1.1. Sol argileux avec ajout de déchets de briques

Tableau 4.13. Résultats du traitement des sols argileux avec les déchets des briques

a) Essai de référence					
Eau %	**6**	**8**	**10**	**12**	**14**
W%	**6,59**	**8,76**	**10,5**	**12,85**	**14,12**
γd (g/cm3)	**1,57**	**1,66**	**1,76**	**1,7**	**1,53**
γd max =1,76 **g/cm3**					**W_{opt}** =10,5 %

b) Effet du traitement avec les déchets des briques sur les argiles					
2% de briques					
Eau %	**6**	**8**	**10**	**12**	**14**
W%	**7,73**	**9,55**	**11,21**	**12,7**	**14,01**
γd (g/cm3)	**1,65**	**1,73**	**1,76**	**1,72**	**1,67**
γd max =1,76 **g/cm3**					**W_{opt}** = 11,21 %

4% de briques					
Eau %	**6**	**8**	**10**	**12**	**14**
W%	**7,98**	**8,77**	**12,3**	**13,21**	**13,8**
γd (g/cm3)	**1,61**	**1,71**	**1,76**	**1,72**	**1,65**
γd max =1,76 **g/cm3**					**W_{opt}** = 12,3 %

6% de briques					
Eau %	**6**	**8**	**10**	**12**	**14**
W%	**7.23**	**9.03**	**11.54**	**12.04**	**13.6**
γd (g/cm3)	**1.66**	**1.74**	**1.76**	**1.73**	**1.63**
γd max =1,76 **g/cm3**					**W_{opt}** = 11,54 %

25% de briques					
Eau %	**6**	**8**	**10**	**12**	**14**
W%	**7,46**	**7,93**	**10,7**	**12,06**	**14,5**
γd (g/cm3)	**1,65**	**1,75**	**1,76**	**1,71**	**1,57**
γd max =1,76 **g/cm3**					**W_{opt}** = 10,7 %

Tableau 4.14. Récapitulatif de l'effet de l'ajout des déchets de brique sur les argiles

% des briques	$\gamma_{d\,max}$	W_{opt} %
0	1,76	10,50
2	1,76	11,21
4	1,76	12,30
6	1,76	11,54
25	1,76	10,70

4.3.1.2. Sol marneux avec ajout de déchets de briques

Tableau 4.15. Résultats du traitement des sols marneux avec les déchets des briques

a) Essai de référence					
Eau %	**4**	**6**	**8**	**10**	**12**
W%	**5,8**	**7,01**	**9,30**	**11,2**	**13,59**
γd (g/cm3)	**1,7**	**1,85**	**1,83**	**1,67**	**1,5**
γd max =1,85 **g/cm3**					**W_{opt}** = 7,01%

b) Effet du traitement avec les déchets des briques sur les marnes					
2% de briques					
Eau %	**6**	**8**	**10**	**12**	**14**
W%	**7,45**	**8,83**	**10,75**	**13,44**	**14,36**
γd (g/cm3)	**1,82**	**1,85**	**1,83**	**1,76**	**1,74**
γd max = 1,85 **g/cm3**					**W_{opt}** = 8,83%

4% de briques					
Eau %	**6**	**8**	**10**	**12**	**14**
W%	**8,64**	**9,83**	**11,46**	**14,2**	**14,8**
γd (g/cm3)	**1,81**	**1,84**	**1,82**	**1,77**	**1,72**
γd max = 1,84 **g/cm3**					**W_{opt}** = 9,83%

6% de briques					
Eau %	**6**	**8**	**10**	**12**	**14**
W%	**7,04**	**9,01**	**10,65**	**12,8**	**14,09**
γd (g/cm3)	**1,82**	**1,84**	**1,78**	**1,75**	**1,71**
γd max = 1,84 **g/cm3**					**W_{opt}** = 9,01%

25% de briques					
Eau %	**6**	**8**	**10**	**12**	**14**
W%	**7,13**	**8,57**	**10,86**	**13,08**	**14,3**
γd (g/cm3)	**1,82**	**1,85**	**1,81**	**1,78**	**1,75**
γd max = 1,85 **g/cm3**					**W_{opt}** = 8,57%

Tableau 4.16. Récapitulatif de l'effet de l'ajout des déchets de brique sur les marnes

% des briques	$\gamma_{d\,max}$	W_{opt} %
0	1,85	7,01
2	1,85	8,83
4	1,84	9,83
6	1,84	9,01
25	1,85	8,57

4.3.1.3. 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.

