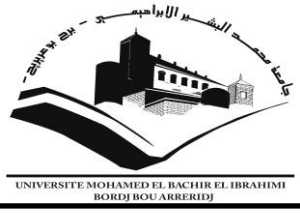
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Mohamed El Bachir Elibrahimi –Bordj Bou ArreridjFaculté des Sciences et de la Technologie
Département génie civil

جامعة محمد البشير الإبراهيمي « برج بوعريريج »
كلية العلوم والتكنولوجيا
قسم الهندسة المدنية



Mémoire de fin d'études

PRESENTÉ EN VUE DE L'OBTENTION
DU DIPLOME DE : (Master 2)

Filière : Génie civil
Option : Matériaux de construction

THÈME :

Amélioration de la stabilité du sol dans les projets de construction routière par les déchets de céramique et les liants hydraulique

Préparé par : -BENZARTIHA Ilyas
-GOUICHICHE Youcef

Soutenu le : 02/07/2018 10H30 –12H00

- **Encadreur: DEBOUCHA Sadek**
- **Président: BOUZID Chaouki**
- **Examinateur: -ACHOUR Yacine**
  -DJELOUL Chafia

بسم الله الرحمن الرحيم

Résumé

Le développement dans le monde a affecté de nombreux domaines, les projets de construction routière, en raison des problèmes rencontrés par les ingénieurs dans ce domaine, leur permettant d'adapter les expériences et les études visant au traitement des sols. Pour la construction de routes solides par un bon sol.

Le but de cette étude est d'ajouter des déchets céramiques et du ciment pour améliorer les propriétés physiques et mécaniques du sol, telles que la capacité portante (CBR), la perméabilité, la compressibilité (Œdométrique). En examinant l'influence de la proportion de dèches de céramique et de la dose de ciment dans le sol naturel, on a étudié expérimentalement

Parmi les résultats de cette étude, il y a une augmentation significative de l'indice CBR pour le plus de mélanges et la valeur la plus élevée était dans le cas de CBR humide 263,104%, dans le cas de CBR immergée 246,776%, ajout de dèches de céramique diminution perméabilité environ 800%, aussi une diminution des coefficients de consolidation environ 350%, la conductivité hydraulique du sol saturée dans le site Kfs = 3.72 x10^{-4} cm / s, dont cette valeur a classé ce type de sol par le mauvais sols pour la construction routière.

En fin de compte, nous pouvons conclure que les résultats de cette étude contribuent positivement à la construction routière en améliorant les propriétés du sol naturel pour construire une route plus solide et une pérennité.

Mots clés : Stabilisation du sol, déchet de céramique, ciment, construction routier.

Abstract

Development in the world has affected many areas, including road Construction projects, because of the problems encountered by engineers in this field, allowing them to adapt experiments and studies aimed at soil treatment. To build solid road construction by good soil.

The purpose of this study is to add ceramic waste and cement to improve physical and mechanical properties of soil, such as bearing capacity (CBR), permeability, compressibility (Œdométrique). Looking at the influence of ceramic west proportion and cement dosage in the natural soil, have been studied experimentally.

Among the results of this study, there is a significant increase in the CBR index for the most mixtures and the higher value was in the case of wet CBR = 263.104%, in case of immersed CBR = 246.776%, addition of ceramic west decrease permeability about 800%, also a decrease of the coefficients of consolidation about 350%, the saturated hydraulic conductivity of soil in the field Kfs = 3.72 $x10^{-4}$ cm / s, which this value classified this type of soil by worst soil for road construction.

In the end, we can conclude that the results of this study contribute positively to road construction by improving properties of natural soil to build stronger road and sustainability.

Key Words: soil stabilization, ceramic waste, cement, road construction.

ملخص

التطور الحالي في شتى المجالات بالعالم , ادى الى خلق مشاكل في هياكل الطرقات باعتبارها همزة الوصل في كل هذا, مما جعل المهندسين في هذا المجال يعتمدون على الخبرات والدراسات لمعالجة التربة , وخلق ارضية قوية وصالحة لوضع الطرق .

نهدف من خلال الدراسة التي اجريناها في المختبر الجامعي , والتي تطرقنا من خلالها الى معالجة وتحسين التربة بإضافة نفايات السيراميك والاسمنت الى : رفع الخصائص الفزيائية والكيميائية ,مثل القدرة على التحمل من خلال اختبار نسبة تحمل كاليفورنيا ,النفاذية , وايضا الانضغاطية من خلال اختبار مقايسة الاوتومتريك. وكذا دراسة تأثير النسب المختلفة من نفايات السيراميك والاسمنت في تغيير خصائص التربة .

من بين النتائج المحصل عليها في نهاية هذه الدراسة: زيادة تمثلت في نسبة تحمل كاليفورنيا حيث سجلت اعلى قيمة لها في الحالة الرطبة CBR=263.104% , اما في الحالة المغمورة فانه,CBR=246.774% اضافة نفايات السيراميك ساهمت في انقاص معامل النفاذية في حدود 800%, و ايضا نقص في معامل الفراغ بحوالي ,350% حقل التوصيل الهيدروليكي المشبع للتربة المغمورة في الموقع $Kfs = 3.72 \times 10^{-4}\ cm / s$.

في الأخير من وخلال نتائج هذه الدراسة, نستخلص ان هذه المعالجة بواسطة نفايات السيراميك و الاسمنت, قد ساهمت بشكل إيجابي في تحسين خصائص التربة, ويمكن اعتماد عليها وتطويرها ,لبناء طرق قادرة علي تحمل الحمولات الزائدة , و استمرارها أطول مدة ممكنة.

الكلمات المفتاح : تحسين التربة , نفايات السيراميك , الاسمنت , هياكل الطرقات **.**

.

REMERCIMENTS

Nous tenons à remercier tous d'abord ALLAH, qui nous a donné la force de faire ce modeste travail.

Nous voudrions profiter cet espace pour exprimer nos gratitudes et nos reconnaissances, à tous ceux qui ont participé à ce travail de près ou de loin, parce que ce mémoire de master est le résultat de l'engagement de plusieurs personnes, qui ont contribuées avec nous même si le mot stimulation.

Nous remercions vivement notre encadreur Dr. Sadek. Deboucha pour nous avoir confié se travail et pour son aide , sa patience et sa sympathie, ses encouragements et ses conseils précieux.

Nous remercions tous notre professeurs de la faculté des sciences et de la technologie et du Département de génie civil qui ont développés notre formation scientifique, Avancez-les Mr. Nacer Logzit le chef de département de génie civil pour leur précieuse aide, Sans oublier de remercier spécialement Mr .Ziani Pour les grands efforts et l'aide qu'il nous a donnés.

Mes remerciements vont aux membres de jury qui ont accepté d'évaluer ce travail, Enfin à tous ceux et celles qui nous a soutenues ou encouragés qu'ils y trouvent ici l'expression de nos profondes gratitudes.

Sans oublier nos collègues ; les étudiants de 2ème année MASTER Génie Civil.

Dédicace

Nous remercions le Dieu qui nous a donné la force de réaliser ce modeste travail à :

Nos chers parents Dieu les protège, ceux qui ont été toujours là pour nous, c'est

Grâce à eux ce que nous sommes.

Nos sœurs et nos frères.

Tous nos amis ainsi que

Tous nos collèges de Département de Génie Civil

En un mot, toutes nos familles, et tous ceux qui ont contribué de prés ou de loin à notre formation.

liste des Figures

Figure I.1 : Image par satellite de Tixter (Algérie / Bordj Bou Arreridj) 2

Figure I.2 : La zone de Tixter. 2

Figure I.3 : Localisation de Tixter sur la carte géographique de Bordj Bou Arreridj 3

Figure II.1: Présentation de sol 7

Figure II.2: Schéma simplifié des trois phases du sol 10

Figure II.3: Utilisation de la céramique 10

Figure II.4 : Déchet de céramiques 11

Figure II.5 : Ciment utilisé 13

Figure II.6 : La terminologie de la chaussée 17

Figure II.7 : Les méthodes d'amélioration et les domaines d'applications la teneur des liants (ciment et chaux). 20

Figure II.8 : Evolution de l'indice CBR en fonction de La teneur des liants (Ciment et chaux). 20

Figure II.9: Evolution de l'indice CBR en fonction de La teneur des liants (ciment et chaux). 20

Figure II.10 : Variation de CBR imbibée avec le pourcentage de poussière de céramique 21

Figure II.11 : Variation de CBR imbibée avec le pourcentage de céramique 21

Figure II.12 : Effets de la Chaux sur la Résistance 22

Figure II.13 : Evolution de l'indice de compressibilité de la marne traitée à la chaux et au ciment. 22

Figure II.14: La variation de coefficient de perméabilité en termes de dosag de ciment 23

Figure II.15: L'effet de dosage de céramique sur l'indice de vide 23

Figure II.16 : Scarification avant l'application de la chaux 24

Figure II.17: Application de chaux sèche avec un épandeur mécanique 25

Figure II.18 : Scarification après épandage de chaux 25

Figure II.19 : Ajout d'eau après application chaux sèche 25

Figure II.20 : Mélangeur rotatif utilisé pour rotatoire le camion de l'eau attaché 26

Figure II.21 : Mélangeur avec le mélange initial 26

Figure II.22 : Mélange et pulvérisation. 27

Figure II.23 : Schéma de fonctionnement d'un pulvérisateur 27

Figure II.24 : Rouleaux pieds de moutons pieds (Ci-dessus) 28

Figure II.25 : Rouleau en acier et dameurs.....28
Figure II.26 : Emulsion de couche de base pour le durcissement 28
Figure III.1 : Zone de TEXTAIRE.....30
Figure III.2 : Le sol étudié.....30
Figure III.3: La courbe granulométrique du sol 31
Figure III.4 : Analyse granulométrique de dèches de céramique.....31
Figure III.5 : Déchet de céramique.....32
Figure III.6 : Ciment utilisé.....32
Figure III.7 : Schéma de principe de l'essai CBR.....33
Figure III.8 : Appareillage – essai CBR.....33
Figure III.9 : CBR du sol traité en liant hydraulique et déchet de 35
Céramique au temps de cure jours (3j ; 14j ; 28j).
FigureIII.10 : CBR du sol traité en liant hydraulique et déches de.....35
cramique a l'Etat immergée (à la cure)
Figure III.11 : Déroulement de l'essai –CBR 36
Figure III.12 : Perméabilité a charge variable.....38
Figure III.13 : Perméabilité charge constante 38
Figure III.14 : L'appareil de perméabilité.....39
Figure III.15 : Réalisation de l'essai de perméabilité.....40
Figure III.16 : L'odomètre 41
Figure III.17 : Principe de l'essai œdométrique.....42
Figure III.18 : Composent de cellule œdométrique.....43
Figure III.19 : Exemple de calcule de t90 44
Figure III.20 : L'appareil de perméamétrie de Guelph 45
Figure III.21 : Composantes de perméamétrie de Guelph 46
Figure III.22 : Forage de puits.....47
Figure III.23 : Montage de l'appareil de perméamétre de Guelph.....48
Figure III.24 : Formule de calcul 49
Figure III.25 : Classification de sol par perméabilité de Guelph 50
Figure IV.1 : La courbe CBR (100% sol).....53
Figure IV.2 : La courbe CBR (10% déchet de céramique).....53
Figure IV.3 : La courbe CBR (4% ciment).....54
Figure IV.4 : L'effet de (4% ciment +5% dèches de céramique) 14j et 54
28j on CBR.
Figure IV.5 : L'effet de (2% ciment +5% et 10% dèches de céramique).....55
à 28j on CBR.

Figure IV.6 : L'effet de (5% du déchet de céramique + 4% ciment) en..... 55
fonction du temps on CBR.

Figure IV.7 : L'effet de (10% du déchet de céramique + 4%ciment)...……...55
on fonction du temps

Figure IV.8: Résultat essai CBR (déférente pourcentage du déchet de..... 59
céramique et Ciment).

Figure IV.9: Résultat essai CBR (déférente pourcentage du déchet de..... .60
céramique et De ciment).

Figure IV.10: Résultat essai perméabilité (déférente pourcentage du …….....61
déchet de céramique et de ciment).

Figure IV.11: L'effet de dosage du déchet de céramique on CBR et 63
le coefficient de perméabilité

Figure IV.12: L'influence de dosage de déchet de céramique sur l'indice 65
de vide

Figure IV.13: L'influence de dosage de déchet de céramique sur le tassement …..... 67
(Δh)

Figure IV.14: L'influence de dosage de déchet de céramique sur le tassement …..... 68
(Δh) et l'indice de vide (e).

Figure IV.15: Exemple de Calcule de t90 68

Figure IV.16: Variation de Cv en fonction de dosage de dèches de céramique..... 69

Liste des tableaux :

Tableau III.1: Les limites et les indice tiré d'essai limite d'Atterberg 31
(100% sol).

Tableau III.2 : La classe de portance.. 37

Tableau III.3 : Classification de type de sol par rapport le coefficient de 40
Perméabilité

Tableau III.4 : Temps de résultat d'odomètre 44

Tableau III.5 : Classification de sol par Cc 44

Tableau IV.1 : Les caractéristiques des échantillons étudié 51

Tableau IV.2 : Résultat de CBR de sol traité avec (10% du déchet de 52
Céramique +4% ciment) en fonction du temps de la cure.

Tableau IV.3 : Résultat essai CBR (5%du déchet de céramique + 4% ciment)..... 55

Tableau IV.4 : Résultat essai CBR (10%du déchet de céramique + 4% ciment)..... 57

Tableau IV.5 : Synthèse résultat de CBR (Tout le pourcentage déchet 58
de céramique et de ciment).

Tableau IV.6: Résultat essai perméabilité (déférente pourcentage du. 61
déchet de céramique et de ciment).

Tableau IV.7 : Classification des sols par coefficient de perméabilité. 62

Tableau IV. 8 : Les caractéristiques des échantillons : 64

Tableau IV. 9 : Calcule de l'indice de vide (e) 64

Tableau IV.10: Résultat de Cc et classification du sol traitait avec déchet 66
de céramique

Tableau IV.11 Résultats de tassement (Δh) en fonction de dosage de dèches. 66
de céramique à (400 KPa) en fonction de temps

Tableau IV.12: Résultats de tassement (Δh) en fonction de dosage de dèches. 67
de céramique à (800 KPa) en fonction de temps

Tableau IV.13: Résulta de Cv 69

Tableau IV.14: Lecture de début d'eau avec h =5 cm..... 70

Tableau IV.15: Lecture de début d'eau avec h=10 cm 70

Sommaire

Chapitre I : Introduction Générale

I.1 Introduction: 1
I.2 Emplacement de site (Tixter la zone de prélèvement) : 2
I.2.1 Géographie 2
I.2.2 Climat de La wilaya de Bordj Bou Arreridj: 3
I.3 Problématique : 3
I.4 Objectif: 4
1.5 Structure du mémoire : 5

Chapitre II : Revue bibliographique

II.1 Introduction: 6
II.2 Les matériaux utilisés: 6
II.2.1 le sol: 6
II.2.1.2 Les phases de sol: 7
II.2.1.3 Les types de sol : 8
II.2.1.4 Caractéristiques pondérales des sols: 8
II.2.2 Les céramiques: 8
II.2.2.1 Quelques types des céramiques: 9
II.2.2.2 Utilisation: 9
II.2.2.3 Déchet de céramique et de faïence : 10
II.2.3 Le ciment: 11
II.2.3.1 Caractéristiques et différentes formes du ciment: 11
II.3 Les chaussées: 11
II.3.1 Structure de la route: 12
II.3.2 Les grandes familles de chaussée : 12
II.3.3 Support de chaussée : 13
II.4 L'amélioration et stabilisation des sols: 14
II.4.1 Avantages d'amélioration: 14
II.4.2 L'amélioration des sols: 15
II.4.2.1 Les méthodes d'amélioration: 16

II.4.3 La stabilisation de sol : 17
II.4.3.1 Techniques de stabilisation de sol: 18
II.4.3.2 Les liants hydrauliques Utilisés dans la stabilisation :..... 18
II.4.3.3 CBR de sol stabilise avec ciment et chaux et céramique:..... 20
II.4.3.4 Résistance à la compression de sol stabilise avec chaux:..... 22
II.4.3.5 Compressibilité de sol stabilise avec ciment et chaux: 22
II.4.3.6 Perméabilité de sol stabilise avec la chaux: 23
II.4.3.7 L'indice de vide de sol stabilise avec céramique : 23
II.5 Exemple les étapes de stabilisation du sol avec chaux: 24
II.5.1 Scarification et pulvérisation initiale :..... 24
II.5.2 Épandage à la chaux: 24
II.5.3 Mélange préliminaire et arrosage: 25
II.5.4 Période de mûrissement : 26
II.5.5 Mélange final et Pulvérisation:..... 26
II.5.6 Compactage:..... 27
II.5.7 Durcissement final:..... 28
II.6 Conclusion: 29

Chapitre III : Méthodologie

III.1 Introduction : 30
III.2 Matériaux utilisé :..... 30
III.2.1 Le sol étudié :..... 30
III.2.2 Déché de céramique :..... 31
III.2.2 Le ciment : 32
III.3 Les essais :..... 33
III.3.1 Essais CBR (California Bearing Ratio) Norme NF P 94-078 : 33
III.3.1.1 Généralité : 33
III.3.1.2 Définition : 33
III.3.1.3 But de l'essai :..... 33
III.3.1.4 Appareillage nécessaire :..... 34
III.3.1.5 Principe de l'essai : 35
III.3.1.6 Mode opératoire : 36
III.3.1.8 L'indice CBR (I.CBR) : 36

III.3.2 Essai perméabilité (BS-1377-1999):.....37
III.3.2.1 But de l'essai :.....37
III.3.2.2 Définition :.....37
III.3.2.3 Principe de l'essai :.....39
III.3.2.4 Matériel utilisé :.....39
III.3.2.5 Mode opératoire :.....40
III.3.3 Essai œdométrique (NF P 94-090-1) :.....41
III.3.3.1 But de l'essai :.....41
III.3.3.2 Principe de l'essai :.....41
III.3.3.3 Appareillage :.....42
III.3.3.4 Mode opératoire :.....43
III.3.3.4 Comment calculer Cv et Cc ?.....44
III.3.4 Perméamétrie de Guelph:.....45
III.3.4.1 Définition :.....45
III.3.4.2 But de l'essai :.....46
III.3.4.3 Principe de l'essai :.....46
III.3.4.4 Matériel utilisé :.....46
III.3.4.5 Mode opératoire :.....47
III.3.3.4 : Exemple de calcul (Formule de calcul) :.....49
III.3.3.5 : classification de sol par perméabilité de Guelph :.....50
III.4 Conclusion :.....50

Chapitre IV : Résultats et discutions

IV.1. Introduction :.....51
IV.2. Essais de CBR (California Bearing Ratio) :.....51
IV.3. Essai perméabilité :.....61
IV.4. Essai Œdométrique (NF P 94-090-1) :.....64
IV.5. Perméamétrie de Guelph (sur site):.....70
IV.6. Conclusion :.....71

Chapitre V : Conclusion Générale

V.1 Conclusion générale :.....72

Chapitre I:

Introduction générale

I.1 Introduction:

Le réseau routier moderne est l'un des éléments de développement le plus importants en raison de son rôle dans la réalisation de la communication entre les régions et les willayas, les villes et les villages les uns aux autres, en plus de son rôle dans la croissance économique, car elle contribue à la prospérité du commerce et les activités économiques et faciliter la circulation entre les communautés urbaines et entre les zones des zones de production et de distribution, et parce que ce réseau est l'infrastructure utilisée par les moyens de transport et la quantité et la qualité de l'efficience et l'efficacité de ce réseau est l'infrastructure et compétitivité la du pays pour attirer le niveau d'investissement, où nous ne pouvons pas réaliser tout plan de développement sans être servi par des moyens de profiter de réseau de qualité. [1]

Lorsque la construction d'un ouvrage est décidée sur un terrain constitué d'un sol dit à problèmes, en vue d'éviter la solution onéreuse et classique de fondation profonde, il faut recourir à une opération d'amélioration de sol. Cette dernière, des points de vue coût et délai d'exécution, devra être avantageuse par rapport à toute autre solution de fondation envisageable. [2]

Les méthodes d'amélioration des sols sont l'un des outils dont dispose l'ingénieur pour résoudre les problèmes de stabilité ou de déformations qu'il rencontre lors de l'élaboration d'un projet. De nombreuses techniques ont été développées par les ingénieurs géotechniciens au cours du 20ème siècle. Elles permettent l'amélioration des caractéristiques géotechniques et les propriétés mécaniques des terrains, et sont jugées efficaces. Certaines de ces méthodes sont très anciennes, comme le battage de pieux de bois dans les sols de faible portance, d'autres sont plus récentes, comme les méthodes d'injection, de pilonnage ou de congélation. Elles ont connu, depuis une vingtaine d'années, un développement considérable et sont maintenant utilisées comme un élément à part entière des projets. [3]

D'autre part, et avec le grand développement observé dans le domaine de la construction, on constate une augmentation significative de l'accumulation des déchets de construction résultant de la démolition et de la maintenance. En raison de la perte de

ces déchets de dommages esthétiques et de la santé sur la mer et l'homme. Il y a un gros effort pour collecter, recycler et réutiliser ces déchets dans d'autres régions pour en tirer parti, parmi lesquels nous avons choisi les déchets céramiques pour l'utilisation dans le sol comme solution pour exploiter ces déchets.

I.2 Emplacement de site (Tixter la zone de prélèvement) :

Pour cette étude. Nous avons choisi le lien entre la municipalité de Tixter et la municipalité d'Ein Taghrout. Exactement près du port sec de la zone Tixter. Afin d'exploiter le sol de la région pour mener l'ensemble d'expériences proposé.

Figure I.1 : Image par satellite de **Tixter** (Algérie / Bordj Bou Arreridj)

Figure I.2 : La zone de Tixter.

I.2.1 Géographie :

Tixter doit son nom à un oued qui prend naissance à 3 km au sud-est. La ville se situe à une altitude moyenne de 1 100 m. La commune est située dans la région des Hauts-Plateaux, entre les monts Bibans au nord et la chaîne du Hodna au sud, dans un bassin agricole situé à 966 mètres d'altitude moyenne. Elle se trouve à 33 km au nord-est de Bordj Bou Arreridj, à environ 27 km à l'ouest de Sétif et à environ de 275 km au sud-est d'Alger.

Tixter est la commune de la Daïra d'Aïn Taghrout avec une superficie totale de 64 km^2

Figure I.3 : Localisation de Tixter sur la carte géographique de Bordj Bou Arreridj

I.2.2 Climat de La wilaya de Bordj Bou Arreridj:

La wilaya se caractérise par un climat semi-aride sec et froid, qui offre des températures chaudes en été et très froides en hiver, parmi les plus basses d'Algérie. La température moyenne annuelle est de 13.5 °C.