A partir des résultats expérimentaux présentés dans les tableaux ci-dessus et les courbes Proctor de la Figures 4.4 et 4.5, nous constatons que les déchets des briques rouges n'ont pas un effet notable sur le comportement mécanique des deux sols étudiés (argiles et marnes) vis-à-vis les valeurs des caractéristiques du compactage ($\gamma_{d\max}$, w_{opt}).

Par contre les courbes Proctor des deux sols étudiés sont déplacées légèrement vers la droite elles présentent une forme aplatie qui traduit la faible sensibilité de ces mélange à l'eau (Figure 4.4 et 4.5). Cette amélioration vis-à-vis la sensibilité du mélange à l'eau est intéressante pour le traitement des de ce genre de sols plastiques dans les chantiers routiers.

D'autre part, l'aspect inerte et l'absence de cohésion de ce type déchets est à l'origine de ce genre de comportement ce qui rend le compactage des sols traité similaire à celui d'un sol pulvérulent suite à la substitution des particules fines par des particule et éléments inertes qui sont les déchets des briques rouge de différents diamètres (< 20 mm).

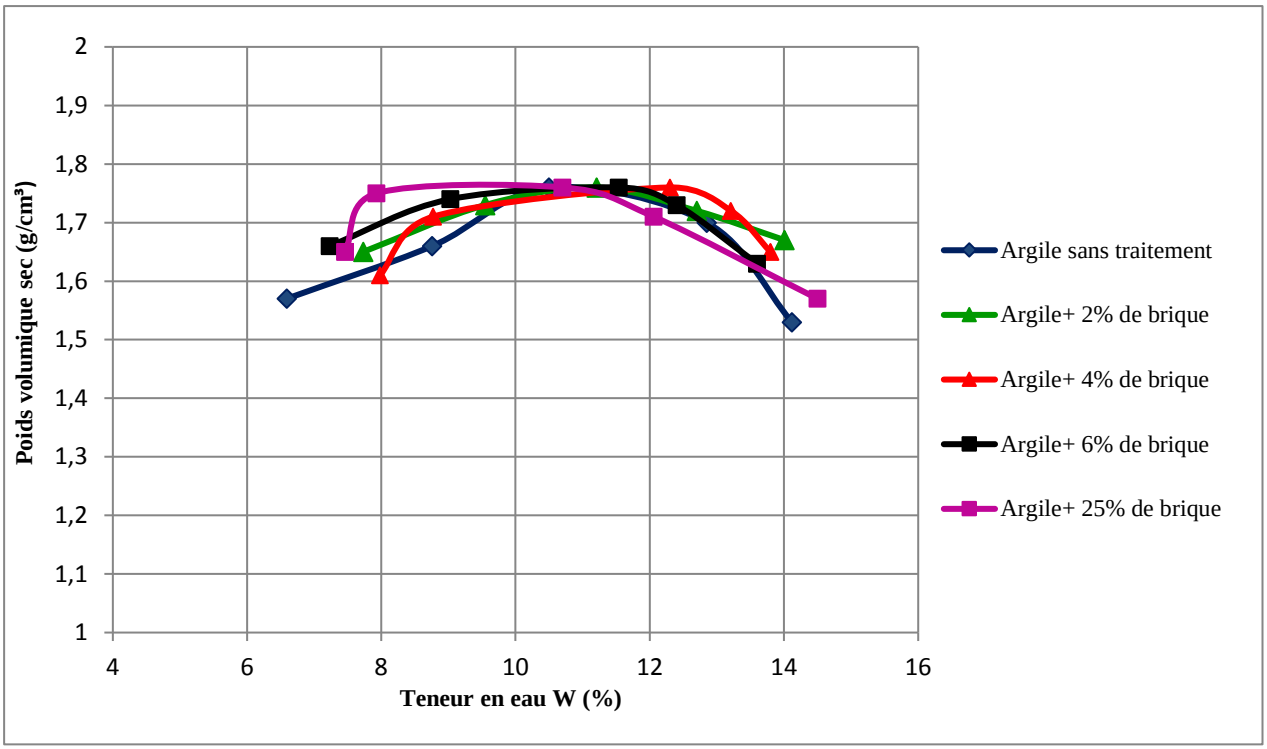


Figure 4.4. Influence du traitement avec les déchets de briques sur les courbes Proctor des argiles

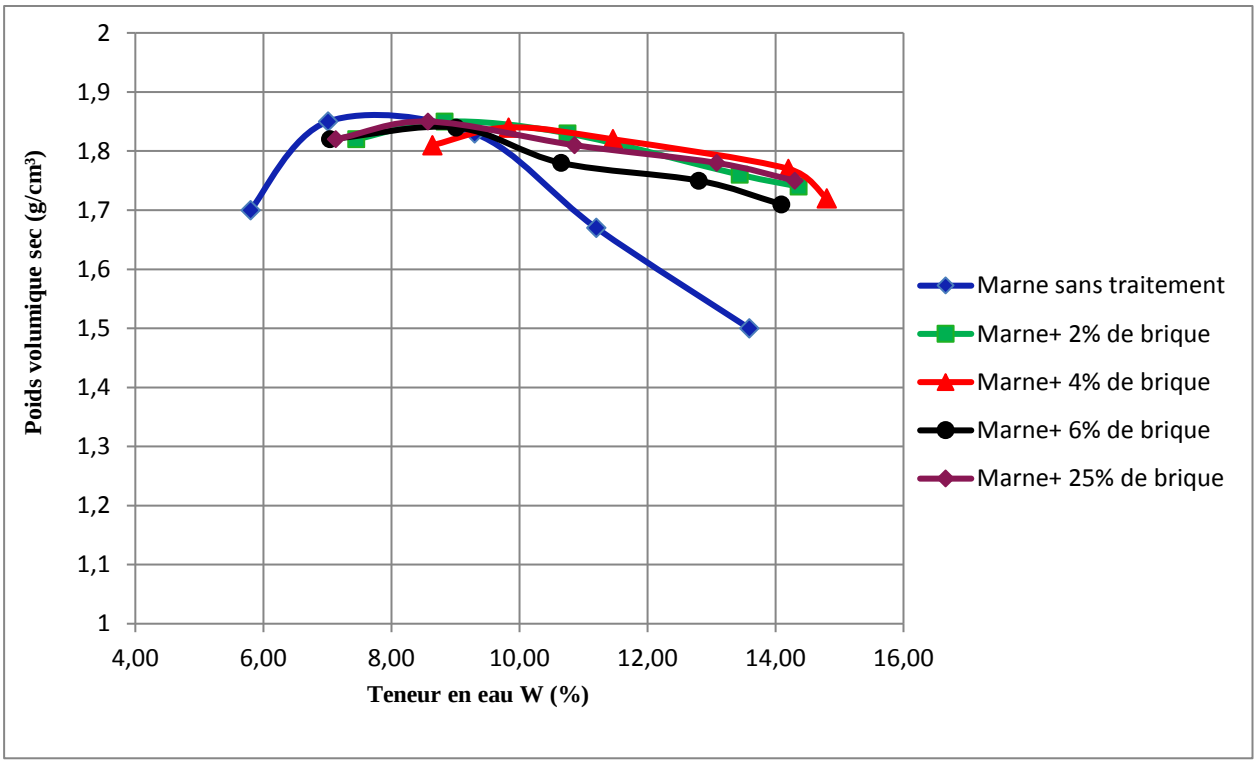


Figure 4.5. Influence du traitement avec les déchets de briques sur les courbes Proctor des marnes

4.3.2. Effet du traitement avec les déchets du plâtre sur les courbes Proctor

Les Tableaux suivants présentent les résultats du traitement des sols étudié avec des pourcentages variables des déchets de plâtre (2%, 4%, 6% et 25%).