Le mois le plus chaud de l'année est celui de Juillet avec une température moyenne de 23.7 °C, 4.9 °C font du mois de Janvier le plus froid de l'année. La pluviométrie annuelle est de 406 mm, Le mois le plus sec est celui de Juillet avec seulement 8 mm de précipitations. Une moyenne de 48 mm fait du mois de Novembre le mois ayant le plus haut taux de précipitations.[15]

I.3 Problématique :

En Algérie, nous observons que la plupart des routes ont une durée de vie courte. Cela est dû à plusieurs raisons: compris la qualité du sol et la méthode de construction et la quantité de précipitations tombant ..... Etc. À titre d'exemple de ces dommages, nous notons les documents suivants, pour parler du problème de la qualité du sol à faible résistance à la construction routière, nous aborderons dans ce sujet l'amélioration de ses propriétés en utilisant les dèches de céramique et le ciment.

Certains des problèmes les plus importants causant des dommages aux routes:

- Certains types de sols ont de mauvaises propriétés et une faible résistance, ce qui les rend fragiles, ce qui ne convient pas à la construction de routes, il est conseillé d'améliorer la levée de ces propriétés avant poser la route.

- En ce qui concerne le problème de la perméabilité, nous pouvons dire que l'absence de perméabilité signifie un sol sans vide et également un sol cohésif, donc le travail devrait être fait sur les mécanismes qui aident à réduire la perméabilité autant que possible.

- L'un des problèmes qui se posent directement à la surface de la route à travers les fissures et les déformations est le problème de tassement lié principalement à la structure du sol et à la proportion des vides qu'il contient. L'amélioration du sol devrait être faite pour réduire ce problème.

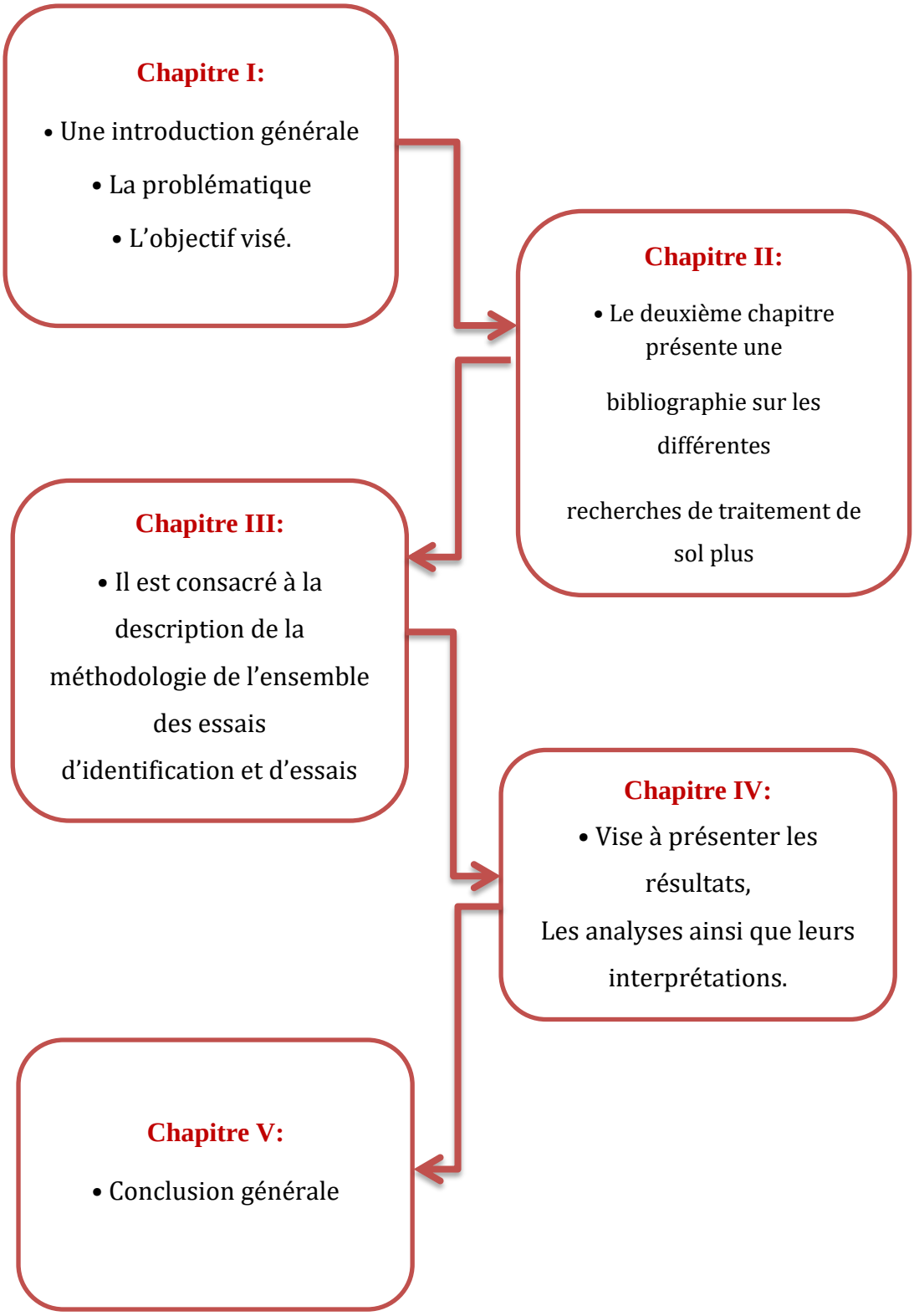
L'accumulation de dèches de céramique dans l'espace agriculture et autre sensible zones, si nous constatons de grand efforts en vue de la réutilisation dans les diffèrent domaines comment pourrait être utilisé pour améliorer les caractéristiques du sol et comment cela contribue à réduire le coût de la construction, qui est aussi un facteur très important doit être soigneusement observé.

I.4 Objectif:

Compte tenu du rôle important joué par le réseau routier dans les transports et l'économie. A travers cette étude nous visons principalement:

- Éliminer le problème des dommages routiers et assurer l'établissement de routes de haute qualité et une durée de vie plus longue.
- Utiliser autant de déchets que possible, en particulier les déchets de céramiques.
- Eliminer la pollution dans l'espace d'agriculture et zone côtier.
- Réduire les coûts par l'utilisation des déchets et minimiser la maintenance après l'utilisation de la route.
- Augmentation de la capacité portant du sol, la rigidité, imperméabilité, homogénéité, vieillissement, durabilité, prédiction de la résistance fonction du type de sol, par introduisant des déchets de céramique et de ciment dans l'amélioration du sol.

1.5 Structure du mémoire :



Chapitre II:

Etude Bibliographique

II.1 Introduction:

L'Expansion et développement extensifs dans le domaine du génie civil. Ceci est dû à la demande croissante de ressources matérielles ainsi qu'à la préservation de l'environnement d'une part et à l'apport d'une nouvelle vision pour le développement durable d'autre part.

L'un des domaines de l'utilisation des déchets dans le génie civil est ce qu'on appelle le traitement des sols est souvent opéré pour augmenter leur résistance, pour réduire ou leur perméabilité ainsi que pour diminuer leur compressibilité. Il est, aussi utilisé pour minimiser la sensibilité du sol aux variations de la teneur en eau comme dans le cas des sols expansifs.

II.2 Les matériaux utilisés:

II.2.1 le sol:

Le sol fait partie intégrante des écosystèmes terrestres et constitue l'interface entre la surface de la terre et le socle rocheux. Il se subdivise en couches horizontales successives aux caractéristiques physiques, chimiques et biologiques spécifiques. Il a également différentes fonctions. Du point de vue de l'histoire et de l'utilisation des sols ainsi que d'une perspective écologique et environnementale, le concept de sols embrasse également les roches poreuses sédimentaires, les autres matériaux perméables, en plus de l'eau qu'ils contiennent et des réserves d'eau souterraine. » Conseil de l'Europe. [4]

Dans le cadre de la mécanique des sols : On peut définir le sol « comme une roche non lapidifiée qui se trouve à la surface de la terre, au-dessus ou entre les couches de roche dure lapidifiée ». Dans cette définition, le sol comprend l'air, l'eau, les matières organiques et toutes les autres matières mélangées aux grains minéraux] .[5]

Dans le cadre de la pédologie: où le sol est « la formation naturelle de surface à structure meuble et d'épaisseur variable, résultat de la transformation de la roche-mère

sous-jacente sous l'influence de divers processus physiques, chimiques et biologiques » [5]

Pour les ingénieurs routiers et les géotechniciens: les « sols » sont des matériaux naturels, constitués de grains faciles à séparer par simple trituration ou par l'action d'un courant d'eau. Ces grains, ou éléments, peuvent être de dimensions extrêmement variables, allant des particules d'argile aux blocs rocheux. [5]

Figure II.1: Présentation de sol

II.2.1.2 Les phases de sol:

Nous schématiserons les sols comme étant composé de trois phases. Une phase solide composée de particules minérales solides et organiques. Une phase liquide sous différentes formes appelé : eau libre, eau interstitielle et pour finir une phase gazeuse. [3]

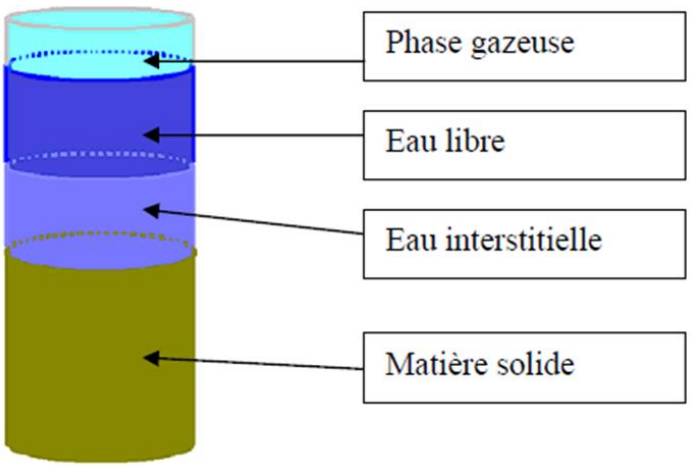


Figure II.2: Schéma simplifié des trois phases du sol. [3]

II.2.1.3 Les types de sol :

Trois type de sols ressortent comme étant les plus souvent rencontrés sur un chantier :

• Sols grenus

• Sols fins

• Sols organiques [3]

II.2.1.4 Caractéristiques pondérales des sols:

On définit tout d'abord les volumes liés aux constituants d'un échantillon:

- Le volume de l'échantillon non traité est noté *Ve*.
- Le volume de la matière solide constituant les grains, aussi appelé volume des grains, est noté *Vs*.
- Le volume de liquide, est noté *Vw*.
- Le volume des vides, constitué de la somme du volume d'eau (phase liquide) et du volume d'air, est noté *Vv*.

Viennent ensuite les définitions des poids de ces constituants:

- Le poids de l'échantillon non traité, aussi appelé poids apparent, et noté *Wh*. (h pour *humid*)
- Le poids des grains, ou poids de la matière solide, est noté *Ws*.
- Le poids du liquide, équivalent, par hypothèse générale, au poids de l'eau présente dans l'échantillon, est noté *Ww*.
- Par hypothèse, également, le poids de la phase gazeuse est considéré comme nul. Il n'y a donc pas de symbole qui lui soit lié. [5]

II.2.2 Les céramiques:

Les céramiques sont des matériaux inorganiques, composés d'oxydes, de carbures, de nitrures et de borures. Les céramiques présentent des liaisons chimiques fortes de nature ionique ou covalente. Elles sont mises en forme à partir d'une poudre de granulométrie adaptée qui est agglomérée. Dans une deuxième étape la densification et la consolidation de cet agglomérat sont obtenues par un traitement thermique appelé frittage. A la différence des verres les céramiques, en tous cas dans les matériaux les plus anciens, sont constituée de 2 phases distinctes : une phase vitreuse, la matrice (désordonnée) et une phase cristalline dispersée (ordonnée). [7]

II.2.2.1 Quelques types des céramiques:

A / La poterie : On désigne généralement sous ce terme les terres cuites simples d'usage courant. Peu onéreuse elle est généralement fabriquée à proximité du lieu de consommation. Objet utilitaire, son usage définit sa forme. Parfois une glaçure peut venir le recouvrir afin de favoriser les caractéristiques du vase (étanchéité, décoration…).

B / La sigillée : céramique fine produite à grande échelle par quelques ateliers gallo-romains. Il s'agit d'une terre cuite moulée richement décorée puis trempée dans de la barbotine (argile liquide) qui va lui conférer à la cuisson une couleur rouge-orangée d'aspect vernissé typique. Lorsqu'elles sont de bonne qualité, les sigillées sont solides et difficilement rayables. Très populaire aubier et IIe siècle de notre ère, elles disparaissent avec la chute de l'Empire romain.

C / La faïence : La faïence naît de la volonté de copier la coûteuse porcelaine chinoise. Les procédés sont connus depuis longtemps au Moyen-Orient et sont réellement mis en valeur en Italie et en Espagne au XVe siècle. En France, il faut attendre la venue d'artistes italiens dans le sillage de François 1er pour découvrir les techniques de cet art. La faïence est une terre cuite qui, après une première cuisson, est recouverte d'un émail opaque généralement blanc. Après un temps de séchage, on peut décorer les objets selon une palette limitée dans un premier temps à cinq couleurs (bleu, jaune, rouge, vert et violet) avant de leur faire subir une nouvelle cuisson qui leur donnera un aspect brillant et parfaitement étanche.

D / La porcelaine : La porcelaine fait l'objet de toutes les attentions en Europe. Légère et translucide, solide et fine, ce type de céramique restera un monopole chinois jusqu'au XVIIIe s. avant qu'un Allemand perce le mystère de cette pâte. Utilisant une argile blanche spécifique appelé kaolin, la porcelaine se vitrifie naturellement lors d'une cuisson à haute température. Comme pour la faïence un décor vient rehausser l'objet. [8]

II.2.2.2 Utilisation:

Les céramiques présentes dans le BIP Sault 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. (Pôle européen de la céramique.)

Carrelage sol

Carrelage mural

Figure II.3 : Utilisation de la céramique. [9]

II.2.2.3 Déchet de céramique et de faïence :

Une partie des déchets du secteur du bâtiment et des travaux publics peut être recyclée sous forme de granulats. L'Est Var manque de sources de granulats. Certains déchets de démolition et déblais de terrassements peuvent être concassés et criblés en produisant des granulats de différents calibres utilisables dans les TP en sous couches de routes ou en produits de drainage. Les déchets du BTP contiennent aussi des parties non recyclables comme des déblais de terrassement argileux et marneux, des céramiques Kaoliniques, des carreaux et tuiles et des plâtres (non encore récupérés). Ces déchets considérés comme ultimes doivent être stockés en sites de Classe III, déchets inertes non dangereux. Nous manquons en pays de faïence d'un tel site. Celui envisagé au vallon des Frayères en zone natura 2000 n'est pas adapté. [10]

Figure II.4 : Déchet de céramiques

II.2.3 Le ciment:

Le ciment est une matière pulvérulente, à base de silicate et d'aluminate de chaux, obtenue par cuisson, en proportions variables selon les matières premières utilisées :

- silicate tricalcique, ou C_3S (3 CaO, SiO_2),
- silicate bicalcique, ou C_2S (2 CaO, SiO_2),
- aluminate tricalcique, ou C_3A (3 CaO,Al_2O3),
- aluminoferrite tricalcique, ou C_4AF (4 CaO, Al_2O_3, Fe_3O_3).

Les matières premières essentielles sont la roche calcaire et l'argile. Elles sont broyées et éventuellement additionnées de produits secondaires. Le mélange obtenu s'appelle le cru et est composé d'environ 80 % de calcaire et d'environ 20 % d'argile. [11]

Figure II.5 : Ciment utilisé

II.2.3.1 Caractéristiques et différentes formes du ciment:

Cette matière forme, avec l'eau ou une solution saline, une pâte plastique liante. Après avoir durci dans l'air ou dans l'eau, cette pâte conserve sa résistance et sa stabilité. Sous forme de poudre mélangée à l'eau, le ciment permet d'agréger du sable fin pour produire du mortier, des granulats et du béton. Le mot recouvre plusieurs matériaux comme le plâtre, la chaux, la pouzzolane, le ciment prompt, le ciment Portland et le ciment de romain. [11]

II.3 Les chaussées:

Il est vrais qu'on circulait aisément sur des pistes bien nivelées quand les conditions climatiques étaient favorables, mais en période de pluie, les sols mouillés devenaient glissants ou se transformaient en bourbiers. On entreprit alors d'étaler, aux endroits les plus mauvais, des lits de pierres dont le mérite était d'être moins sensible à l'eau.
L'idée du matelas de pierres a duré de nombreux siècles. Elle s'est développée à l'époque des Romains pour donner naissance à la chaussée Romaine: le dallage. Plus tard, la route empierrée (macadam) a fait son apparition et avec elle, les premières spécifications pour l'exécution d'une bonne route. [16]

À cet égard, les termes suivants devraient être définis:

Le terme «route» désigne toute l'emprise de tout chemin ou rue ouvert à la circulation publique.

Le terme «chaussée» désigne la partie de la route normalement utilisée pour la circulation des véhicules; une route peut comporter plusieurs chaussées nettement séparées l'une de l'autre, notamment par un terre-plein central ou une différence de niveau. [20]

II.3.1 Structure de la route:

1 / La chaussée, au sens structural, est l'ensemble des couches de matériaux disposées pour supporter la circulation des véhicules sur le terrain préparé. La chaussée est dite rigide si elle comporte une dalle en béton de ciment ; elle est dite souple dans le cas contraire.
2 / La forme: est la surface du terrain préparé sur laquelle est édifiée la chaussée et parfois les accotements quand ils sont rapportés. Elle peut être encaissée ou dérasée. [21]

II.3.2 Les grandes familles de chaussée :

Suivant leur mode de fonctionnement, on distingue 6 grandes familles de chaussée: Les chaussées souples ; Les chaussées semi-rigides ; Les chaussées rigides ; Les chaussées à structure mixtes ; Les chaussées à structure inverse ; Les chaussées bitumineuses épaisses. [15]

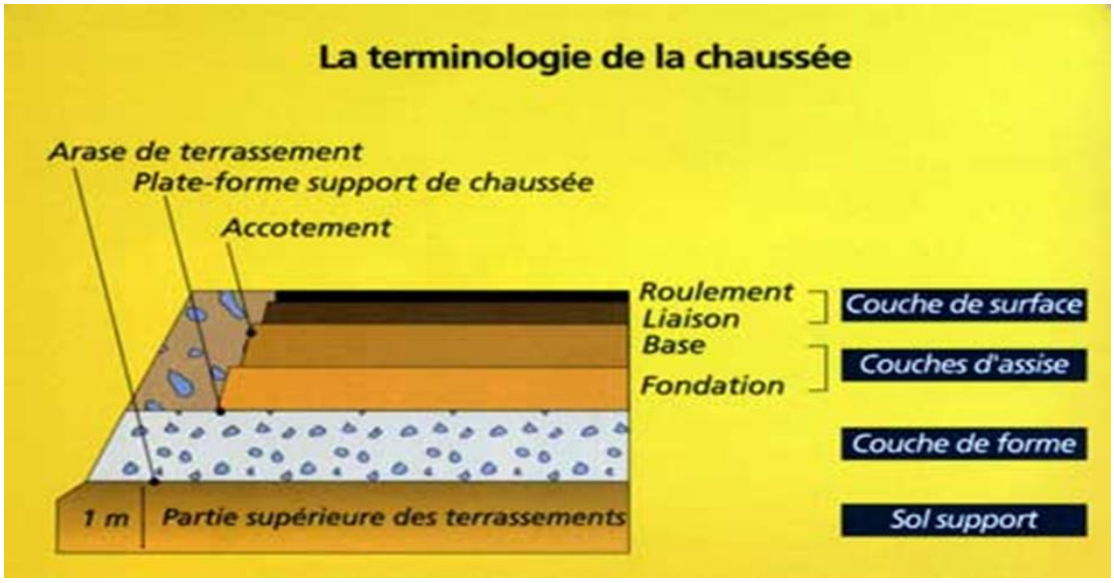


Figure II.6 : La terminologie de la chaussée

II.3.3 Support de chaussée :

Les structures de chaussées routières ou de voies ferroviaires sont construites sur un ensemble appelé plate-forme support de chaussée ou de voie.

Elle se compose:

- de sols en place ou matériaux rapportés (environ 1,00 m) pour former la partie supérieure des terrassements (PST) des fonds de déblais et des remblais, sa surface représente l'arase terrassement.
- de matériaux souvent élaborés sus-jacents à cette partie, pour constituer la couche de forme.

Les dimensionnements de la couche de forme et de la structure de chaussée ou de voie sont conditionnés par la caractérisation mécanique des sols constituants la PST. La norme de classification des sols (NF P 11-300) permet cette caractérisation, elle est fondée sur :

- l'état hydrique à la mise en œuvre ;
- Le comportment mécanique.

À partir de ces éléments, différents cas de PST sont définis et décrits dans le guide des terrassements routiers (GTR), cette description est complétée par la portance à long terme sur l'arase terrassement et pour laquelle quatre classes d'arase sont distinguées.

La couche de forme est un élément de transition permettant d'adapter les caractéristiques des matériaux de remblai ou de sols en place aux fonctions essentielles d'une plate-forme support de chaussée ou de voie. Elle doit donc répondre à la fois des objectifs de court terme pour la réalisation de la chaussée ou de la voie (nivellement, portance, protection du sol support et traficabilité) et de long terme vis à vis de l'utilisation de l'ouvrage (homogénéisation, garantie d'une portance minimale, contribution au drainage de la plate-forme.

Les matériaux de couche de forme pourront être utilisés dans leur état naturel ou être rendus aptes moyennant une modification de leur nature ou de leur état (traitement aux liants ou élaboration) afin de satisfaire à des critères concernant :

- l'insensibilité à l'eau.
- la dimension des plus gros éléments.
- la résistance sous circulation des engins de chantier.
- l'insensibilité au gel.

Le couple PST - couche de forme détermine la portance à long terme de la plate-forme support de chaussée. [22]

II.4 L'amélioration et stabilisation des sols:

En raison du rôle important joué par le réseau de routes dans divers domaines, la recherche et le développement sont en cours pour trouver des moyens efficaces, Afin de créer des routes de haute qualité et une plus grande durabilité, Parmi ceux-ci sont nos méthodes L'amélioration et stabilisation des sols.