4.3.2.1. Sol argileux avec ajout de déchets de plâtre

Tableau 4.17. Résultats du traitement des sols argileux avec les déchets de plâtre

a) Essai de référence					
Eau %	**6**	**8**	**10**	**12**	**14**
W%	**6,59**	**8,76**	**10,5**	**12,85**	**14,12**
γd (g/cm3)	**1,57**	**1,66**	**1,76**	**1,7**	**1,53**
γd max =1,76 **g/cm3**					**W_{opt}** =10,5 %

b) Effet du traitement avec les déchets de plâtre sur les argiles					
2% de plâtre					
Eau %	**6**	**8**	**10**	**12**	**14**
W%	**7,06**	**9,71**	**10,24**	**12,3**	**14,44**
γd (g/cm3)	**1,62**	**1,66**	**1,78**	**1,68**	**1,6**
γd max =1,78 **g/cm3**					**W_{opt}** = 10, 24%
4% de plâtre					
Eau %	**6**	**8**	**10**	**12**	**14**
W%	**6,01**	**7,95**	**9,97**	**13,4**	**14,01**
γd (g/cm3)	**1,7**	**1,72**	**1,76**	**1,73**	**1,65**
γd max =1,76 **g/cm3**					**W_{opt}** = 9,97%
6% de plâtre					
Eau %	**6**	**8**	**10**	**12**	**14**
W%	**8,08**	**10,3**	**11,92**	**13,68**	**14,12**
γd (g/cm3)	**1,7**	**1,73**	**1,77**	**1,66**	**1,64**
γd max =1,77 **g/cm3**					**W_{opt}** = 11,92%
25% de plâtre					
Eau %	6	8	10	12	14
W%	8,08	9,92	11,26	13,4	14,5
γd (g/cm3)	1,55	1,6	1,75	1,62	1,57
γd max =1,75 **g/cm3**					**W_{opt}** = 11,26%

Tableau 4.18. Récapitulatif de l'effet de l'ajout des déchets du plâtre sur les argiles

% du plâtre	**$\gamma_{d\ max}$**	**W_{opt} %**
0	**1,76**	**10,50**
2	**1,78**	**10,24**
4	**1,76**	**09,97**
6	**1,77**	**11,92**
25	**1,75**	**11,26**

4.3.2.2. Sol marneux avec ajout des déchets de plâtre

Tableau 4.19. Résultats du traitement des sols marneux avec les déchets de plâtre

a) Essai de référence					
Eau %	**4**	**6**	**8**	**10**	**12**
W%	**5,8**	**7,01**	**9,30**	**11,2**	**13,59**
γd (g/cm3)	**1,7**	**1,85**	**1,83**	**1,67**	**1,5**
γd max = 1,85 **g/cm3**					**W_{opt}** = 7,01%

b) Effet du traitement avec les déchets de platre sur les marnes					
2% de plâtre					
Eau %	**6**	**8**	**10**	**12**	**14**
W%	**7,3**	**8,05**	**10,75**	**13,52**	**14,69**
γd (g/cm3)	**1,65**	**1,85**	**1,81**	**1,71**	**1,68**
γd max = 1,85 **g/cm3**					**W_{opt}** = 8,05%
4% de plâtre					
Eau %	**6**	**8**	**10**	**12**	**14**
W%	**7,6**	**10,71**	**11,11**	**13,56**	**14,64**
γd (g/cm3)	**1,68**	**1,84**	**1,83**	**1,68**	**1,63**
γd max = 1,84 **g/cm3**					**W_{opt}** = 10,71%
6% de plâtre					
Eau %	**6**	**8**	**10**	**12**	**14**
W%	**7,2**	**8,6**	**11,22**	**12,97**	**14,75**
γd (g/cm3)	**1,72**	**1,83**	**1,78**	**1,77**	**1,69**
γd max = 1,83 **g/cm3**					**W_{opt}** = 8,6%
25% de plâtre					
Eau %	**6**	**8**	**10**	**12**	**14**
W%	**8,6**	**9,32**	**11,53**	**13,02**	**14,2**
γd (g/cm3)	**1,6**	**1,65**	**1,83**	**1,7**	**1,64**
γd max = 1,83 **g/cm3**					**W_{opt}** = 11,53%

Tableau 4.20. Récapitulatif de l'effet de l'ajout des déchets du plâtre sur les marnes

Plâtre%	**$\gamma_{d\,max}$**	**W_{opt}%**
0	**1,85**	**07,01**
2	**1,85**	**08,05**
4	**1,84**	**10,71**
6	**1,83**	**08,6**
25	**1,83**	**11,53**

4.3.2.3. Analyse et discussions des résultats obtenus

La sensibilité à l'eau des échantillons testés se traduit par les formes variées des courbes Proctor, selon les Figures 4.6 et 4.7, 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.

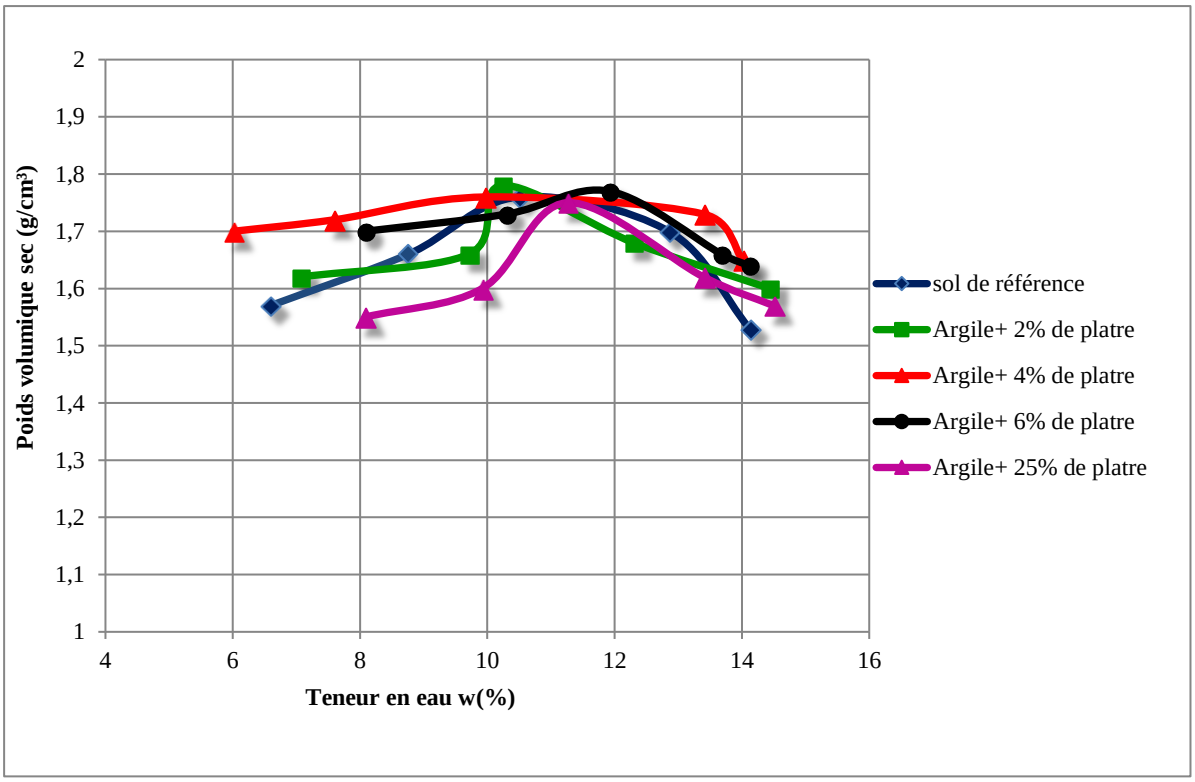


Figure 4.6. Influence du traitement avec les déchets de plâtre sur les courbes Proctor des argiles