II.4.1 Avantages d'amélioration:

- Empêcher le tassement excessif des terres renflouées quand elles sont utilisées pour la construction (routes, aéroports, ponts et autres fondations).
- Augmenter la rigidité du sol afin d'empêcher la liquéfaction et les dommages consécutifs aux structures dans des régions sismiques.
- Augmenter la résistance au cisaillement du sol afin d'empêcher les glissements de terrain.

- Augmenter la portance du sol ; Immobiliser ou stabiliser les contaminants dans le sol dragué afin d'éliminer des incidences sur l'environnement.

Quelques méthodes d'amélioration peuvent également fournir des moyens rentables pour réduire la contamination des sols. L'assèchement des sols contaminés a un double effet. Une partie du sol amélioré peut être réutilisée pour des projets de construction, éliminant la nécessité d'extraire de nouveau du sable de mine. Les quantités de sédiment inutilisable sont réduites, ce qui diminue l'espace requis pour le stockage, qui est toujours coûteux et problématique en termes d'environnement. En outre, quand des additifs tels que le ciment sont employés pendant l'amélioration du sol. [15]

II.4.2 L'amélioration des sols:

Amélioration est une opération quasi instantanée qui consiste à améliorer les propriétés géotechniques du sol avec un ajout de liant pour des teneurs variant de 1 à 3 % (augmentation de la portance, de la résistance à la pénétration, amélioration de l'aptitude du sol au compactage), alors que la nature du sol reste la même. Cette opération permet d'assurer la mise en œuvre du sol avec les ateliers traditionnels de terrassement. [12]

Les méthodes d'amélioration des sols sont l'un des outils dont dispose l'ingénieur pour résoudre les problèmes de stabilité ou de déformations qu'il rencontre lors de l'élaboration d'un projet. Certaines de ces méthodes sont très anciennes, comme le battage de pieux de bois dans les sols de faible portance, d'autres sont plus récentes, comme les méthodes d'injection, de pilonnage ou de congélation. Elles ont connu, depuis une vingtaine d'années, un développement considérable et sont maintenant utilisées comme un élément à part entière des projets. [13]

Les méthodes d'amélioration des sols décrites dans le présent article ont été classées par type de sols à traiter : sols fins, sols grenus et sols particuliers. On passe en revue dans chaque cas les principaux types de problèmes que l'on rencontre en pratique, puis on décrit sommairement les méthodes d'amélioration les plus couramment utilisées, les méthodes de calcul et de contrôle correspondantes, ainsi que les domaines d'application

de chaque méthode. Les méthodes de renforcement des sols par géotextiles ou par clouage, ainsi que les techniques d'injection ne sont pas décrites ici. [13]

II.4.2.1 Les méthodes d'amélioration:

A / Compactage dynamique et plots ballastés: Cette méthode permet de traiter le sol en profondeur, par des actions de surface. La consolidation dynamique provoque un compactage des sols granulaires. Le principe consiste à laisser tomber, en chute libre et de façon répétée une masse de plusieurs dizaines de tonnes depuis une hauteur de quelques dizaines de mètres. Dans les terrains cohérents, on procède à une incorporation de ballast sous la masse, réalisant ainsi des plots ballastés. [14]

B / Drains verticaux: Les drains verticaux sont utilisés pour l'amélioration des sols fins saturés en eau. La technique consiste à foncer verticalement dans le terrain, suivant un maillage régulier, un drain préfabriqué. Lors de la mise en charge du terrain, les drains facilitent l'évacuation de l'eau interstitielle jusqu'à la surface, permettant ainsi une consolidation accélérée des sols traités. La surcharge est apportée soit par un remblai de pré chargement, soit par d'autres méthodes. [14]

C / Vibroflottation: La vibroflottation, (parfois appelée vibrocompaction), s'applique essentiellement aux sols granulaires non cohérents, tels que sables et graviers. Les vibrations engendrent un phénomène temporaire de liquéfaction du sol environnant le vibreur. Dans cet état, les forces intergranulaires sont quasiment annulées, et les grains sont réarrangés dans une configuration plus dense présentant de meilleures caractéristiques mécaniques. Cette technique est couramment mise en œuvre à très grande échelle pour le compactage de terre-pleins en sable gagnés sur la mer par remblaiement hydraulique.

D / Colonnes ballastées: La technique des colonnes ballastées est une extension de la vibroflottation aux terrains qui comportent des couches limoneuses ou argileuses dont les éléments ne peuvent être réarrangés par la vibration. Les colonnes ballastées permettent de traiter ces sols par incorporation de matériaux granulaires (couramment appelés ballast) compactés par passes remontantes. Ces colonnes peuvent être également cimentées ou constituées de mortier. Elles servent également de drains et

permettent une accélération du processus naturel de consolidation. En zone sismique, elles réduisent les risques de liquéfaction. [14]

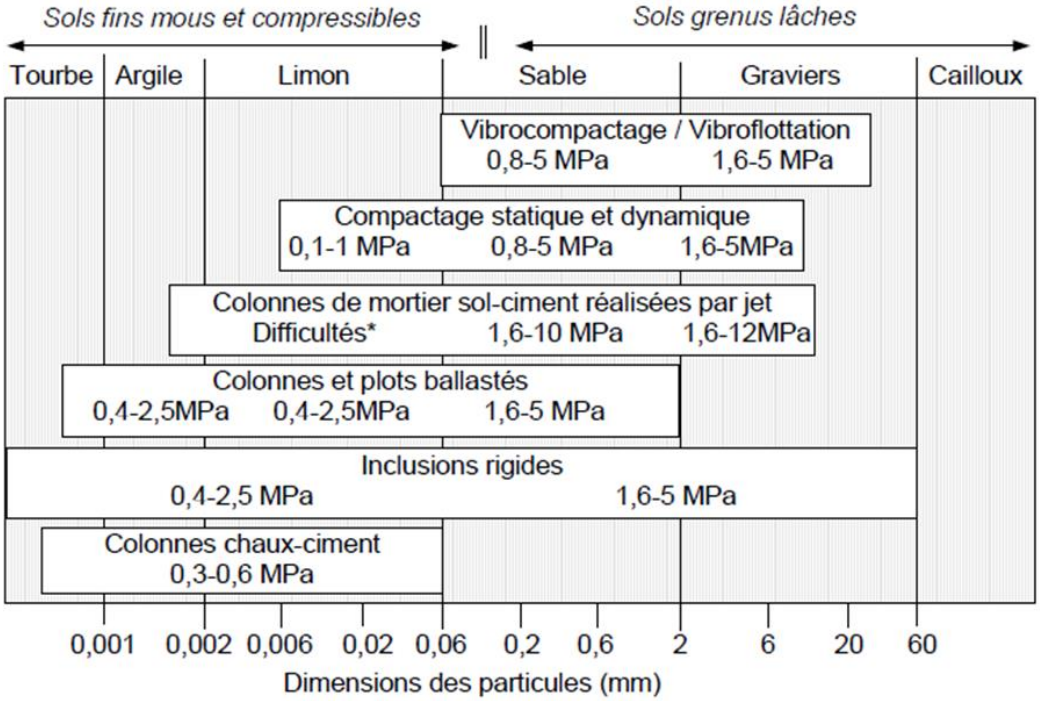


Figure II.7 : Les méthodes d'amélioration et les domaines d'applications [3].

II.4.3 La stabilisation de sol :

La stabilisation est une opération à moyen ou à long terme consistant à augmenter très sensiblement les caractéristiques mécaniques d'un sol avec un ajout de liant pour des teneurs variant de 4 à 8 %, de manière à conférer durablement au matériau un état définitif de stabilité à l'eau et au gel. Elle se traduit, entre autres par un durcissement graduel du mélange au cours des semaines et des mois qui suivent le compactage. Ces effets pourraient être mis à profit dans le dimensionnement de certaines chaussées, mais n'interviennent pas au niveau des travaux de terrassement. [12]

Les techniques de stabilisation les plus utilisées qu'elles soient chimiques ou autres dans le domaine routier sont : La stabilisation mécanique et La stabilisation chimique. (Par ajout de matériaux). [15]

Le choix de l'une ou de l'autre de ces méthodes fait appel à plusieurs facteurs tels que la nature du sol, la disponibilité du matériau ou du produit stabilisant, les délais de

réalisation du projet, les considérations économiques et les conditions environnementales et de mise en œuvre. [15]

II.4.3.1 Techniques de stabilisation de sol:

1. Stabilisation par ajout des matériaux inertes: De nombreuses études scientifiques ont montré qu'on peut stabiliser les sols par ajout de matériaux inertes tels que les sables. Cependant, des cas pratiques de projets de stabilisation par ajout de sable rapportés dans la littérature sont plutôt rares. [16]

2. Stabilisation chimique des sols: Elle se base sur l'utilisation de produits chimiques ou de liants afin d'augmenter la concentration ionique de l'eau libre et de réduire les phénomènes d'échange indésirables. [16]

II.4.3.2 Les liants hydrauliques Utilisés dans la stabilisation :

Les liants hydrauliques les plus utilisés pour stabiliser les sols ou renforcer les matériaux sont, le ciment, la chaux, liants hydrauliques routiers (LHR) et les cendres volantes. Leur action résulte essentiellement de l'effet de prise et de la cristallisation de leurs constituants par hydratation. L'emploi de ces techniques s'est développé principalement en technique routière. Ces liants ont des réactions quelque peu différentes et exigent des conditions différentes pour se réaliser, cependant les effets de leur réaction sont fortement similaires. [16]

A. Ciment: Le ciment est le plus vieux liant depuis l'invention de la technologie de stabilisation des sols dans les années 1960. Il peut être considéré comme un stabilisant primaire ou un liant hydraulique car il peut être utilisé seul pour provoquer l'action stabilisante nécessaire. La réaction du ciment ne dépend pas des minéraux du sol, et le rôle clé est sa réaction avec l'eau qui peut être disponible dans n'importe quel sol.

B. Chaux: La chaux constitue un moyen économique de stabiliser les sols. La modification de la chaux décrit une augmentation de la force apportée par la capacité d'échange de cations plutôt que l'effet de cimentation apporté par la réaction pouzzolanique. . La stabilisation de la chaux peut se référer à la réaction pouzzolanique

dans laquelle les matériaux de pouzzolane réagissent avec la chaux en présence d'eau pour produire des composés cimentaires. L'effet peut être apporté soit par de la chaux vive, du CaO ou de la chaux hydratée, Ca (OH) 2. La chaux résiduaire peut également être utilisée dans des conditions de sols secs ou de l'eau peut être nécessaire pour obtenir un compactage efficace. La chaux vive est la chaux la plus couramment utilisée; les suivants sont les avantages de la chaux vive sur la chaux hydratée.

- teneur plus élevée en chaux libre disponible par unité de masse
- Plus dense que la chaux hydratée (moins d'espace de stockage est requis) et moins de poussière
- génère de la chaleur qui accélère le gain de force et réduit considérablement la teneur en humidité selon l'équation de réaction ci-dessous

$$CaO+H2O \rightarrow Ca(OH)2 + Heat\ (65\ KJ/mol)$$

La technologie de stabilisation de la chaux est principalement utilisée dans les applications géotechniques et environnementales. Certaines applications comprennent l'encapsulation de contaminants, le remblayage (par exemple sol cohésif humide), le recouvrement routier, la stabilisation des pentes et l'amélioration des fondations comme l'utilisation de piliers de chaux ou de colonnes stabilisées à la chaux. Cependant, la présence de soufre et de matières organiques peut inhiber le processus de stabilisation de la chaux. Le sulfate (par exemple le gypse) réagira avec la chaux et le gonflement, ce qui peut avoir un effet sur la résistance du sol. [17]

C. Les liants hydrauliques routiers (LHR): Des liants spéciaux routiers (LHR) ont été étudiés et mis au point depuis plusieurs années pour le traitement des sols en place ou en centrale et pour la fabrication de matériaux d'assises de chaussées, le LHR concerné présente, pour un type de sol et une nature d'ouvrage donnés, un comportement satisfaisant, mais toute extrapolation à d'autres paramètres de chantier comporte une part de risque qu'il convient d'évaluer pour chaque nouveau chantier.

Les principes d'action des LHR ne sont pas fondamentalement différents de ceux des ciments car on y retrouve, mais en proportion différentes, les mêmes constituants et donc des phénomènes de prise hydraulique de même nature, mais le plus souvent avec des cinétiques spécifiques.

Les LHR peuvent présenter certains avantages et notamment :

- leur coût de fabrication plus faible, car leur composition est en forte proportion à base de constituants ne nécessitant pas de cuisson spécifique (laitiers, cendres volantes, pouzzolanes, etc.)

-leur possibilité de mieux s'adapter à un cas de chantier particulier.

En effet, leur fabrication pouvant être gérée de manière plus souple que celle des ciments, peut être envisagée, si les enjeux du projet le justifient, de fabriquer un produit optimisé à un sol particulier et ayant une cinétique de prise ajustée à l'époque des travaux et/ou aux contraintes d'organisation du chantier. En contrepartie, l'absence, jusqu'à présent, de normalisation de procédure de certification gêne en partie le développement de ces produits (du fait, notamment, de la nécessité de pratiquer des études plus détaillées qu'avec des ciments). [15]

II.4.3.3 CBR de sol stabilise avec ciment et chaux et céramique:

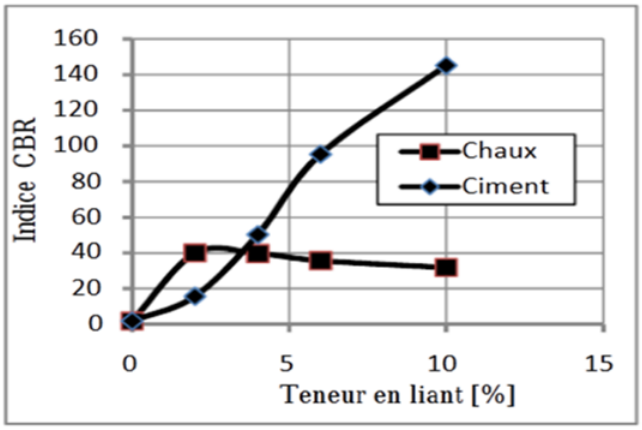


Figure II.8 : Evolution de l'indice CBR après immersion en fonction de la teneur des liants (ciment et chaux). [19]

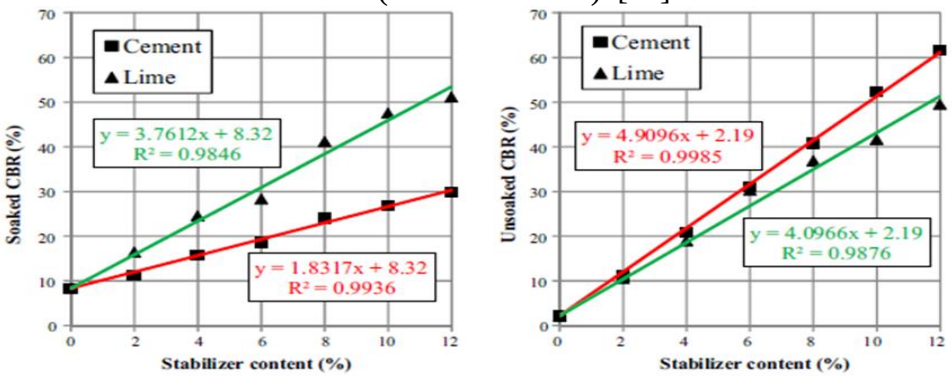


Figure II.9: Evolution de l'indice CBR en fonction de La teneur des liants (ciment et chaux). [19]

D'après les figure II.8 et II.9 nous notons que chacun des Bachir, Abdelkrim et Mohamed a trouvé dans leur recherche que, le CBR augmentent linéairement avec une proportion croissante de ciment et de chaux, avec une grande efficacité du ciment à long terme que la chaux.

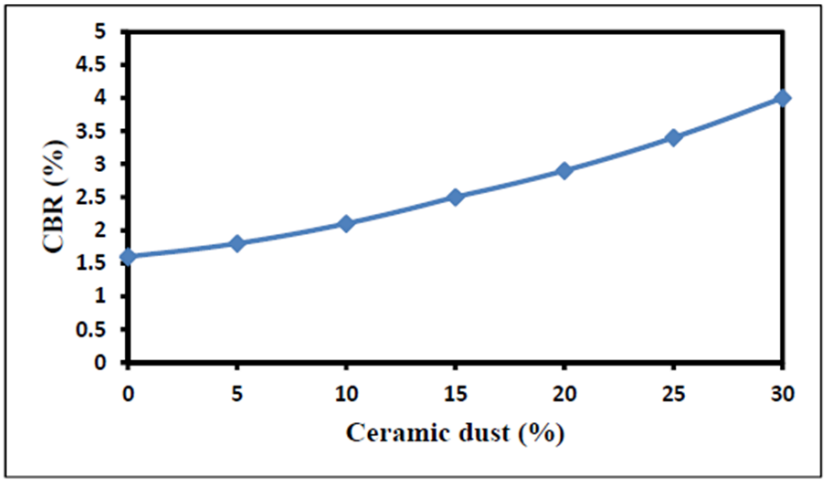


Figure II.10 : Variation de CBR imbibée avec le pourcentage de poussière de céramique [24]

A 'partir de la figure II.10, nous notons que Akshaya Kumar Sabat a trouvé dans sa recherches que le CBR augmentent linéairement avec une proportion croissante de céramique recyclée jusqu'à 4%.

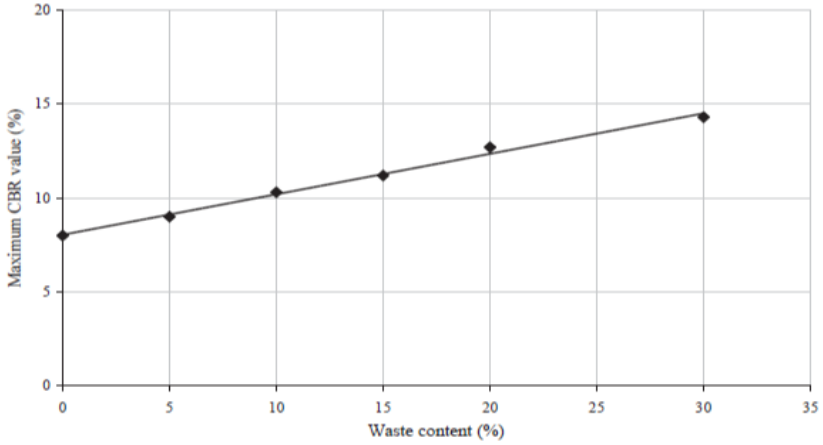


Figure II.11 : Variation de CBR imbibée avec le pourcentage de céramique [32]

A 'partir de la figure II.11, nous notons que Thafer a trouvé dans sa recherches que le CBR augmentent linéairement avec une proportion croissante de céramique recyclée jusqu'à 15%.[34]

II.4.3.4 Résistance à la compression de sol stabilise avec chaux:

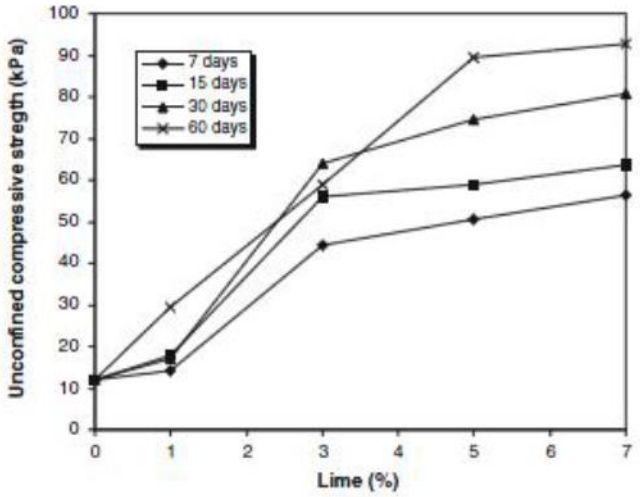


Figure II.12 : Effets de la Chaux sur la Résistance [16]

D'après la figure II.12, nous notons que dans le groupe de recherche de Bensalem, la présence d'un résultat indique une augmentation de la résistance du sol traité avec de la chaux au fil du temps.[16]

II.4.3.5 Compressibilité de sol stabilise avec ciment et chaux:

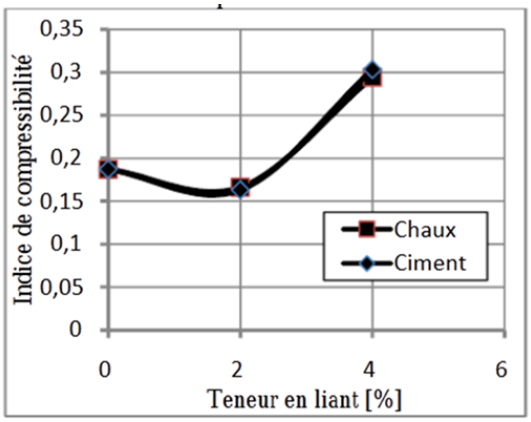


Figure II.13: Evolution de l'indice de compressibilité de la marne traitée à la chaux et au ciment. [18]

D'après la figure II.13 nous notons parmi les résultats obtenus par Bachir de sa recherche qu'une augmentation de compressibilité avec la proportion croissante de liants hydrauliques dans le sol.[18]

II.4.3.6 Perméabilité de sol stabilise avec la chaux:

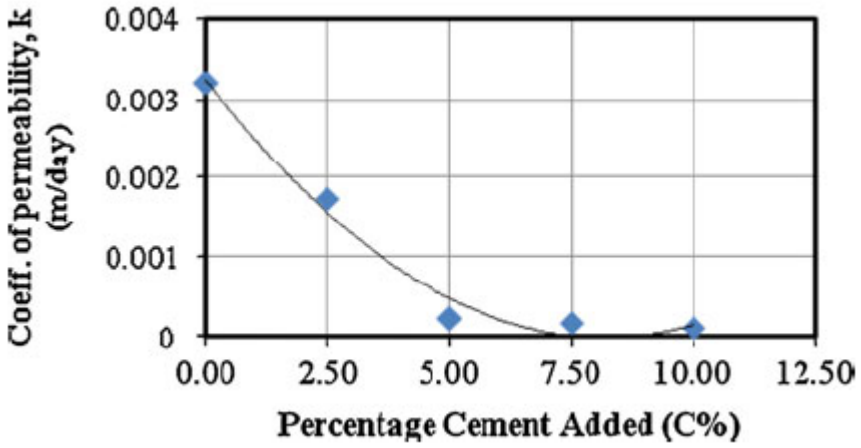


Figure II.14: la variation de coefficient de perméabilité en termes de dosage de ciment. [33]

D'après la Figures II.14**,** nous notons que parmi les résultats obtenus par chacun des Nayak, Purushotham et Sarvade Dans leurs recherches que l'augmentation d'une proportion croissante du liant hydraulique dans le sol contribue à la réduction de son perméabilité, pour un coefficient de perméabilité mini môme de $2.51x10^{-10}$.[33]

II.4.3.7 L'indice de vide de sol stabilise avec céramique :

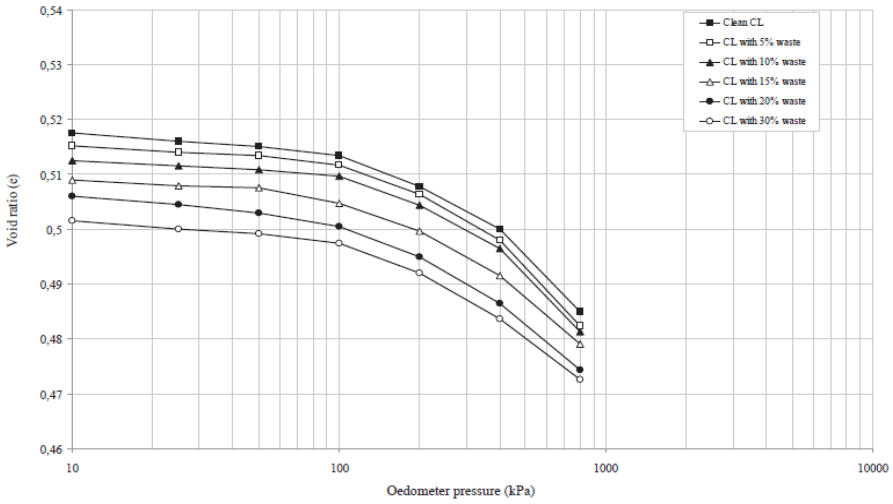


Figure II.15: L'effet de dosage de céramique sur l'indice de vide. [32]

D'après la Figures II.15, nous notons que parmi les résultats obtenus par Thafer l'indice de vide diminue à 0.4720 avec l'augmentation de dosage de céramique entre 0% et 30%.