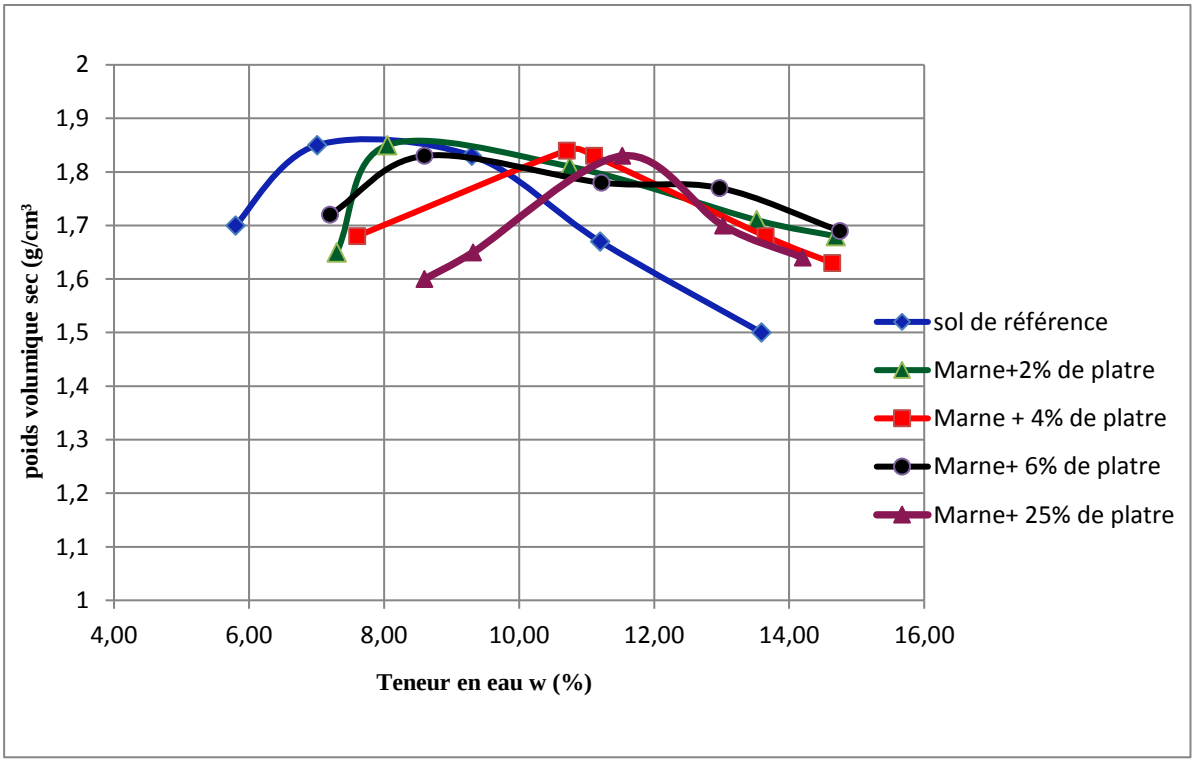


Figure 4.7. Influence du traitement avec les déchets de plâtre sur les courbes Proctor des marnes

Après traitement avec les déchets de plâtre en ajoutant pour chaque prise d'essai 2, 4, 6 et 25 %, les courbes Proctor des sols traités sont déplacées vers la droite elles présentent une forme aplatie qui traduit la faible sensibilité de ces mélange à l'eau (Figure 4.6 et 4.7). A l'exception des échantillons traités avec 25% de plâtre où les courbes présentent une forme plus ou moins accentuée. Ce qui indique l'existence d'un seuil de saturation de ce type de traitement qui limite son efficacité.