II.5 Exemple les étapes de stabilisation du sol avec chaux:

Pour comprendre et expliquer les étapes de la stabilisation, nous devons utiliser un exemple qui explique le processus de traitement à l'aide de chaux:

II.5.1 Scarification et pulvérisation initiale :

Une fois que le sol a été mis en ligne et nivelé, la plate-forme peut être scarifiée jusqu'à la profondeur et la largeur spécifiées (Figure 16), puis partiellement pulvérisée. Il est souhaitable d'enlever les matériaux non-sol de plus de 3 pouces, tels que les souches, les racines, le gazon et les agrégats.

Une surface de fondation scarifiée ou pulvérisée offre plus de surface de contact avec la chaux au moment de l'application de la chaux. Si la méthode en suspension est utilisée, la scarification diminuera également le ruissellement provenant de la zone de traitement. [25]

Figure II.16 : Scarification avant l'application de la chaux. [25] [28]

II.5.2 Épandage à la chaux:

Il y a deux façons d'appliquer la chaux vive sèche. Tout d'abord, les camions ou les remorques auto déchargeurs peuvent distribuer de la chaux vive par voie pneumatique ou mécanique sur toute la largeur du camion. Étant donné que le flux de chaux vive granulaire et de galets est plus contrôlable que la chaux hydratée, il est courant d'utiliser des chariots avec des épandeurs de type agrégat (voire Figure II.17).

Pour s'assurer que la quantité correcte de chaux est étalée, une casserole ou un tissu de la zone connue peut être placé sur le sol entre les roues du camion épandeur lorsqu'il traverse le site. Le récipient de collecte avec la chaux est pesé pour s'assurer que la quantité de chaux est correcte.

Figure II.17 : Application de chaux sèche avec un épandeur mécanique:[25] [27]

II.5.3 Mélange préliminaire et arrosage:

Un mélange préliminaire est nécessaire pour répartir la chaux dans le sol et pulvériser initialement le sol pour préparer l'addition d'eau afin de déclencher la réaction chimique de stabilisation. Ce mélange peut commencer avec la scarification (voire Figure II.18). Cependant, la scarification peut ne pas être nécessaire pour certains mélangeurs modernes. Au cours de ce processus ou immédiatement après, de l'eau doit être ajoutée (voire Figure II.19). [25]

Figure II.18 : Scarification après de chaux [26]

Figure II.19 : Ajout d'eau après épandage application chaux sèche. [25]

Des mélangeurs rotatifs devraient être utilisés pour assurer un mélange complet de la chaux, du sol et de l'eau (Voire Figure II.20). Avec de nombreux mélangeurs rotatifs, de l'eau peut être ajoutée au tambour de mélange pendant le traitement de la chaux vive (Figure II.21). C'est la méthode optimale pour ajouter de l'eau à la chaux sèche (chaux vive ou chaux hydratée) et au sol pendant le pré-mélange et l'arrosage. [25]

Figure II.20 : Mélangeur rotatif utilisé pour avec le mélange initial [25]

Figure II.21 : Mélangeur rotatoire le camion de l'eau attaché [25]

II.5.4 Période de mûrissement :

Le mélange de chaux et de terre doit être suffisamment fondu pour permettre à la réaction chimique de changer (dégrader) le matériau. La durée de cette période d'adoucissement devrait être basée sur le jugement technique et dépend du type de sol. La période d'adoucissement est généralement de 1 à 7 jours. Après mûrissement, le sol doit être remélangé avant le compactage. Pour les sols à faible indice de plasticité, ou lorsque le séchage ou la modification est l'objectif, le mûrissement n'est souvent pas nécessaire.

II.5.5 Mélange final et Pulvérisation:

Pour obtenir une stabilisation complète, une pulvérisation finale adéquate de la fraction d'argile et une distribution complète de la chaux dans le sol sont essentielles (voire Figure II.22). Le mélange et la pulvérisation doivent se poursuivre jusqu'à ce que 100% des matériaux non pierreux passent au tamis de 1 pouce et qu'au moins 60% des matériaux non pierreux passent au tamis numéro 4.

S'il est certain que l'exigence de pulvérisation ci-dessus peut être satisfaite pendant le mélange préliminaire, les étapes de mélange et de mélange final peuvent être éliminées.

Figure II.22 : Mélange et pulvérisation. [22]. [29]

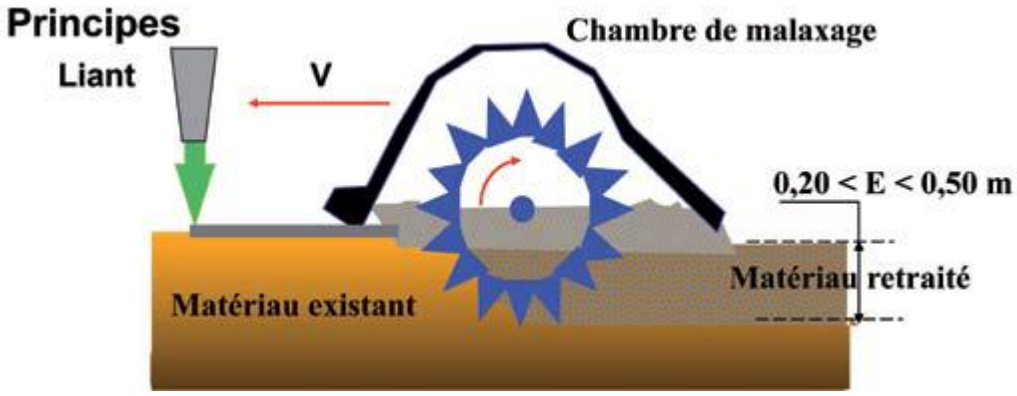


Figure II.23 : Schéma de fonctionnement d'un pulvérisateur. [28]

II.5.6 Compactage:

La compaction devrait commencer immédiatement après le mélange final. Si cela n'est pas possible, des retards allant jusqu'à quatre jours ne devraient pas poser de problème si le mélange est légèrement roulé et maintenu humide jusqu'à ce que le compactage puisse être effectué. Pour des retards plus longs, il peut être nécessaire d'incorporer une petite quantité de chaux supplémentaire dans le sol.

Équipement: Pour assurer un compactage adéquat, l'équipement doit être adapté à la profondeur de l'ascenseur. Le compactage peut être effectué en une seule opération à l'aide de rouleaux pneumatiques épais ou de rouleaux vibrants ou d'une combinaison de rouleaux de pieds de mouton et de rouleaux de pieds pneumatiques légers ou de rouleaux de compactage (voire Figure II.24). Typiquement, le compactage de la surface finale est terminé en utilisant un rouleau de roue en acier (Figure II.25). [25]

Figure II.24 : Rouleaux pieds de mouton Pieds [30]

Figure II.25 : Rouleau en acier et dameurs[26]

II.5.7 Durcissement final:

Avant de placer la couche de sous-couche suivante (ou couche de base), la sous-couche compactée (ou sous-couche) doit durcir jusqu'à ce que les camions à benne chargés puissent fonctionner sans rider la surface. Pendant ce temps, la surface du sol traité à la chaux doit être maintenue humide pour favoriser le gain de force. Ceci est appelé «durcissement» et peut être effectué de deux façons: (a) séchage humide, qui consiste à maintenir la surface humide (b) le durcissement de la membrane, qui consiste à sceller la couche compactée avec une émulsion bitume primaire, soit dans une ou plusieurs applications (voire Figure II.26). Un taux d'application typique est de 0,10 à 0,25 gallons. [25]

Figure II.26 : Emulsion de couche de base pour le durcissement

II.6 Conclusion:

Grâce aux résultats obtenus du développement des processus et des mécanismes d'amélioration et de traitement des sols, il est devenu possible de travailler et de construire des structures routières sur n'importe quel type de sol, quelles que soient ses caractéristiques et les problèmes qui les entourent. Ce procédé a également permis l'exploitation d'une gamme de matériaux (types de déchets et types de stabilisants), et a également contribué à la réduction du coût élevé qui devait se faire sans recourir au traitement des sols.

Il est aussi à travers la connaissance du processus d'amélioration du sol est devenu les détails, que nous pouvons travailler sur l'introduction de certains matériaux (déchets de céramique et le ciment), afin d'améliorer et d'améliorer les résultats et les déchets aussi l'utilisation de disponibles localement en abondance.

Chapitre III:

Méthodologies

III.1 Introduction :

Pour obtenir un bon résultat dans la stabilité de la route, on a étudié le sol traiter avec des ajouts :(déches de céramique ; ciment CEM / II .42.5 MPA). Est fait l'ajout les matériaux traité avec pourcentage volumique.

Il existe plusieurs des essais pour faire l'étude de stabilité de sol, parmi eux (essai CBR; essai Œnométriques ; essai perméabilité et essai Perméamétrie de Guelph**)**.

III.2 Matériaux utilisé :

III.2.1 Le sol étudié :

On choisit le sol de cette étude la route dans le zone de Texter région de Ain Taghrout Wilaya de bordj Bou Arreridj.

Figure III.1 : Zone de Texter [16]

Figure III.2 : Le sol étudié

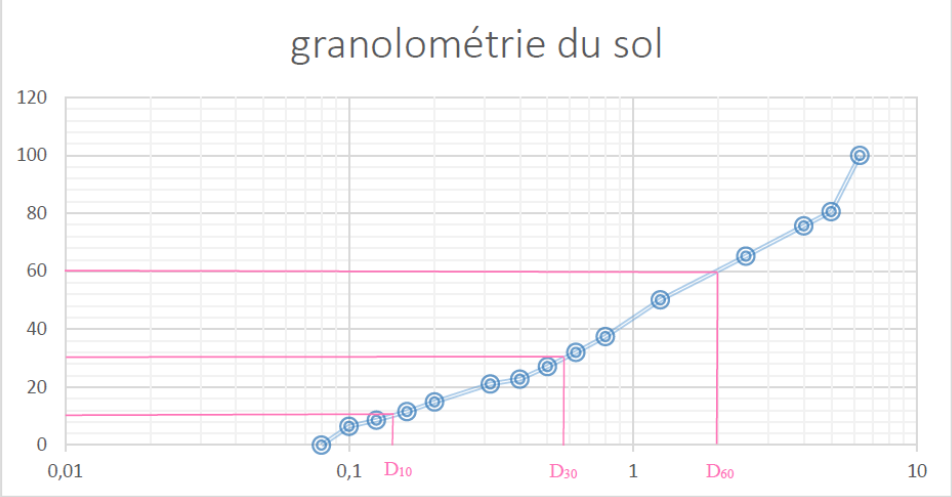


Figure III.3: La courbe granulométrique du sol.

Plus de 50 % des éléments > 0,08 mm ont un diamètre > 2 mm

Cc = 3,14 > 3, Céramique propre mal graduée.

Tableau III.1: Les limites et les indice tiré d'essai limite d'Atterberg (100% sol).

Limite de liquidité (W_L)	limite de plasticité (W_P)	Teneur en eau W(%)	Indice de plasticité (I_P)	Indice de consistance (I_C)
30.37	24.05	6.38	6.32	3.80

III.2.2 Déché de céramique :

Le déchet de céramique est concassé Manuellement ou par machine de broyage, elle passé le déchet broyé verre le tamis de 5 mm.

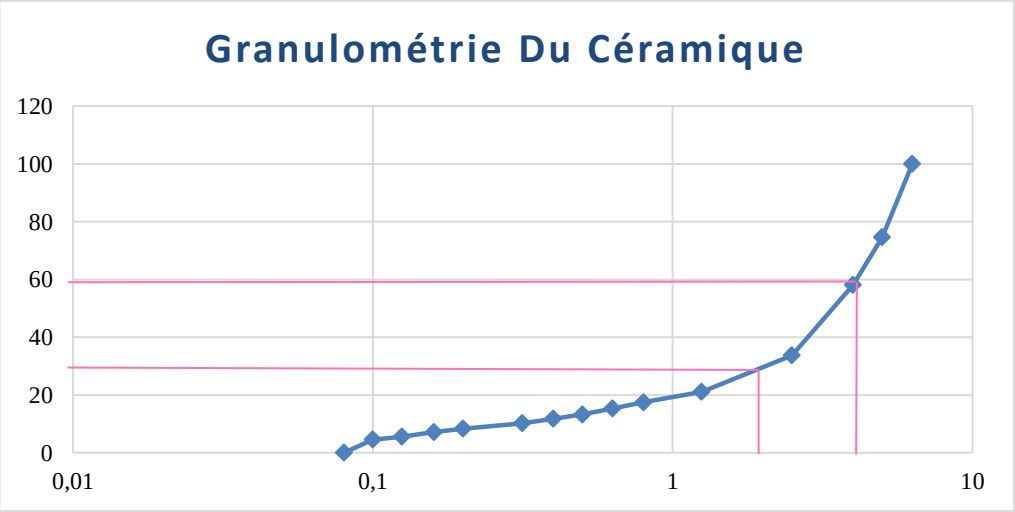


Figure III. 4 : Analyse granulométrique de dèches de céramique

Figure III.5 : Déchet de céramique [16]

III.2.2 Le ciment :

Le ciment portland est une liant hydraulique composé par clinker et gypse pour régulier la pris, le site de la fabrication de ciment portland c'est l'usine de AIN KEBIRA- la WILLAYA de Sétif. Le produit a comme identification CPJ-CEMII/A 42,5 MPa.

Figure III.6 : Ciment utilisé

III.3 Les essais :

III.3.1 Essais CBR (California Bearing Ratio) Norme NF P 94-078 :

III.3.1.1 Généralité :

Cet essai a été développé en 1929 par les ingénieurs **T.E Stanton et O.J. Porter** du département des routes de Californie. Il permet la classification d'un sol pour être utilisé comme sous-fondation et fondation dans la construction de routes. Pendant la deuxième guerre mondiale, le corps des ingénieurs des États-Unis l'ont également adopté pour la construction des aéroports.

III.3.1.2 Définition :

L'essai CBR est un essai qui caractérise la portance d'un sol du point de vue routier. L'échantillon de sol étudié est compacté dans un moule (moule CBR Ø = 15,1 cm, hauteur : 15,1 cm) après avoir été amené à une teneur en eau homogène et bien définie.

Il est ensuite poinçonné et on déduit de la pression nécessaire à ce poinçonnement (les modalités du poinçonnement sont normalisées) un indice qui caractérise la qualité routière du matériau dans les conditions de compacité et de teneur en eau de l'essai.

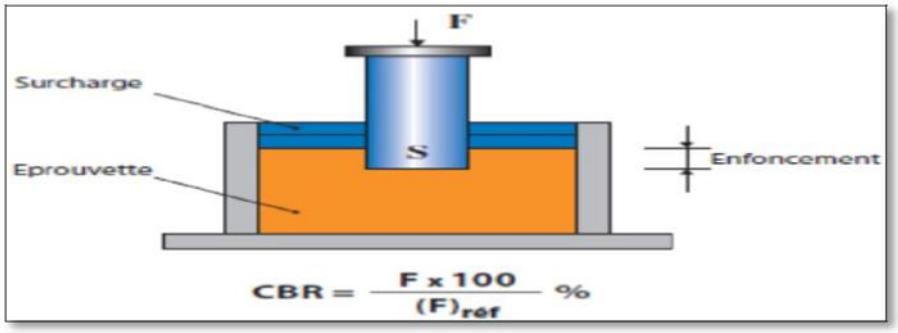


Figure III.7 : Schéma de principe de l'essai CBR.

III.3.1.3 But de l'essai :

L'essai CBR est un essai de portance (aptitude des matériaux à supporter les charges) des remblais et des couches de formes compactées des ouvrages routiers. Il s'agit de déterminer expérimentalement des indices portants(CBR) qui permettent :

- d'établir une classification des sols (GTR)

- d’évaluer la traficabilité des engins de terrassement
- déterminer l’épaisseur des chaussées (CBR augment ⇨ épaisseur diminue).

III.3.1.4 Appareillage nécessaire :

- moules standard CBR.
- Disque d’espacement de 151mm de diamètre et 25,5mm d’épaisseur.
- Compacteur électrique. (NF P094 – 093).
- Des disques de surcharge annulaire en plomb de 2,265kg en deux parties de diamètre extérieur de 150mm de diamètre inférieur de 27mm.
- 1 appareil de mesure de gonflement comprenant un trépied pouvant s’adapter sur la face supérieur de moule comparateur à 0,01mm et de 25mm de course ; un disque plat et perforé de diamètre légèrement inférieur à celui du moule et muni en son centre une tige à touche réglable.
- 1 presse hydraulique de 60kn pouvant assurer une vitesse de poinçonnement de 1,27 mm / minute.
- Des bacs d’eau, chan ber humide, balance, étuve a 105C.
- Pelle à main, truelles, mains métalliques, pinceau.
- des disques de papier filtre correspondant aux côtés moule couteau maillet, burin, marteau, plane à araser.
- Couteau maillet, burin, marteau, plane à araser.

Figure III.8 : Appareillage – essai CBR.

III.3.1.5 Principe de l'essai :

Le principe général de l'essai consiste à mesurer les forces a appliquée sur un poinçon cylindrique pour le faire pénétrer à vitesse constante (1,27 mm / min) dans une éprouvette de matériel.

-Deux types d'indices CBR sont à distingue :

A / CBR a l'état Humide (3, 14 ou 28 jours selon l'application) :

Figure III.9 : CBR du sol traité en liant hydraulique et déchet de cramique au temps de cure jours (3j ; 14j ; 28j).

B / CBR états immerger :

Après avoir préparé l'échantillon CBR avec du ciment et de la céramique, laisser 24 heures, puis plonger dans l'eau pendant 3, 14 et 28 jours.

Figure III.10 : CBR du sol traité en liant hydraulique et déches de cramique a l'Etat immergée (à la cure)

III.3.1.6 Mode opératoire :

- Peser le moule de CBR vide.
- Prendre 5,5Kg de sol sec passé au tamis 5 mm
- Prendre 5% ; 10% ; 15% ; de cramique passée au tamis 5mm.
- Prendre 4% ; 2% de ciment.
- Mette chaque ensemble de l'échantillon de sol, avec le pourcentage de cramique et ciment nécessaire dans un plat métallique.
- Mélangé manuellement les composent :(sol + cramique +ciment).
- Ajouté la teneur en eau optimale W opté de l'essai de Proctor.
- Malaxé manuellement le mélange pendant 8 à 15 min.
- Placer le moule dans le compacteur électrique, et introduit la première couche de l'échantillon.
- La mémé manier avec le couche 2 et 3.
- Surfacé les moules CBR, avec un règle a rasé.
- Introduit les moules de CBR a l'état immerger dans un réservoir d'eau (3j ; 14j ; 28j).
- Placer un disque de papier filtre dans la partie supérieure de moule CBR à l'état humide, est emballé les moules avec un sac plastique, est introduit dans un chambre humide à (3j ; 14j ; 28j).
- Placer les moules CBR dans la machine et lire la force et déplacement

Figure III.11 : Déroulement de l'essai –CBR.

III.3.1.8 L'indice CBR (I.CBR) :

Exprime en % le rapport entre les pressions produisant dans le même temps un enfoncement donné dans le sol étudié d'une part et dans un matériau type d'autre part. Par définition cet indice est pris égal à la plus grande des deux valeurs suivantes :

$$\mathbf{I1} = \frac{\textbf{effort de pénétration a 2,5 (KN)} \times \mathbf{100}}{13.35(KN)}$$

$$\mathbf{I2} = \frac{\textbf{effort de pénétration a 5 (KN)} \times \mathbf{100}}{19.93(KN)}$$

I.CBR = max (I.CBR 2.5; I.CBR 5)

Tableau III.2 : La classe de portance.

Classes de portance	CBR [%]
S_0 portance très faible	CBR < 3
S_1 portance faible	3 < CBR < 6
S_2 portance moyenne	6 <CBR<12
S_3 portance élevée	12< CBR < 25
S_4 portance très élevée	25 < CBR

III.3.2 Essai perméabilité (BS-1377-1999):

III.3.2.1 But de l'essai :

L'essai a pour but de déterminer en laboratoire, le coefficient de perméabilité à l'eau, des sols saturés. Ce coefficient encore appelé coefficient de Darcy, peut se déterminer suivant deux méthodes : à charge constante ou à charge variable décroissante.

III.3.2.2 Définition :

La perméabilité du sol à l'eau est affectée par la forme des grains, leur grosseur, la structure du sol, la porosité ou l'indice des vides, le degré de saturation, le gradient

hydraulique, le diamètre effectif des pores qui influence la hauteur d'ascension capillaire, le cheminement des vides à travers le sol, la température et les caractéristiques propres au fluide telles que sa densité et sa viscosité.

- Le coefficient k de la loi de Darcy, appelé « coefficient de perméabilité », a la dimension d'une vitesse car le gradient hydraulique i est sans dimension (rapport de deux longueurs) et la vitesse d'écoulement de l'eau a elle-même la dimension d'une vitesse. Ils expriment en général en m/s.

Le coefficient de perméabilité (appelé aussi « conductivité hydraulique ») varie largement avec la nature et l'état du sol. Il est donné généralement en puissances de 10 (10^Nou 2×10^N ou3.5×10^N, etc.). Ses valeurs vont de 1 m/s pour les graviers très perméables à 10–10 m/s pour les argiles très peu perméables.

- Il existe deux essais propres à la mesure du coefficient de perméabilité : perméabilité à charge constante et perméabilité à charge variable.

- **Perméabilité à charge variable :**

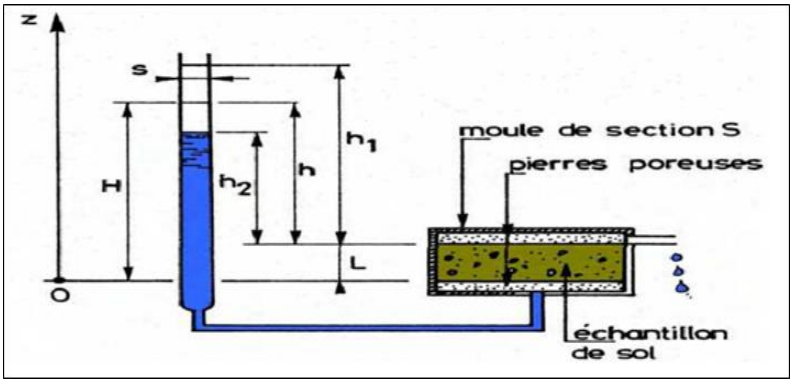


Figure III.12 : Perméabilité a charge variable

_ Le coefficient de perméabilité est donné par la relation :

$$k = \frac{s}{S} \times \frac{L}{t} \times \ln \frac{h1}{h2}$$

- **Perméabilité à charge constante :**

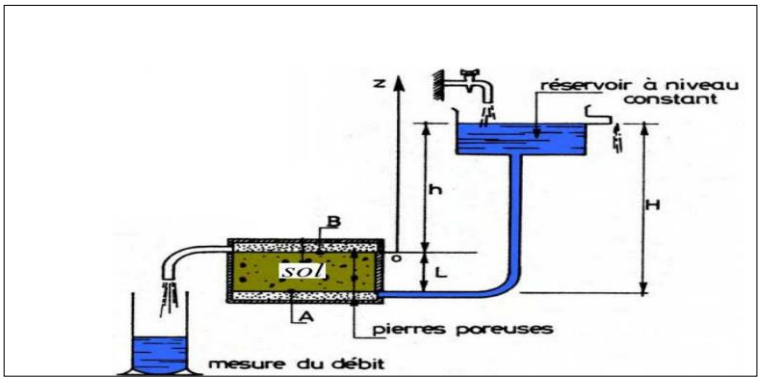


Figure III.13 : Perméabilité charge constante

_ Le coefficient de perméabilité est donné par la relation :

$$k = \frac{q}{S.i} = \frac{q.L}{S.h}$$

III.3.2.3 Principe de l'essai :

L'essai consiste à soumettre au laboratoire, des éprouvettes de sols à un écoulement d'eau. L'échantillon de sol est soumis à une charge hydraulique connue, constante ou variable. On mesure alors la différence de hauteur d'eau qui traverse l'échantillon pendant un temps donné.

Les résultats obtenus servent à calculer le coefficient de perméabilité

III.3.2.4 Matériel utilisé :

- Une perméabilité de compactage avec accessoires.
- Un support de perméabilité avec accessoires.
- Un panneau de tubes piézométriques à différents diamètres (3, 4 et 6 mm).
- Un réservoir d'eau.
- Moule CBR (éventuellement Proctor).
- Prés hydraulique de compression
- Règle à araser ; marteau.
- Tamis 5 mm
- Balance portée 20 kg, précision ± 5 g,
- Etuve 105°C ± 5° C.

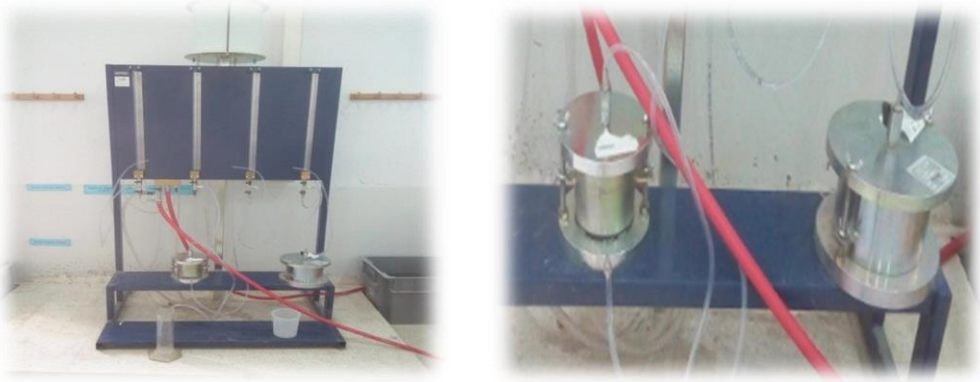


Figure III.14 : L'appareil de perméabilité.

III.3.2.5 Mode opératoire :

- **Préparations des échantillons de sol sec :**

1. Peser 3 kg de sol sec tamisé a 5 mm.
2. Ajouter le pourcentage optimum d'eau 12.96% (389ml);
3. Malaxer manuellement le mélange pendant 5 à 10 minutes.
4. Remplir le mélange dan des moules de Perméabilité (diamètre = 10.1 cm; L = 10.2 cm).
5. On applique une charge de 90KN (reconstitution des échantillons par la méthode statique) a l'aide de la presse.
6. Réalisation de l'essai de perméabilité a charge variable.

Figure III.15 : Réalisation de l'essai de perméabilité

Tableau III.3 : Classification de type de sol par rapport le coefficient de perméabilité

Nature	Ordre de grandeur de k (m/s)	Degré de perméabilité	Méthode de mesure en laboratoire
Graviers moyen à gros	10^{-1} à 10^{-3}	Très élevé	Perméabilité à charge constante
Petits graviers, sable	10^{-3} à 10^{-5}	Assez élevé	
Sable très fin, sable limoneux	10^{-5} à 10^{-7}	Faible	
Limon compact, argile silteuse	10^{-7} à 10^{-9}	Très faible	Perméabilité à charge variable
Argile franche	10^{-9} à 10^{-12}	Pratiquement imperméable	

III.3.3 Essai œdométrique (NF P 94-090-1) :

III.3.3.1 But de l'essai :

La manipulation a pour but de déterminer les caractéristiques de compressibilité d'un sol qui permettent d'estimer l'affaissement d'un massif de sol, par exemple sous une route.

A l'aide de cette manipulation on peut :

- Etablir la courbe de consolidation et la courbe de compressibilité de sol étudié.
- Déduire le coefficient de consolidation (Cv) et L'indice de compressibilité (Cc).

Figure III.16 L'odomètre

III.3.3.2 Principe de l'essai :

Le sol est placé dans une enveloppe rigide, on exerce sur sa partie supérieure une pression variable à l'aide d'un piston et on mesure les affaissements observés après stabilisation. On détermine ainsi la relation entre les contraintes effective set les déformations verticales.

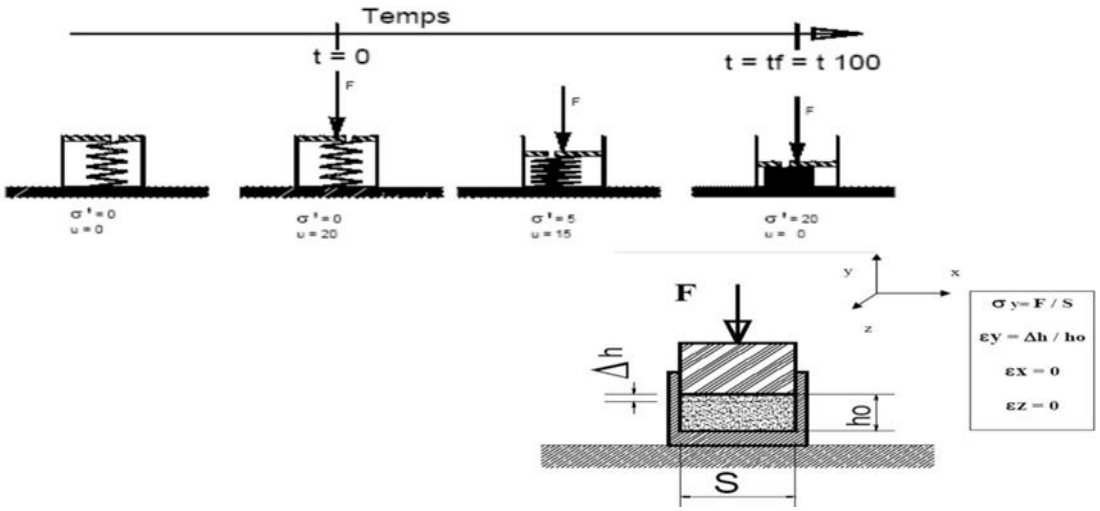


Figure III.17 : Principe de l'essai œdométrique

III.3.3.3 Appareillage :

Les odomètres utiliser sont des odomètres a chargement par l'avant, ils sont composés principalement de :

1. moule œdométrique métallique rigide de section cylindrique.
2. Un dispositif de chargement ou bâti de chargement, il doit appliquer les charges suivant l'axe du piston.
3. Des jeux de masse varient de 1 Kg à 10Kg.
4. Un comparateur.

Appareillage d'usage courant :

1. Une trousse coupante pour tailler l'échantillon.
2. Une balance électronique de précision pour mesure les teneurs en eau.
3. Une étuve.
4. Un chronomètre.
5. Du papier filtre pour protégé les pierres poreuses.
6. Machine d'extraction.

Figure III.18 : Composent de cellule œdométrique

III.3.3.4 Mode opératoire :

A / Préparation de l'échantillon :

- Prendre un carotte odomètre de (5cm de diamètre ; 2 cm de épaisseur), dans le moule de l'échantillon de sol sec de l'essai perméabilité, on utilise un machine d'extraction pour obtenue de carotte de sol.
- La même méthode avec les sols traité (sol+5%cramique ; sol+10%cramique ; sol+15%cramique …..).
- Araser les deux faces, supérieur et inferieur, de carotte odomètre.
- Taré les carotte odomètres par balance avant et après l'essai.

B / Réalisation de l'essai de l'odomètre :

- Placer l'échantillon de sol et son moule dans le corps de la cellule.
- Poser le corps de la cellule sur la base sans oublier le joint et le papier filtré sur la pierre poreuse.
- Serrer les trois vis de fixation.
- Mettre en place le piston sans oublier le papier filtré entre l'échantillon et la pierre poreuse du piston.
- Placer la cellule sur le bâti de chargement.
- Disposer les treillis de charge ainsi que le comparateur, sans oublier de remettre à zéro ce dernier.
- Après avoir mis le moule sur le bâti de consolidation, on sature l'éprouvette en remplissant la cellule de consolidation avec de l'eau distillé.

- On place les poids (1Kg ; 2Kg ; 4Kg ; 8Kg) sur le plateau à chaque 24h, est change le poids.
- Lire la lecture de comparateur de tassement en (mm) de l'échantillon de sol par rapport le temps.

Tableau III.4 : Temps de résultat d'odomètre

T	0 (s)	10 (s)	20 (s)	30 (s)	40 (s)	50 (s)	1 min	2 min	4 Min	15 min	30 min	1 (h)	2 (h)	4 (h)	24 (h)

III.3.3.4 Comment calculer Cv et Cc ?

Cc :

Tableau III.5 : Classification de sol par Cc :

$$Cc = \frac{-\Delta e}{\Delta \log \sigma}$$

$C_c < 0,02$	Sol incompressible	Sable
$0,02 < C_c < 0,05$	Sol très peu compressible	
$0,05 < C_c < 0,1$	Sol peu compressible	
$0,1 < C_c < 0,2$	Sol moyennement compressible	Argile raide (kaolinite)
$0,2 < C_c < 0,3$	Sol assez fortement compressible	Argile moyenne
$0,3 < C_c < 0,4$	Sol très compressible	
$C_c > 0,5$	Sol extrêmement compressible	Argile molle (montmorillonite)

CV :

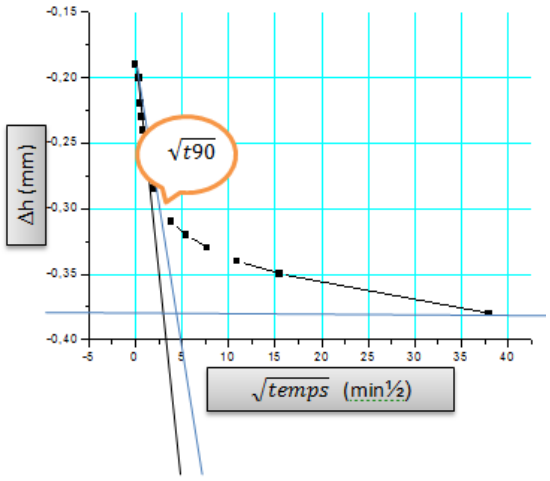


Figure III.19 : Exemple de calcule de t90

$$\mathbf{CV} = \frac{\mathbf{0.848}\ .\boldsymbol{H}^2}{\mathbf{4}.\boldsymbol{t}\mathbf{90}}$$

III.3.4 Perméamétrie de Guelph (Reynolds 1985): [34]

III.3.4.1 Définition :

Le perméamétrie de Guelph est un instrument facile à utiliser pour mesurer rapidement et précisément la conductivité hydraulique in situ. Une évaluation précise de la conductivité hydraulique du sol, de la sportivité du sol et du potentiel de flux de matrice peut être faite dans tous les types de sols. L'équipement peut être transporté, assemblé et utilisé facilement par une personne. Les mesures peuvent être effectuées en 1/2 à 2 heures, selon le type de sol, et nécessitent seulement environ 2,5 litres d'eau.

Les mesures peuvent être effectuées dans la plage de 15 à 80 cm sous la surface du sol. Le perméamétrie Guelph se présente sous la forme d'un kit complet composé d'un perméamétrie, d'un trépied, d'une tarière, d'outils de préparation et de nettoyage, d'un réservoir d'eau pliable et d'une pompe manuelle sous vide. Des accessoires sont disponibles pour étendre la capacité de mesure du perméamétrie. Les accessoires de profondeur augmentent la profondeur de fonctionnement de 80 cm.

Figure III.20 : L'appareil de perméamétrie de Guelph

III.3.4.2 But de l'essai :

Le but de cette essai ci la détermination de coefficient de perméabilité sur cite Avec l'appareil de perméamétrie de Guelph.

III.3.4.3 Principe de l'essai :

Le perméamétrie de Guelph est un perméamétrie à tête constante dans le trou, La méthode consiste à mesurer le taux de recharge de l'eau en régime permanent dans un sol non saturé à partir d'un puits cylindrique, dans lequel une profondeur d'eau constante est maintenue.

Un niveau de tête constant dans le trou du puits est établi et maintenu au niveau du fond du tube d'air en régulant la position du fond du tube d'air, qui est situé au centre du perméamétrie. Lorsque le niveau d'eau dans le réservoir diminue, un vide est créé dans l'espace aérien au-dessus de l'eau. Le vide ne peut être soulagé que lorsque l'air de la pression de l'atmosphère ambiante, qui pénètre dans la partie supérieure du tube d'air, sort de la buse d'entrée d'air et s'élève vers le haut du réservoir. Chaque fois que le niveau d'eau dans le puits commence à descendre au-dessous de la buse d'entrée d'air, des bulles d'air émergent de la pointe et montent dans l'espace d'air du réservoir. Le vide est alors partiellement soulagé et l'eau du réservoir réapprovisionne l'eau dans le puits.

III.3.4.4 Matériel utilisé :

Figure III.21 : Composantes de perméamétrie de Guelph

Composantes de perméamétrie de Guelph :

1. Récipient d'eau et tube
2. Kit de support
3. Vis de calibrage
4. Foreuse de sol
5. Douille de trépied de base de trépied
6. Pinceau de préparation de puits
7. Assemblée de réservoir
8. Échelle de tête de puits et tube d'air supérieur
9. Pompe à main de test sous vide
10. Tube de support et tube d'air inférieur
11. Assemblée de poignée de vis sans fin
12. Jambes de trépied
13. Housse de transport

III.3.4.5 Mode opératoire :

- Nous creusons un puits (80cm profondeur ; 6cm rayon) Par foreuse de sol.

Figure III.22 : Forage de puits

- Nous sortons le sol du puits par vis de calibrage.
- Nettoyé le puits par pinceau de préparation de puits.
- Montage l'appareil de perméamétrie de Guelph.

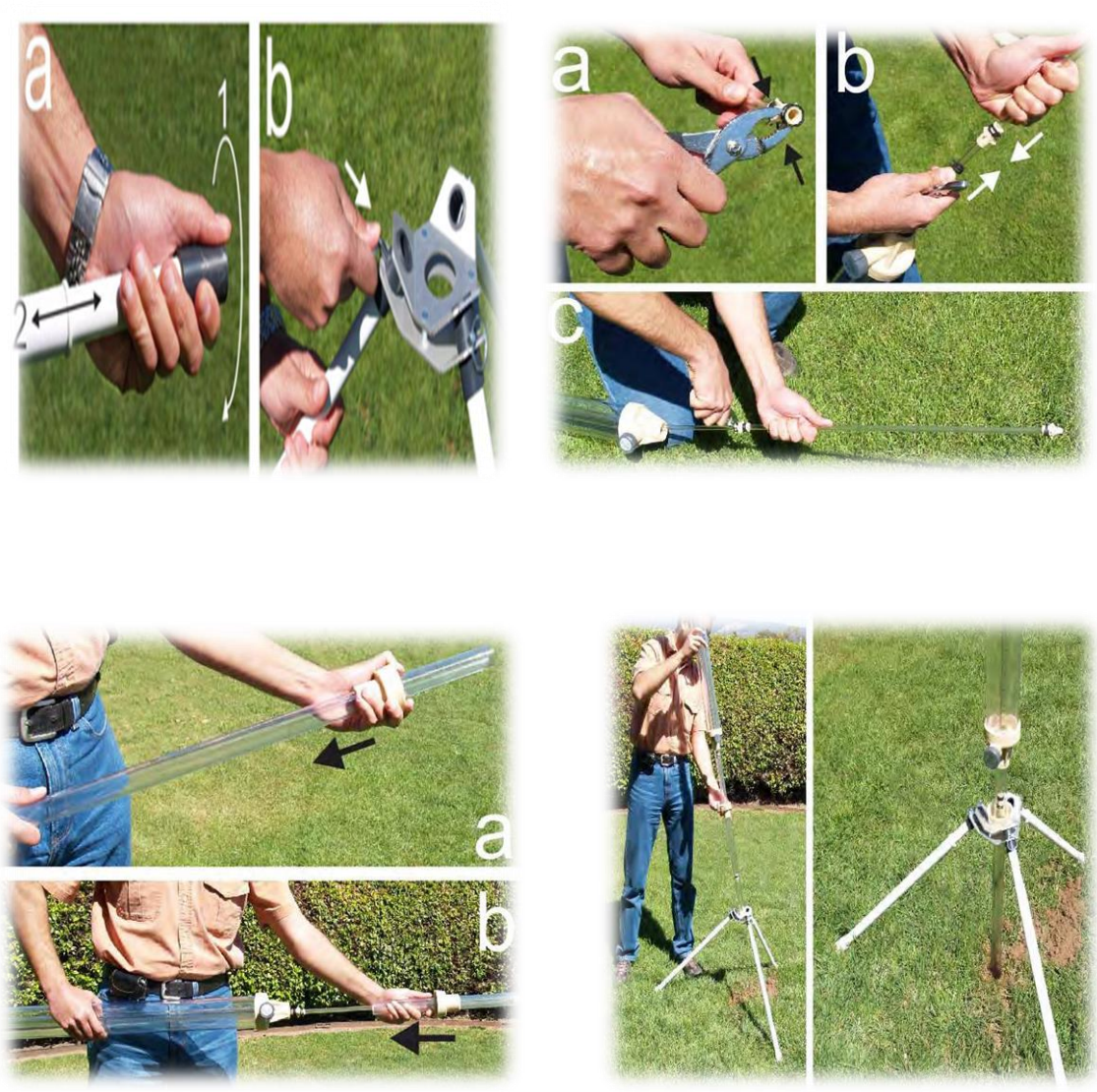
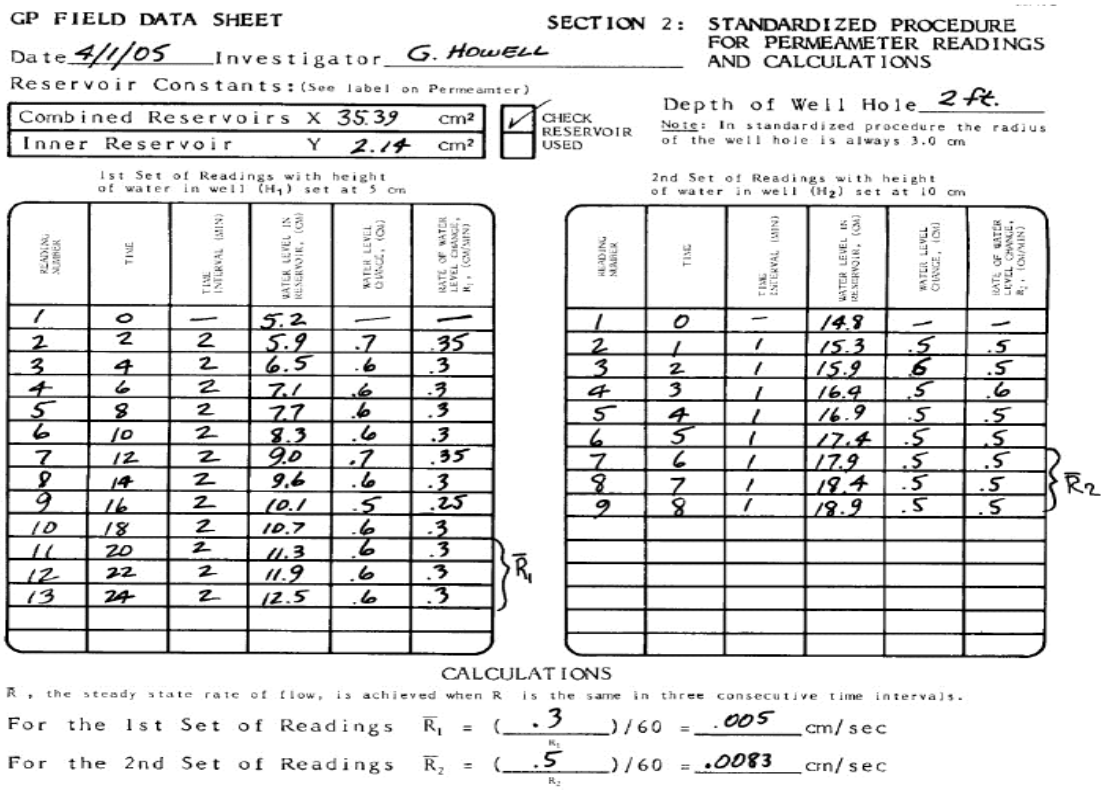


Figure III.23 : Montage de l'appareil de perméamétre de Guelph

- Place l'appareil de perméamétrie de Guelph dans le puits.
- Enlève le bouchon de réservoir gradué et remplir d'eau.
- Supprimé le port d'aspiration et bouchon de réservoir graduer, et lire H on cm.
- Elever le tube d'entré d'aire 5cm, et ouvrir le rembiné de réservoir, et lire après chaque 2min la hauteur diminué.
- Répéter l'essai avec 10cm, et lire après chaque 2 min la hauteur diminué.