Sur la Figure 4.6, le traitement avec les déchets de plâtre avec des ajouts de 2, 4 et 6 %, à faiblement améliorer la densité de l'optimum Proctor avec une légère consommation en plus de l'eau optimum (environ 1% d'augmentation, Tableau 4.18).

Conclusion générale

Du fait de l'augmentation des activités du Bâtiment et des Travaux Publics (BTP) depuis quelques décennies, on constate un afflux croissant du volume des déchets issus des chantiers. Le contexte de leur gestion est différent entre la sphère du bâtiment et celle des travaux publics, du fait notamment du nombre d'acteur par chantier, de la nature même des déchets produits, des lieux de production et des modes de traitement possibles.

Le traitement des sols avec des déchets du secteur BTP 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 granulométrique du sol et du matériaux utilisé pour le traitement du fait que ce dernier est inerte du point de vu chimique, 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.

Dans le cadre de la réutilisation des sols plastiques dans 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 vis-à-vis le compactage de quelques sols plastiques extraits de la région de Jijel (nord-est Algérien) traités avec les déchets du secteur du bâtiments et travaux publics (BTP).

A partir des résultats expérimentaux présentés dans ce mémoire nous avons constatez que les déchets des briques rouges n'ont pas un effet notable sur le comportement mécanique des deux sols étudiés (argiles et marnes) vis-à-vis les valeurs des caractéristiques du compactage ($\gamma_{d\max}$, w_{opt}).

Par contre les courbes Proctor des deux sols étudiés sont déplacées légèrement vers la droite elles présentent une forme aplatie qui traduit la faible sensibilité de ces mélange à l'eau. Cette

amélioration vis-à-vis la sensibilité du mélange à l'eau est intéressante pour le traitement des de ce genre de sols plastiques dans les chantiers routiers.

D'autre part, l'aspect et l'absence de cohésion de ces déchets est à l'origine de ce genre de comportement ce qui rend le compactage des sols traité similaire à celui d'un sol pulvérulent suite à la substitution des particules fines par des particule et éléments inertes qui sont les déchets des briques rouge de différents diamètres (< 20 mm).

Après traitement des sols étudiés avec les déchets de plâtre en ajoutant pour chaque prise d'essai 2, 4, 6 et 25 %, les courbes Proctor des sols traités sont déplacées vers la droite à l'exception des échantillons traités avec 25% de plâtre où les courbes ont présentées une forme plus ou moins accentuée. Ce qui indique l'existence d'un seuil de saturation de ce type de traitement qui limite son efficacité.

Après ce modeste travail nous somme convaincu qu'une part importante des déchets du secteur BTP peut être valorisée ou réutilisée. Les terres excavées, les pierres, les blocs de béton peuvent être concassés et broyés et réutilisés dans le bâtiment ou les travaux publics (remblais routier, couches de formes, pistes de chantier, etc…).

Référence bibliographique

Achilli M. (2012). Le point sur le diagnostic déchets de démolition des bâtiments. *In* Juristes-environnement, article. http://www.juristes-environnement.com/article_detail.php?id=712 (Page consultée le 01 novembre 2014).

ADEME (2014). Déchets édition 2014, chiffres clés. ADEME Editions 2014, Paris, 80p.

Aiban, S.A., Al-Abdul Wahhab, H.I., Al-Amoudi, O.S. and Habibur, R.A., (1998), Performance of a Stabilized Marl Base: a Case Study, Construction and Building Materials, Vol. 12, pp.329-340.

Bell, F.G., (1978), Méthodes de traitement des sols instables, Editions Eyrolles, France, 240p.

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

Chaddock, B.C.J. (1996). The Structural Performance of Stabilized Soil in Road Foundations. pp.75-94. Dans Rogers, C.D.F., Glendinning, S., Dixon, N.(éditeurs). Proceedings of the seminar on Lime Stabilization held at Loughborough University Civil& Building Engineering Department. 25septembre, 1996. 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.