III.3.3.4 : Exemple de calcul (Formule de calcul) :



GP FIELD DATA SHEET — SECTION 2: STANDARDIZED PROCEDURE FOR PERMEAMETER READINGS AND CALCULATIONS

Date 4/1/05 Investigator G. HOWELL

Reservoir Constants: (See label on Permeamter)

Combined Reservoirs X	35.39	cm²
Inner Reservoir Y	2.14	cm²

CHECK RESERVOIR USED

Depth of Well Hole 2 ft.

Note: In standardized procedure the radius of the well hole is always 3.0 cm

1st Set of Readings with height of water in well (H_1) set at 5 cm

READING NUMBER	TIME	TIME INTERVAL (MIN)	WATER LEVEL IN RESERVOIR, (CM)	WATER LEVEL CHANGE, (CM)	RATE OF WATER LEVEL CHANGE, R_1, (CM/MIN)
1	0	—	5.2	—	—
2	2	2	5.9	.7	.35
3	4	2	6.5	.6	.3
4	6	2	7.1	.6	.3
5	8	2	7.7	.6	.3
6	10	2	8.3	.6	.3
7	12	2	9.0	.7	.35
8	14	2	9.6	.6	.3
9	16	2	10.1	.5	.25
10	18	2	10.7	.6	.3
11	20	2	11.3	.6	.3
12	22	2	11.9	.6	.3
13	24	2	12.5	.6	.3

$\bar{R}_1$

2nd Set of Readings with height of water in well (H_2) set at 10 cm

READING NUMBER	TIME	TIME INTERVAL (MIN)	WATER LEVEL IN RESERVOIR, (CM)	WATER LEVEL CHANGE, (CM)	RATE OF WATER LEVEL CHANGE, R_2, (CM/MIN)
1	0	—	14.8	—	—
2	1	1	15.3	.5	.5
3	2	1	15.9	.6	.5
4	3	1	16.4	.5	.6
5	4	1	16.9	.5	.5
6	5	1	17.4	.5	.5
7	6	1	17.9	.5	.5
8	7	1	18.4	.5	.5
9	8	1	18.9	.5	.5

$\bar{R}_2$

CALCULATIONS

$\bar{R}$, the steady state rate of flow, is achieved when R is the same in three consecutive time intervals.

For the 1st Set of Readings $\bar{R}_1 = (\underset{\bar{R}_1}{.3})/60 = .005$ cm/sec

For the 2nd Set of Readings $\bar{R}_2 = (\underset{\bar{R}_2}{.5})/60 = .0083$ cm/sec

Figure III.24 : Exemple de calcul

Kfx = [(0.0041) (x) ($\bar{\bar{R}}$2)] -[(0.0054) (x) ($\bar{\bar{R}}$1)]

Φɱ = [(0.0572) (x) ($\bar{\bar{R}}$1)] -[(0.0237) (x) ($\bar{\bar{R}}$2)]

α = Kfx / Φɱ

- **$\bar{R}$:** le débit constant de l'écoulement.
- **$\bar{R}_1$**: pour le 1er jeu de lecture.
- **$\bar{\bar{R}}_2$:** pour le 2éme jeu de lecture.
- **K_{fx}**: conductivité hydraulique saturée sur le terrain.
- **$\Phi_ɱ$:** potentiel de flux de matrice.
- **α:** paramètre alpha.

III.3.3.5 : classification de sol par perméabilité de Guelph :

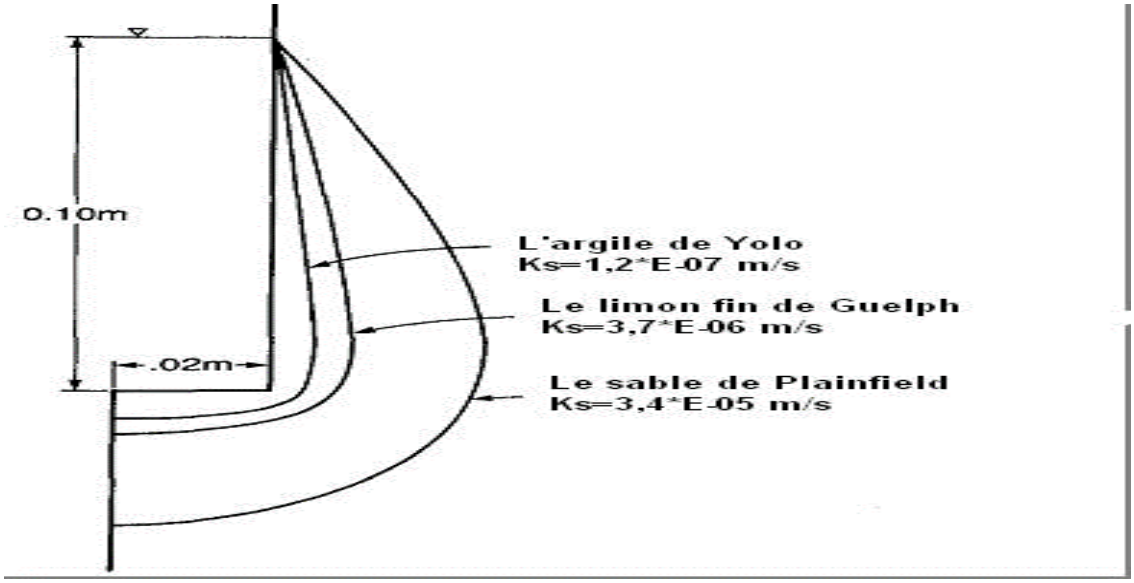


Figure III.25 : Classification de sol par perméabilité de Guelph [33]

III.4 Conclusion :

L'étude géotechnique du sol vise à connaître ses propriétés physiques et mécaniques, à déterminer sa résistance et ça, per et sa capacité portante, mettant ainsi de prédire tous les problèmes affectant le sol et son traitement.

Et tout cela afin d'établir des projets au niveau de ces sols conformément aux normes internationales.

Comme nous l'avons fait à travers notre étude universitaire qui était au niveau du sol TXTER. Ce que nous avons traité avec des déchets de céramique et de ciment. Qui sont menées dans le laboratoire de génie civil, toutes les expériences sont décrites dans ce chapitre.

Chapitre IV:

Résulta et discutions

IV.1. Introduction :

Ce chapitre est consacré à présenter l'ensemble des résultats des essais effectués sur l'échantillon de sol prélevé de la zone de TIXTER qui a été traité avec les différents pourcentages de liant hydraulique et de déchet de céramique. Les essais sont agencés comme suit : (essai de CBR; essai œdométriques ; essai de perméabilité et essai perméabilité sure site). Ces résultats sont représentés sous forme de tableaux et de figures.

IV.2. Essais de CBR (California Bearing Ratio) :

Tableau IV.1 : Les caractéristiques des échantillons étudié

Semple	$\gamma_{d\,max}$ (g /cm3)	ω_{OPM} (%)
Naturel sol	1.94	12.96
5 % céramique	1.95	11.15
10 % céramique	1.99	9.94
15 % céramique	1.95	11.49
5 % céramique + 4 % Ciment	1.97	12.49
10 % céramique + 4 % Ciment	1.98	11.35
15 % céramique + 4 % Ciment	1.96	11.95
5 % céramique + 2 % Ciment	1.97	12.94
10 % céramique + 2 % Ciment	1.98	11.35

Table IV.2 : Résultat de CBR de sol traité avec (10% du déchet de céramique + 4% ciment) en fonction du temps de la cure.

Déplacement (mm)	**Force (KN)**					
	3 jours		14jours		28 jours	
	Humide	**Immergé**	**Humide**	**Immergé**	**Humide**	**Immergé**
0	*0*	0	0	0	0	0
0.25	*1*	1	17	5	23	22
0.5	*3*	4	34	30	80	65
0.75	*5*	5	54	62	86	85
1	*7*	9	72	82	94	92
1.25	*10*	13	88	94	96	95
1.5	*12*	19	100	101	102	96
1.75	*15*	24	107	105	105	97
2	*17*	31	117	109	109	98
2.25	*20*	39	123	112	113	99
2.5	***22***	**47**	**127**	**114**	**116**	**100**
2.75	*24*	55	132	115	120	101
3	*26*	63	135	118	122	102
3.25	*29*	69	139	120	125	103
3.5	*31*	73	142	122	127	104
3.75	*32*	77	145	124	130	105
4	*35*	80	147	126	134	106
4.25	*36*	81	150	128	135	107
4.5	*40*	82	153	130	137	107
4.75	*41*	84	155	132	140	108
5	***43***	**86**	**157**	**133**	**143**	**109**
5.25	*45*	87	159	135	144	111
5.5	*47*	89	161	137	146	112
5.75	*50*	90.5	162	139	147	114
6	*52*	92	165	141	148	115
6.25	*60*	94	166	143	150	116
6.5	*65*	95	167	145	151	117
6.75	*69*	97	169	146	152	118
7	*71*	98	171	148	153	120
7.25	*73*	100	172	149	154	121
7.5	*75*	102	174	151	155	122
I1	39.919	85.282	230.445	206.856	210.485	181.453
I2	52.264	104.513	190.826	161.655	173.809	132.484

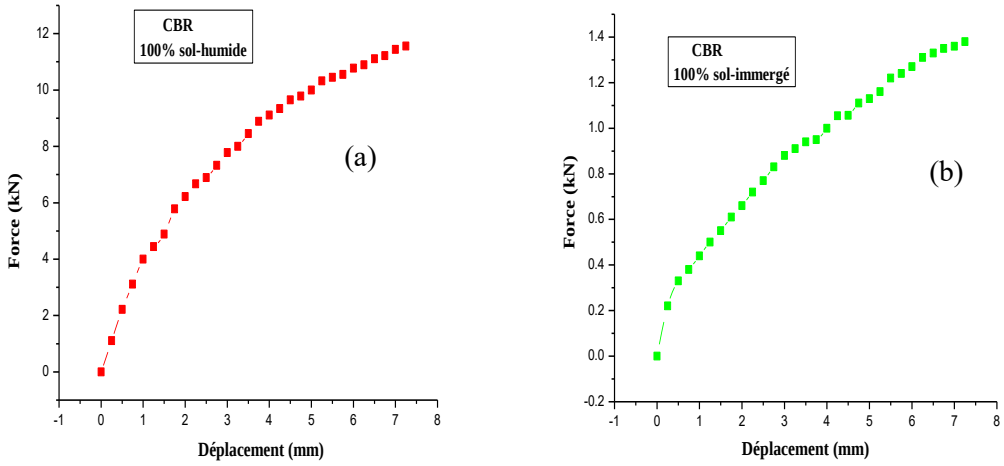


Figure IV.1 : La force en fonction de déplacement (CBR 100% sol).

D'après les figures IV.1 (a) et (b), nous pouvons voir que le sol support la force est très faible pour l'état immergé et moyenne pour l'état humide, ce qui peut être ce type de sol a un problème avec une charge pour les deux conditions. Besoin d'étudier pour analyser ce problème.

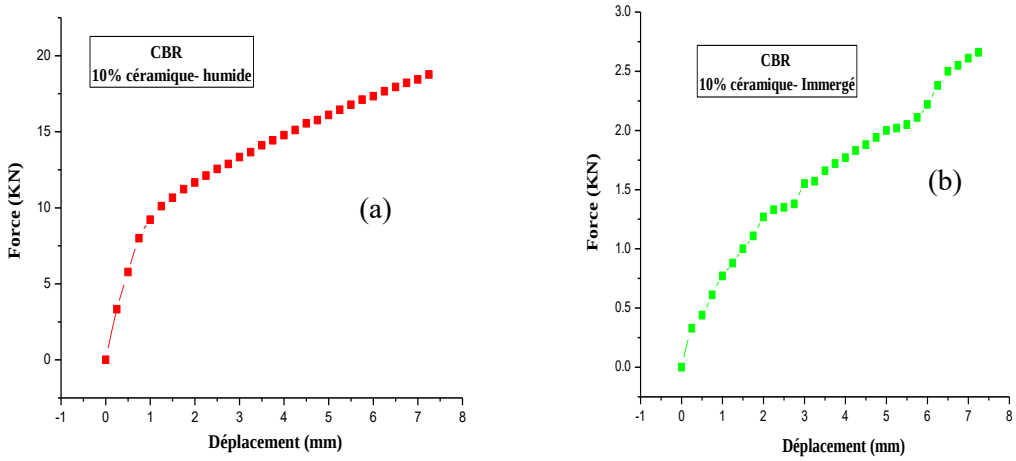


Figure IV.2 : La force en fonction de déplacement (CBR sol + 10% déchet de céramique).

A partir de la figure 4.2 (a) et (b), nous pouvons voir que la force du sol traité avec 10% de céramique commence à augmenter pour un état humide et une peut augmentation pour l'état immergé, ce qui permet d'observer l'effet des dèches de céramique sur le sol naturel.

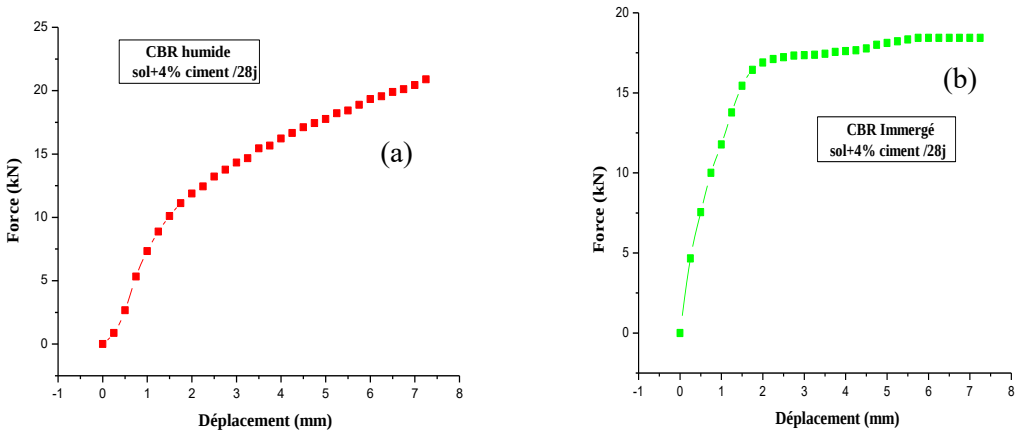


Figure IV.3 : La force en fonction de déplacement (CBR sol+ 4% ciment).

A partir de la Fig. 4.3 (a) et (b) nous pouvons voir la force du sol traité avec 4% de ciment augmenter la force pour les deux conditions humide et immergée, qui peut observer l'effet du ciment sur le sol, en liant les particules de sol et en réduisant les vides

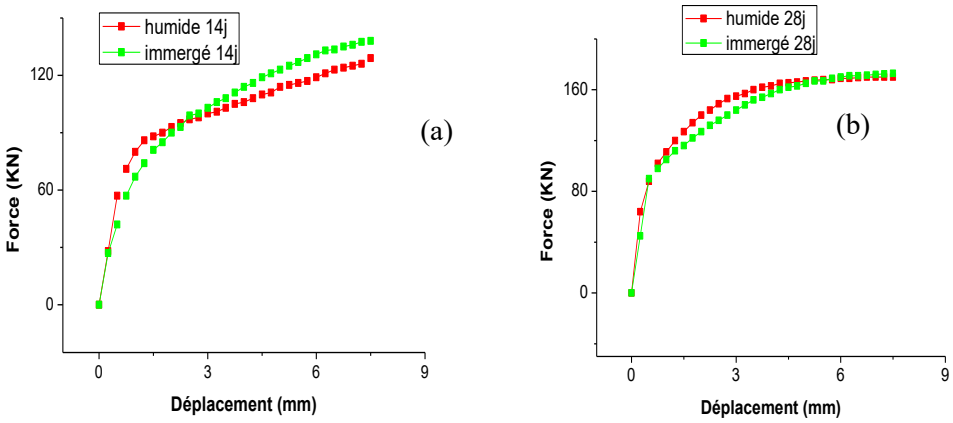


Figure IV.4 : La force en fonction de déplacement (sol + 4% ciment +5% dèches de céramique).

D'après la Figure 4. (a) et (b), nous pouvons voir la force du sol traité avec 4% de ciment et 5% de dèches de céramique augmenter d'environ 6 fois pendant 14 jours de durcissement et 8 fois à 28 jours. Ce résultat est meilleur que celui obtenu avec un sol traité avec des dèches de céramique et du ciment uniquement.

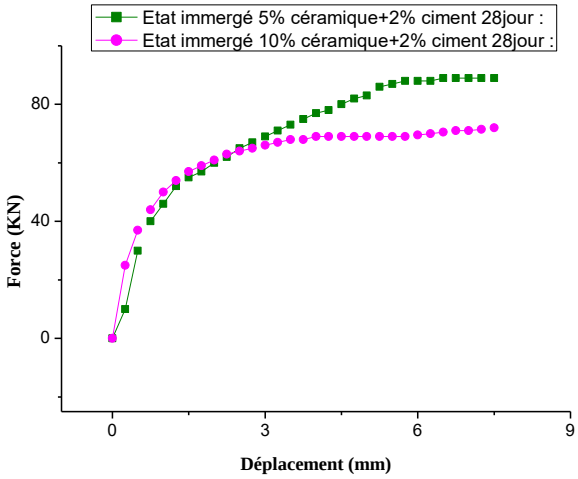


Figure IV.5 : La force en fonction de déplacement (sol +2% ciment +5% et 10% déchets de céramique).

La Figure IV.5 montre la force du sol traité avec 2% de ciment et 5% de céramique recyclée et 2% de ciment et 10% de céramique recyclée à 28 jours pour les deux conditions (humide et immergée) environ 4 fois pour le premier mélange et 3 fois pour le deuxième mélange. Qui peut conclure en utilisant 2% de ciment pour la stabilisation peut efficacité économique.

Tableau IV.3 : Résultat essai CBR (sol + 5% du déchet de céramique + 4% ciment).

Déchet (%) par temps de cure	CBR (%)-humide	CBR (%)-Immergé
5% Céramique + 4%ciment 3j	108.897	128.203
5% Céramique + 4%ciment 14j	176.009	179.638
5% Céramique + 4%ciment 28j	263.104	246.776

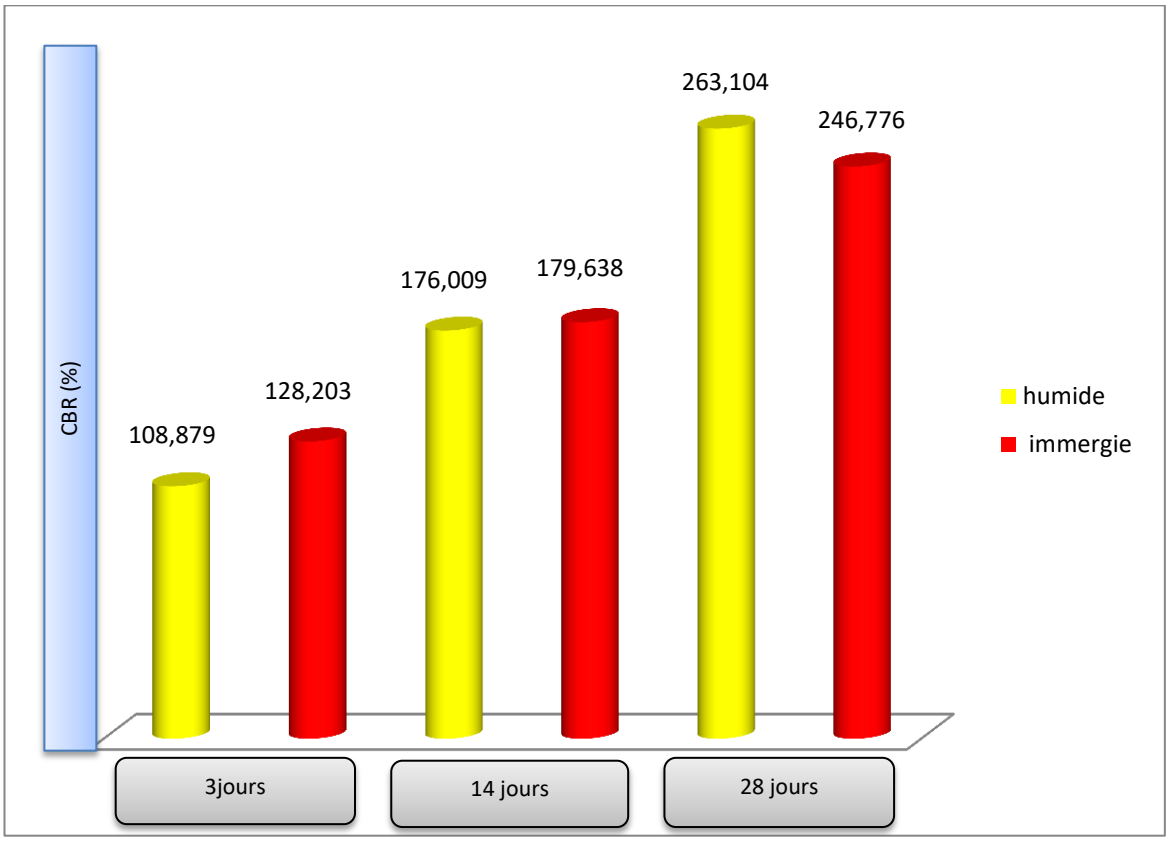


Figure IV.6 : L'effet de (5% du déchet de céramique + 4% ciment) en fonction du temps on CBR.

Figure IV.6 montre que le mélange de 5% de dèches de céramique et de 4% de ciment dans le sol avec un temps de durcissement a donné une augmentation de CBR d'environ 145% pour une condition humide de 3 jours à 28 jours. Qui peut également voir une petite variation de CBR entre 3 et 14 jours, l'augmentation était d'environ 18%. En outre, l'écart élevé de CBR entre 14 et 28 jours de durcissement, que l'hydratation de ciment achevé.

Pour l'état immergé, l'augmentation de CBR était d'environ 92% quand le temps de durcissement augmente de 3 jours à 28 jours. Aussi peut observer l'augmentation de CBR environ 39% pour le temps de guérison entre 14 et 28 jours. Les résultats pour l'état immergé semblent plus bas que l'état humide, peut-être le mélange 100% saturé un problème d'hydratation de ciment retard.

Tableau IV.4 : Résultat essai CBR (sol + 10% du déchet de céramique + 4% ciment).

Ajout (%)	CBR (%)-Humide	CBR (%)-Immergé
10% Céramique + 4%ciment 3j	108.897	128.203
10% Céramique + 4%ciment 14j	176.009	179.638
10% Céramique + 4%ciment 28j	263.104	246.776

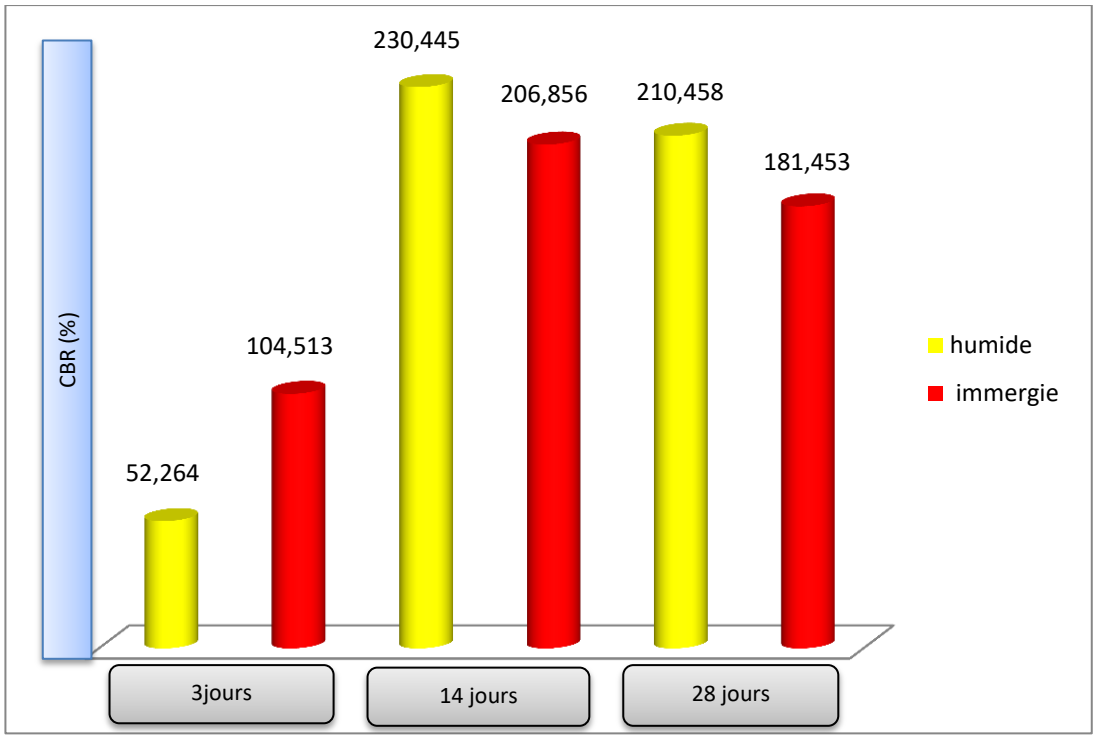


Figure IV.7 : L'effet de 10% du déchet de céramique + 4% ciment) on CBR en fonction du temps.

La Figure IV.7 montre que le mélange de 10% de dèches de céramique et de 4% de ciment dans le sol avec un temps de durcissement a donné une augmentation de CBR d'environ 285% pour une l'état humide de 3 jours à 28 jours. Qui peut également voir une grande variation de CBR entre 3 et 14 jours, l'augmentation était d'environ 340%. Qui peut également voir une petite variation de CBR entre 14et 28 jours, l'augmentation était d'environ 12%.

Pour l'état immergé, l'augmentation de CBR était d'environ 74% quand le temps de durcissement augmente de 3 jours à 28 jours. Aussi peut observer l'augmentation de CBR environ 98% pour le temps entre 3 et 14 jours. Qui ici peut également voir une diminution de CBR environ 12%, quand le temps de durcissement entre 14 et 28 jours.

Tableau IV.5 : Synthèse résultat de CBR (Tout le pourcentage du déchet de céramique et de ciment).

Semple	Ajout (%)	CBR (%)-Humide	CBR (%)-Immergé
S_0	Natural sol	51.64	5.82
S_1	5% Céramique	75.26	11.42
S_2	10% Céramique	94.05	10.15
S_3	15% Céramique	73.24	10.40
S_4	2% ciment	88.23	68.02
S_5	4% ciment	99.05	129.01
S_6	5% Céramique +2% ciment	117.94	112.50
S_7	10% Céramique +2% ciment	116.13	116.31
S_8	5% Céramique + 4% ciment	263.10	246.31
S_9	5% Céramique+ 4% ciment	230.44	181.45
S_{10}	5% Céramique+ 4% ciment	208.14	210.48

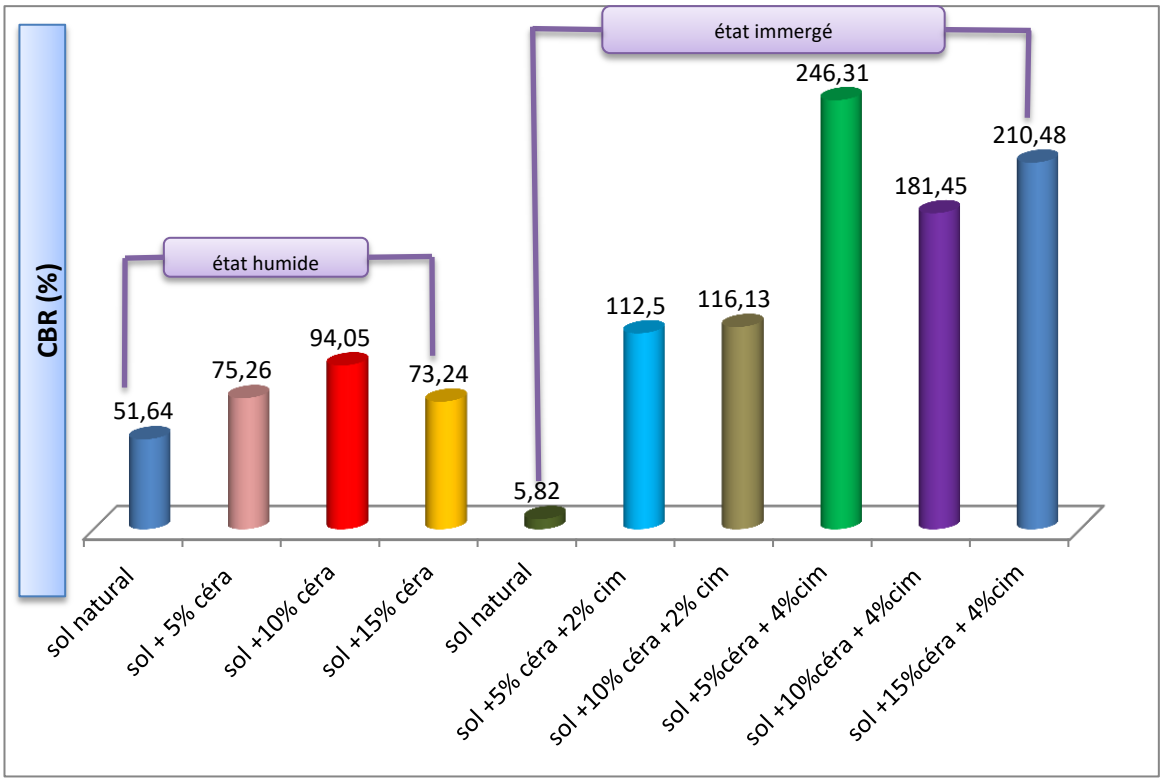


Figure IV.8: Résultat essai CBR (déférente pourcentage du déchet de céramique et Ciment).

D'après la Figure IV.8 on peut obtenir que les valeurs de CBR augmentent avec une proportion croissante de céramique recyclée pour la condition humide de 0 à 10%, puis diminuent légèrement pour 15% de dèches de céramique.

A partir de la Figure IV.8, on peut voir l'augmentation de CBR quand ajoute 2% de ciment avec 5 et 10% de dèches de céramique. La plus grande valeur de CBR obtenue à l'état immergé quand ajoute 4% de ciment et 5% de dèches de céramique. De cette figue peut également observer dans l'état immergé le CBR du sol naturel diminue 10 fois. Qui peut voir ce type de sol très sensible à l'eau.

A partir de ces résultats, nous pouvons conclure que toutes les valeurs de CBR pour tous les mélanges sont supérieures à la valeur requise, seuls les échantillons de sol naturel dans l'état immergée la valeur de CBR très faible.

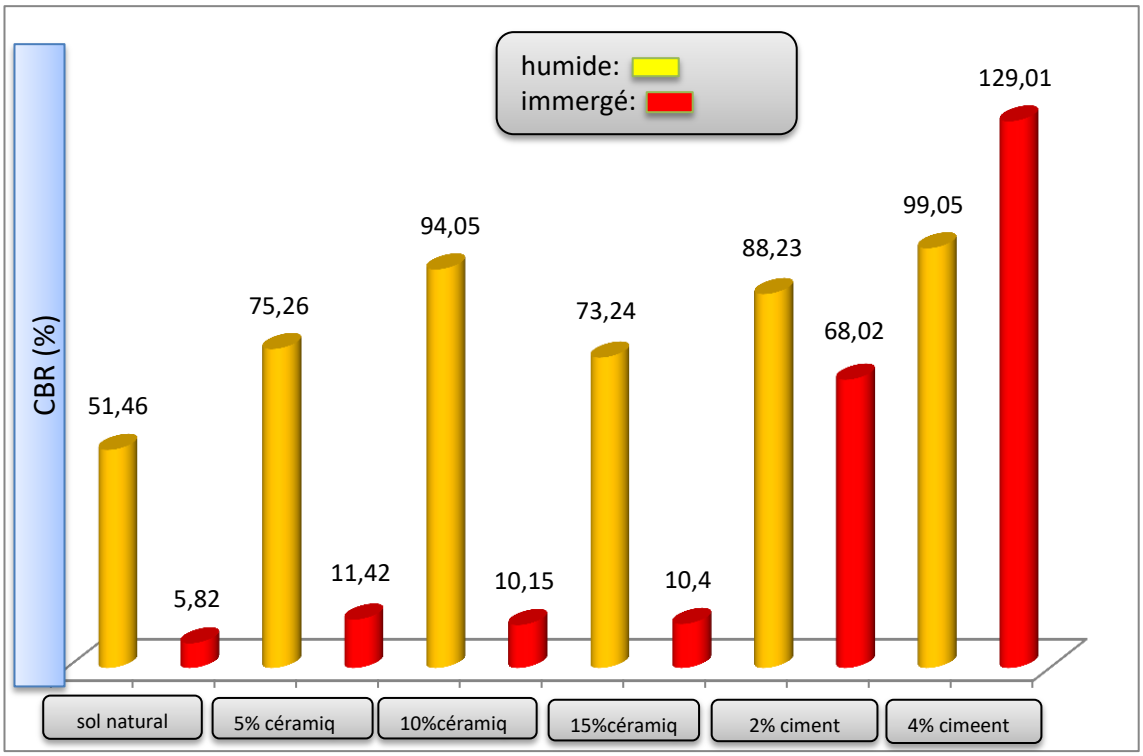


Figure IV.9: Résultat essai CBR (déférente pourcentage du déchet de céramique et ciment).

D'après la figure IV. 9 on peut obtenir que les valeurs de CBR augmentent avec une proportion croissante de déches de céramique pour l'état humide de 0 à 10%, puis diminuent légèrement pour 15% de dèches de céramique. Et on peut voir que les valeurs de CBR augmentent avec une proportion croissante de dèches de céramique pour la l'état immergé de 0 à 5%, puis une stabilité quelle que soit l'augmentation de proportion de dèches de céramique. A partir de ces résultats, nous pouvons conclure que toutes les valeurs de CBR pour tous les mélanges (sol + céramique) dans la condition immergée sont inferieure à la valeur requise. Mais la réalité sur le site, la condition de sol, la teneur en humidité n'est pas immergée à 100%. Ce qui peut satisfaire nos résultats pour la l'état humide.

A partir de la Figure IV.9, on peut voir l'augmentation de CBR quand la proportion de ciment croissante dans les conditions humide et immergé de 0 à 4% de ciment. Ce résultat montre l'influence positive de dosage de ciment sur le résultat de CBR.
Les résultats CBR sont presque les mêmes pour la condition humide quand on ajoute du ciment ou de la céramique. Ce qui nous permet de choisir le meilleur ajout. Pour l'autre côté pour l'état immergé le CBR était bas pour le sol stabilisé avec les dèches de céramique à cause de l'influence de l'argile dans les mélanges.

Ces résultats peuvent être par la diminution du volume des vides dans le sol qui est due à la bonne distribution du sol avec les particules fine de dèches de céramique , et l'effet chimique du liant hydraulique (réaction chimique entre ciment et l'eau et particule de sol), les fortes interactions se développent entre les particules de sol.

Compare notre travail pour certain chercheur ont constaté CBR après la stabilisation : entre 15% (avec30% déchet de céramique) et 145% (avec 30%ciment) pour l'état émergé et humide [32] [33] ; mais nos étude nous trouvons CBR entre 94 % et 246 % pour stabiliser sol avec5% déches de céramique et 4%ciment, on a bonne valeur de l'indice de CBR, donc cette résultats efficace pour les route.

IV.3. Essai perméabilité :

Tableau IV.6 : Résultat essai perméabilité (déférente pourcentage du déchet de céramique et de ciment).

	Naturel Sol	Sol + 5% céramique	Sol + 10% céramique	Sol + 15% céramique	Sol + 2%ciment + 5% céramique	Sol + 2%ciment + 10% céramique
h_1 (cm)	64	64	64	64	64	64
h_2 (cm)	5	19	14.5	18	10.5	4
t (h)	24	72	336	168	504	384
K (m/s)	7.55×10^{-9}	8.53×10^{-10}	3.10×10^{-10}	5.29×10^{-10}	2.5×10^{-10}	5.09×10^{-10}

Remarque: ***s = 1.76 cm²*** ***S = 80.11 cm²*** ***L= 11.5 cm***

$$K = \frac{s}{S} \cdot \frac{L}{t} \cdot \mathrm{Ln}\frac{h1}{h2}$$

Tableau IV.7 : Classification des sols par coefficient de perméabilité

Ajout	K (m/s)	Degré de perméabilité	Nature
Natural sol	$7.55x10^{-9}$	Très faible	Limon compact, argile silteuse
Sol + 5% céramique	$8.53x10^{-10}$	Pratiquement imperméable	Argile franche
Sol +10% céramique	$3.10x10^{-10}$	Pratiquement imperméable	Argile franche
Sol + 15% céramique	$5.29x10^{-10}$	Pratiquement imperméable	Argile franche
Sol + 2% ciment + 5% céramique	$2.51x10^{-10}$	Pratiquement imperméable	Argile franche
Sol + 2%ciment + 5% céramique	$5.09x10^{-10}$	Pratiquement imperméable	Argile franche

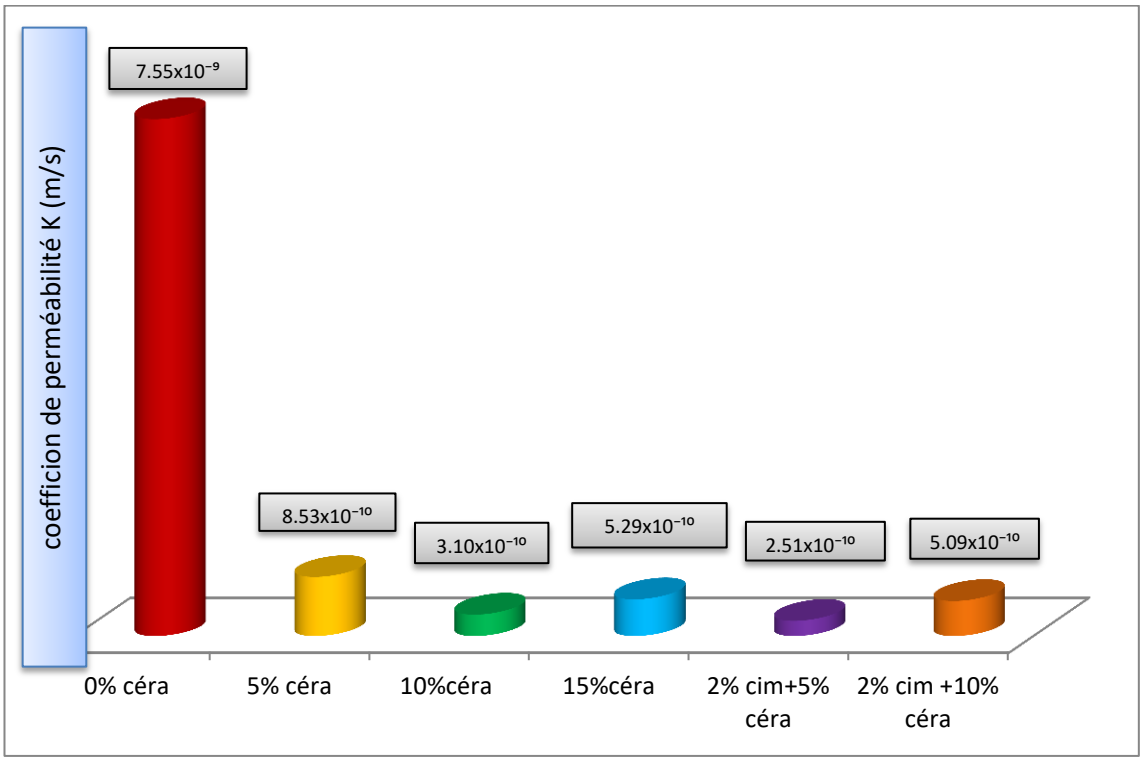


Figure IV.10: Résultat essai perméabilité avec déférente pourcentage du déchet de céramique et de ciment.

Figure IV.9 a obtenu que le coefficient de perméabilité diminue d'environ 785% quand ajoute 5% de déchet de céramique au sol, ce qui permet de voir l'effet du déchet de céramique sur le sol en minimisant le vide, grâce les fines particules de céramique pour remplir les vides.

De plus, l'augmentation du déchet de céramique de 5 à 10% diminue le coefficient de perméabilité d'environ 95%. Dans un autre côté l'augmentation du déchet de céramique à 15% le coefficient de perméabilité retour augmente d'environ 42%, peut-être de la plus haute argile au mélange donne des résultats négatifs. Ce qui peut conclure que l'optimum du déchet de céramique peut être ajouté au sol pour cette étude est de 10%.

Aussi, la Figure IV.9 présente l'addition de 2% de ciment avec 5% déchet de céramique diminue le coefficient de perméabilité d'environ 30 fois, en raison de la liaison du ciment aux particules de sol avec de la particule de céramique, mais en augmentant la proportion de déchet de céramique plus de 5% peu augmente le coefficient de perméabilité.

Compare notre travail pour un groupe des chercheur ont constaté coefficient de perméabilité mini môme de $1.92x10^{-11}$ après la stabilisation à avec un pourcentage de 10% ciment [36]; mais nos étude nous trouvons coefficient de perméabilité mini môme de $2.51x10^{-10}$ pour stabiliser sol avec 5% de déches de céramique et 2% de ciment, le sol pratiquement imperméable, donc cette résultats efficace pour les route et l'économie.

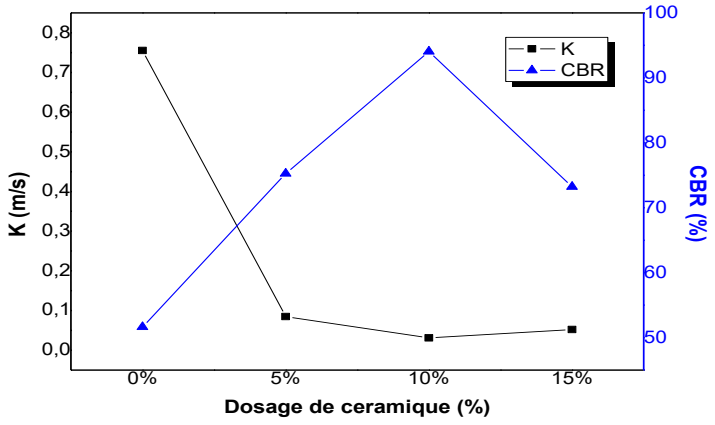


Figure IV.11 : Corrélation entre CBR et perméabilité

Il ressort de la Figure IV.11 l'augmentation de la CBR quand de l'augmentation de la proportion de déchet de céramique effectuée sur un autre côté diminution du coefficient de perméabilité, ce qui peut convaincre nos résultats. L'ajout déchet de céramique minimise les vides, ce qui augmente la capacité portant du sol.