CHERAIT.Y, NAFA.Z, 2006. Eléments de matériaux de construction et essais. Direction des publications universitaires de Guelma.

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

Fédération Belge de la Brique (s.d.). Classification des briques. In Fédération Belge de la Brique.

http://www.brique.be/prod_classification.html (Page consultée le 07 août 2014).

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.

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 atMilitary Posts in the Southwest. National Lime Association, Bulletin 328.

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

LCPC - SETRA (1992). Guide Technique de « Réalisation des remblais et des couches de forme ».

LCPC – SETRA. Traitement des sols à la chaux et/ou aux liants hydrauliques – Application à la réalisation des remblais et des couches de forme. Guide technique. 240 p., 2000.

Légère, G., (2001). Etude technico-économique de la stabilisation à la chaux des sols argileux en voirie forestière. Maitrise 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.

Nelson J. D., et Miller D. J., (1992), "Expansive soils problems and practice in foundation and pavement engineering", Edition John Wiley et Sons, INC.

NF P 11-300 (1992) "Classification des matériaux utilisables dans la construction des remblais et des couches de forme d'infrastructures routières", septembre 1992.

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

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.

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 Law-Volume Roads. 23-26 may, 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 Applied Clay Science Experimental study on instability of bases on natural and lime/cement-stabilized clayey soils, vol.35, 2007, pp. 238–249.

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

Rogers, C.D.F., Glendinning, S., Dixon, N. (1996). Lime Stabilization Proceedings of the seminar held at Loughborough 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.

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 fiber and lime admixture on engineering properties of clayey soil. Engineering Geology, Vol. 87, pp. 230-240.

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

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 avec des déchets du secteur « bâtiments et travaux publics – BTP ».

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 déchets (briques et de plâtre). Les résultats obtenus montrent que l'incidence du traitement par ces deux types de déchets rend le mélange moins sensible à l'eau d'où l'aplatissement de la courbe Proctor avec une légère augmentation de la teneur en eau optimale.

Mots-clés : Déchets du BTP, argiles et marnes, teneur en eau, courbe Proctor

ملخص

في سياق إعادة استخدام التربة البلاستيكية في بناء الطرق، وللحفاظ على الموارد الجغرافية، يتكون العمل الحالي من دراسة تجريبية للعوامل ذات الصلة التي تحكم السلوك المختبري لبعض التربة البلاستيكية المستخرجة من منطقة جيجل (شمال شرق الجزائر) بنفايات من قطاع "البناء والأشغال العامة" هذه الأطروحة هي في المقام الأول مراجعة ببليوغرافية لبعض الأبحاث حول استقرار التربة البلاستيكية .ثم تقديم دراسة مختبرية على نوعين من التربة البلاستيكية (الطين والمارل) وفقا لجرعات مختلفة من النفايات (الأجور والجبس). تظهر النتائج التي تم الحصول عليها أن العلاج بهذين النوعين من النفايات يجعل المزيج أقل حساسية للماء، وبالتالي تسطيح منحنى بروكتور مع زيادة طفيفة في المحتوى المائي الأمثل.

الكلمات المفتاحية: مخلفات البناء، الطين والمارل، محتوى الماء، منحنى بروكتور

Abstract

In the context of the reuse of plastic soils in the construction of road embankments and in order to preserve the geo-resources, the present work consists of an experimental study of the relevant parameters and factors that govern the laboratory behavior of some plastic soils extracted from the Jijel region (northeastern Algeria) treated with waste from the sector "buildings and public works - construction".

This thesis is first of all a bibliographic review of some research on the stabilization of plastic soils. He then presented a laboratory study on two types of plastic soils (clays and marl) stabilized according to various dosages of waste (bricks and plaster). The results obtained show that the incidence of treatment with these two types of waste makes the mixture less sensitive to water, hence the flattening of the Proctor curve with a slight increase in the optimum water content.

Key words: Construction waste, clay and marl, water content, Proctor curve