IV.4.Essai Œdométrique (NF P 94-090-1) :

Tableau IV. 8 : Les caractéristiques des échantillons :

	Sol + 0% céramique	**Sol + 5% céramique**	**Sol + 10% céramique**	**Sol + 15% Céramique**
Caractéristiques	w_d = 68g	w_d =78g	w_d =77g	w_d =75
	Υs = 2.18	Υs =2.19	Υs =2.16	Υs =2.17
	hp =1.559cm	hp =1.780	hp =1.782cm	hp =1.728cm
	e_0 = 0.095	e_0 = 0.128	e_0 = 0.107	e_0 = 0.112
	w % =12.96	w % =11.15	w % =9.94	w % =11.49

Remarque : $e_o = \frac{\Upsilon s}{\Upsilon d} - 1$, $e = \frac{H0}{hp} - 1$, $hp = \frac{w_d}{\Upsilon s \,.\, s}$

Tableau IV. 9 : Calcule de l'indice de vide (e)

	Contraintes σ (KPa)	**Δh (cm)**	**H0-hp-Δh (cm)**	**E**
Sol + 0% céramique	100	0.001	0.440	0.2828
	200	0.009	0.431	0.2822
	400	0.036	0.395	0.2764
	800	0.056	0.339	0.2533
Sol + 5% céramique	100	0.001	0.219	0.1235
	200	0.002	0.217	0.1230
	400	0.011	0.206	0.1219
	800	0.047	0.159	0.1162
Sol + 10% céramique	100	0.001	0.217	0.1223
	200	0.006	0.211	0.1217
	400	0.017	0.194	0.1184
	800	0.032	0.162	0.1088
Sol + 15% céramique	100	0.001	0.271	0.1574
	200	0.002	0.269	0.1568
	400	0.025	0.244	0.1556
	800	0.038	0.206	0.1412

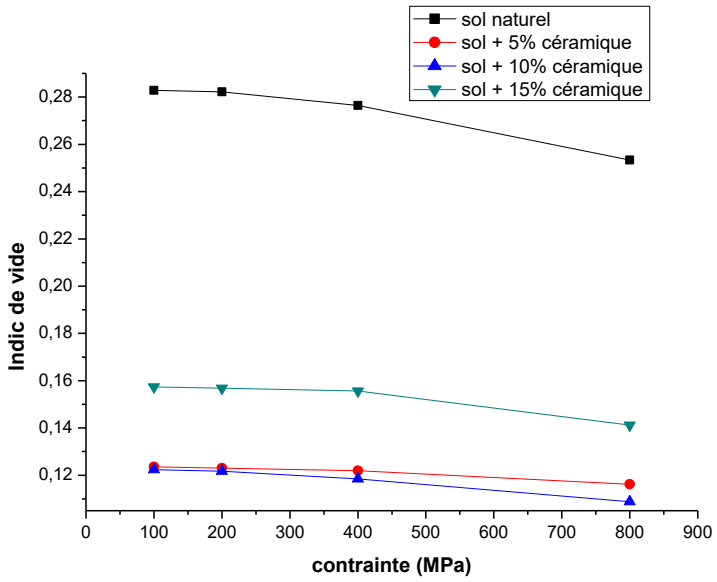


Figure IV.12: L'influence de dosage de déchet de céramique sur l'indice de vide

A partir de la Figure IV.12 le taux de l'indice de vide diminue d'environ 54% pour on augmente la dose de dèches de céramique de 0 à 5%. De plus, diminuer d'environ 57% lorsque l'on augmente le dosage des dèches de céramique à 10%, on peut également obtenir une diminution d'environ 44% avec augmentation les dèches de céramique à 15%. Un petit écart de l'indice de vide décroissant pour le dosage des dèches de céramique au sol entre 5 à 10% environ 6% et 22% pour le dosage entre 10 et 15%. À partir de ces résultats, nous pouvons conclure que, l'effet des dèches de céramique sur le sol résultat positif en réduisant l'indice de vide, grâce la particule fine de dèches de céramique remplir le vide dans le naturel sol.

Compare notre travail pour autre chercheur est constaté l'indice de vide 0.4720 après la stabilisation avec 30% de déchet de céramique [32]; mais nos étude nous trouvons l'indice de vide 0.1088 pour stabiliser sol avec 10% déches de céramique, on une grand diminution de volume de vide, donc cette résultats efficace pour les route et l'économie.

Calcule de Coefficient de consolidation Cc :

Tableau IV. 10 : Résultat de Cc et classification du sol traitait avec déchet de céramique

Dosage de céramique	Cc	Classification de sol
Sol naturel	0.09	Sol peu compressible
Sol+ 5% céramique	0.02	Sol très peu compressible
Sol+ 10% céramique	0.04	Sol très peu compressible
Sol+ 15% céramique	0.05	Sol peu compressible

Remarque : $Cc = \frac{\Delta e}{\log \frac{p2}{p1}} = \frac{e1-e2}{\log \frac{p2}{p1}} = \frac{0.2828-0.2533}{\log \frac{800}{100}} = 0.09$

Le Tableau IV. 7 présente les résultats du coefficient de consolidation, qui disparaît quand nous ajoutons les dèches de céramique au sol, ce coefficient diminue d'environ 350% avec l'ajout de 5% de dèches de céramique et diminue d'environ 125% pour 10% de dosage céramique. De plus, la diminution était d'environ 80% quand on ajoutait 15% de la dose de dèches de céramique au sol. Sur la base de ces résultats, nous pouvons observer les résultats de consolidation de la même manière avec des tests de CBR et de perméabilité, qui peuvent satisfaire nos résultats. On fine classification de notre sol traité **très peu compressible**.

Tableau IV.11 : Résultats d'affaissement (Δh) en fonction de dosage de dèches de céramique à (400 KPa) en fonction de temps

Temps	0%	5%	10%	15%
0	0	0	0	0
10 s	0.08	0.05	0.03	0.15
20 s	0.12	0.06	0.04	0.16
30 s	0.16	0.06	0.05	0.17
40 s	0.20	0.06	0.06	0.18
50 s	0.22	0.06	0.07	0.18
1 m	0.24	0.06	0.08	0.185
2 m	0.26	0.06	0.08.5	0.19
4 m	0.275	0.065	0.09	0.20
15 m	0.303	0.07	0.1075	0.21
30 m	0.313	0.075	0.1125	0.22
1 h	0.33	0.08	0.125	0.23
2 h	0.34	0.085	0.14	0.24
4 h	0.35	0.09	0.15	0.245
24 h	0.36	0.11	0.17	0.25

Tableau IV.12 : Résultats d'affaissement (Δh) en fonction de dosage de dèches de céramique à (800 KPa) en fonction de temps

Temps	0%	5%	10%	15%
0	0	0	0	0
10 s	0.36	0.35	0.16	0.20
20 s	0.38	0.37	0.17	0.22
30 s	0.40	0.38	0.19	0.23
40 s	0.40	0.38	0.20	0.24
50 s	0.40	0.39	0.20	0.25
1 m	0.40	0.39	0.20	0.25
2 m	0.43	0.41	0.22	0.27
4 m	0.45	0.4125	0.23	0.285
15 m	0.48	0.43	0.25	0.31
30 m	0.50	0.44	0.26	0.32
1 h	0.51	0.45	0.2725	0.33
2 h	0.52	0.455	0.285	0.34
4 h	0.54	0.46	0.30	0.35
24 h	0.56	0.47	0.32	0.38

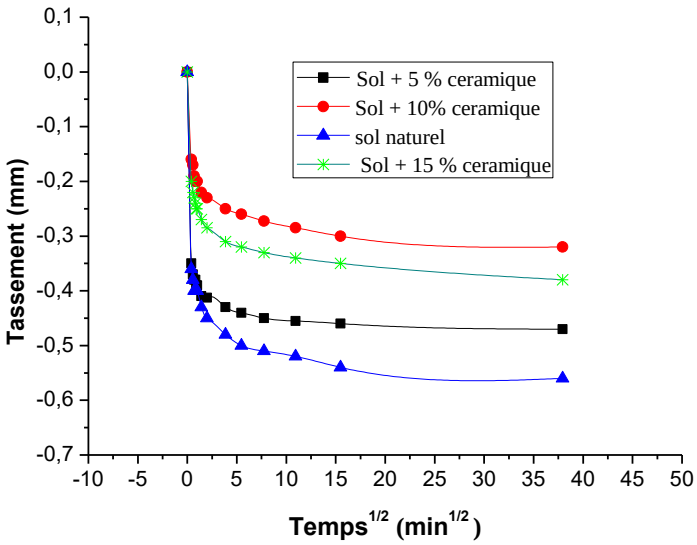


Figure IV.13: Variation d'affaissement en fonction de temps de la racine carrée

A partir de la Figure IV.13 le taux d'affaissement diminue d'environ 19% pour on augmente la dose de dèches de céramique de 0 à 5%. De plus, diminuer d'environ 75% quand augmente le dosage des dèches de céramique à 10%, on peut également obtenir une diminution d'environ 47% avec augmentation les dèches de céramique à 15%. Un petit écart d'affaissement décroissant pour le dosage des dèches de céramique au sol entre 5 à 10% environ 46% et croissante de 15% pour le dosage entre 10 et 15%. À

partir de ces résultats, nous pouvons conclure que, l'effet des dèches de céramique sur le sol résultat positif en réduisant l'indice de vide, grâce la particule fine de dèches de céramique remplir le vide dans le naturel sol.

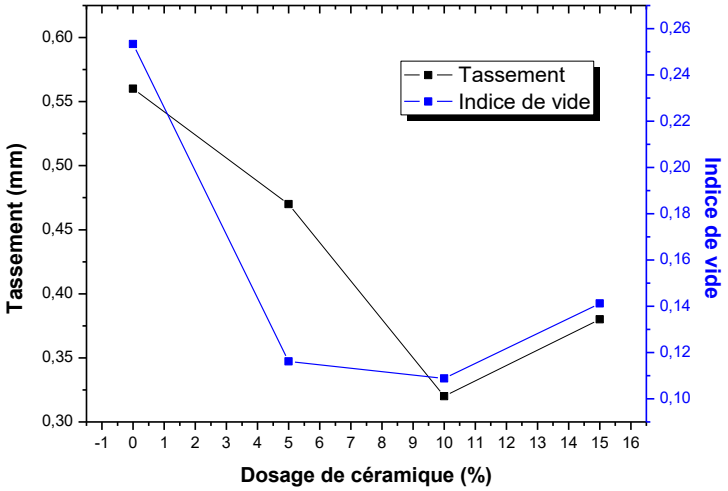


Figure IV.14: Corrélation entre affaissement (Δh) et l'indice de vide (e)

Figure IV. 14 obtenir la corrélation entre l'affaissement et le l'indice de vide pour les échantillons de sol avec des dosages de dèches de céramiques, dont les valeurs d'affaissement et de l'indice de vide trop proches les unes des autres en diminuant avec un dosage croissant de céramique de 0 à 10%, juste pour le sol avec 15% des céramiques augmentent un peu ce confirme les résultats des essais précédents comme CBR et perméabilité.

Calcule de coefficient de consolidation vertical Cv :

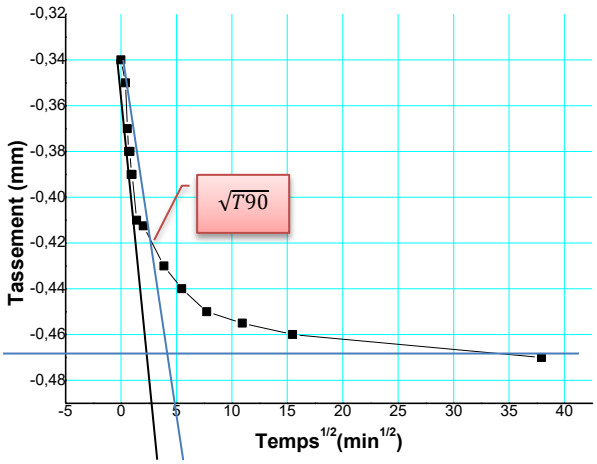


Figure IV.15: Exemple de Calcule de t90

Tableau IV.13 : Résulta de Cv

Dosage de céramique	Naturel Sol	Sol+ 5% céramique	Sol+ 10% céramique	Sol+ 15% céramique
Cv (m²/s)	0.821x 10^{-3}	0.556x 10^{-3}	0.252x 10^{-3}	0.319x 10^{-3}

Remarque : Formule de calcul $C_V = \frac{0.848 .H^2}{4.t90}$

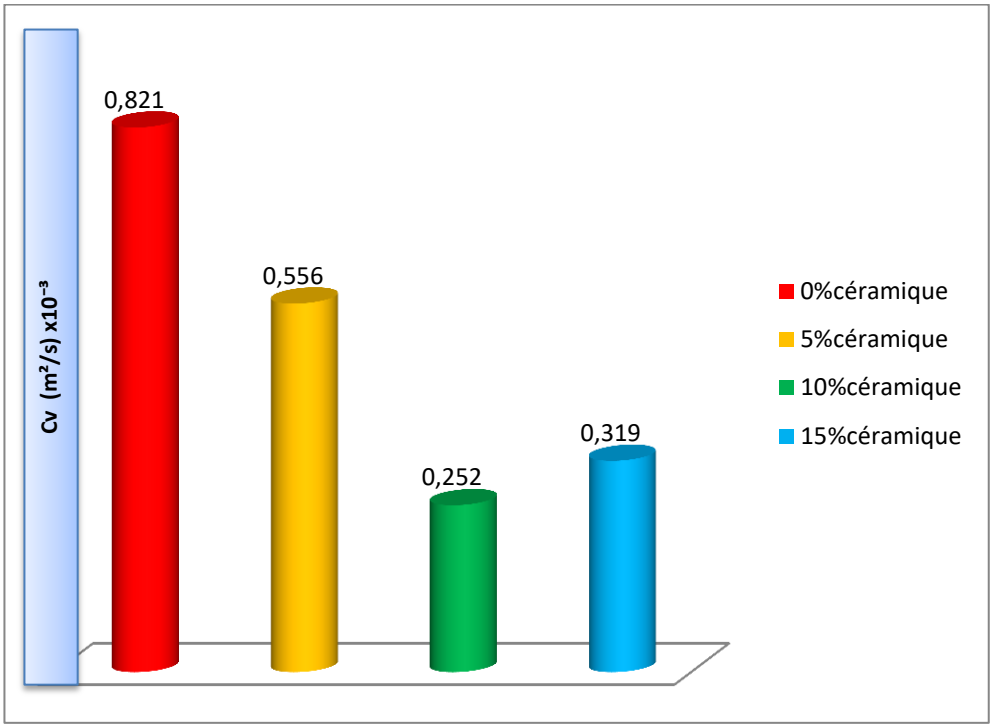


Figure IV.16: Variation de Cv en fonction de dosage de dèches de céramique

Figure IV.15 présent une diminution de Cv était d'environ 47,66%, 226% et 157% avec une augmentation de la dose de céramique de 5%, 10% et 15% respectivement.
De ces résultats, nous pouvons voir le petit tassement se produira pendant une longue période en ajoutant la dose de dèches de céramique entre 5% et 10%

IV.5.Perméamétrie de Guelph (sur site):

Tableau IV.14 : Lecture de début d'eau avec h =5 cm

Lecteur	Temps (min)	Intervalle de temps (min)	H (cm)	ΔH (cm)	Début (cm/min)
1	0	/	16.2	/	/
2	2	2	21	4.8	2.4
3	4	2	26	5	2.5
4	6	2	29.5	3.5	1.75
5	8	2	33.5	4	2
6	10	2	36	3	1.5
7	12	2	39.5	3	1.5
8	14	2	42.5	3.5	1.75
9	16	2	46	2	1
10	18	2	48	3	1.5
11	20	2	51	3	1.5

Tableau IV. 15: Lecture de début d'eau avec h=10 cm

Lecteur	Temps (min)	Intervalle de temps (min)	H (cm)	ΔH (cm)	Début (cm/min)
1	0	/	57.5	/	/
2	2	2	60.5	3	1.5
3	4	2	65	4.5	2.25
4	6	2	69	4	2
5	8	2	73.5	4.5	2.25
6	10	2	75	1.5	1.12
7	12	2	16.5	1	0.5
8	14	2	21	4.5	2.25
9	16	2	24.5	3.5	1.75
10	18	2	28.5	4	2
11	20	2	32.5	4	2

Tableau IV.1 : Résultat de l'essai de perméabilité golf

$\bar{R}_1$ (cm/sec)	$\bar{\bar{R}}_2$ (cm/sec)	K_{fx} (cm/sec)	Φ_m (cm²/sec)	α (cm⁻¹)	$\Delta\theta$ (cm³/cm³)	S (cm.sec⁻½)	Classe de sol
1.4	2	$3.72.10^{-4}$	$1.15.10^{-3}$	0.32	0.9	0.045	sable

Remarque :

Kfx = [(0.0041) (x) ($\bar{\bar{R}}$2)] -[(0.0054) (x) ($\bar{\bar{R}}$1)]

Φ_m = [(0.0572) (x) ($\bar{\bar{R}}$1)] -[(0.0237) (x) ($\bar{\bar{R}}$2)]

α = Kfx / Φ_m

- **$\bar{R}$:** le débit constant de l'écoulement
- **$\bar{R}_1$**: pour le 1er jeu de lecture
- **$\bar{\bar{R}}_2$:** pour le 2éme jeu de lecture
- **K_{fx}:** conductivité hydraulique saturée sur le terrain
- **Φ_m:** potentiel de flux de matrice
- **α:** paramètre alpha
- **$\Delta\theta$:** delta thêta
- **S:** sorptivité

Compare notre travail pour le chercheur Nasri ont constaté la conductivité hydraulique mesurée par l'appareil Guelph 2.67 x 10^{-6} [31]; mais nos étude nous trouvons la conductivité hydraulique mesurée par l'appareil Guelph aussi 3.72 x 10^{-4}, la Classe de sol est un le sable de Plainfield, donc cette résultats non efficace pour les route.

IV.6.Conclusion :

La stabilisation du sol avec déchet de céramique et de ciment amélioré les propriétés mécanique et physique de sol, augment la capacité portant des sols, diminuer la perméabilité, et influe sur les paramètres de la consolidation par réduire le tassement.

Utilisation de ciment avec diffèrent dosage améliore caractéristique du sol par réduire les vide et échange du squelette granulaire du sol traité.

Utilisation déchets de céramique donnée bonne résultat pour tous les essais à l'état humide. Ce qui résulte bien pour appliquer dans le site.

Chapitre V:

Conclusion générale

V.1 Conclusion générale :

L'étude géotechnique des couches de terrassement de la route nous a permis de connaître les failles de cette couche, il est donc utile de se focaliser sur leur performance et leur dureté grâce aux technologies de traitement des sols qui ouvrent la porte à la recherche de solutions pour améliorer la qualité des routes locales et national, Pour l'exploitation des déchets céramiques dispersés dans la nature.

Dans l'étude expérimentale sur le sol traité de la route Texter située dans les zones Ain Taghrout de Bordj Bou Arreridj ,Par déchets de céramiques et liant hydraulique (ciment), que nous avons réalisés au laboratoire de génie civil de l'Université El-Bachir Ibrahim et sr site pour étudier le comportement mécanique de la couche de forme de la route, et comment les additifs affectent la capacité et la tolérance du sol. Cette étude nous permet de connaître les caractéristiques initiales du sol utilisé :

- La masse volumique sec 1940 kg/m^3.
- La masse volumique humide 2200 kg/m^3.
- CBR 51% à l'Etat humide et 5,82% à l'Etat immergé
- Perméabilité K = 7.55 x 10^{-9} m/s

Le traitement du sol avec 5%, 10 % et 15 % de déchets céramiques et 2%, 4% de ciment avec 5% et 10% dèches de céramique permet améliorer les propriétés du sol.
En augmentant la valeur CBR 94% en utilisant 10% de dèches de céramique, 129% en cas d'utilisation 4% de ciment et 246% en cas d'utilisation 4% de ciment avec 5% de céramique.
Perméabilité décroissante d'environ 785% en cas d'utilisation 5% dèches de céramique et 2907% en cas d'utilisation 2% de ciment avec 5% de céramique.
L'indice de vide à 800 KPa diminue 117.9 % avec 5% de dèches de céramique et 389% à 10% dèches de céramique.

La perméabilité du naturel sol sur le site indique que ce type de sol a une perméabilité élevée comme le sable, ce qui permet de conclure que ce type de sol est très sensible à l'eau, ce qui pose problème à notre route.

L’effet de dèches de céramique c’est remplir les vide dans le sol, et aussi le ciment joué un rôle de lier la particule de déchet de cramique et la particule de sol, est augmenté la résistance de sol traité on fonction de temps.

Il nous a permis de traiter les sols avec des déchets céramiques et le liants hydraulique (ciment) .Nous avons développé une feuille de route de spécifications internationales et de bonnes propriétés mécaniques pour l'aider à vivre longtemps sans déformations et glissements.

Cette nouvelle technique dans le traitement du sol a de nombreux avantages parmi eux :

- Augmente la capacité portant de sol.
- Augmenté la pérennité.
- Diminuer le cout de réalisation des constructions.
- Protéger l'environnement.

Enfin, nous pouvons dire que cette étude devrait être d'un grand intérêt, et un développement permanent dans le domaine de la construction routière, pour une utilisation future.

Recommandation :

Pour comparer nos résultats à la situation réelle sur le site, nous devrions faire les mêmes tests avec une variante de teneur en eau car les sols du site ne sont pas immergés à 100%.

Références Bibliographies

[1] www.sharkiaalaan.com.

[2] M. Bouassida. Amélioration des sols en place. « Introduction à la géotechnique ». Université Tunis El Manar Ecole Nationale d'Ingénieurs de Tunis 2018.

[3] Natacha Sertier, Jean Charles Bourdeau, Alain Assina. Amélioration des sols cours. Université de la réunion. 2006.

[4] J.-P. Camuzard. Le sol, un milieu complexeau pouvoir épurateur limité. Engref Paris.

[5] www.leparisien.fr

[6] Jean-François Baumard. Les céramiques industrielles Propriétés, mise en forme et applications. Dunod, Paris, 2013.

[7] J. Dejou. Les céramiques Société Francophone de Biomatériaux Dentaires. 2010.

[8] L'Office du Tourisme Seine-Eure. Dossier pédagogique Musée de Louviers musees -haute. 2006.

[9] www.castorama.fr

[10] Paysdefayence.free.fr

[11] www.futura-sciences.com

[12] www.brrc.be

[13] www.techniques-ingenieur

[14] www.soletanche-bachy.com

[15] Hamla Wafa. Amélioration de la stabilité de sol dans les constructions routières les déchets de marbre, les déchets de céramique et les liants hydrauliques. Mémoire : université de bordj Bou Arreridj 2017.

[16] Bensalem Ahmed. Caractérisation Et Exploitation De L'argile de benazzouz Dans La Construction Routière . Mémoire Magister. Université Badji Mokhtar-Annaba 2010.

[17] Gregory Paul Makusa. Soil stabilization methods and materials. Mémoire Luleå Université of Technologie, Sweden 2012.

[18] Bachir melbouci. Etude comparative du traitement du sol marneux à la chaux et au ciment dans les couches de forme des chaussées. Université Mouloud Mammeri de Tizi Ouzou. 2017.

[19] Abdelkrim Mahamedi et Mohamed Khemissa. Stabilization of expansive over consolidated clay using hydraulic. HBRC Journal . (11) 80-92 2015

[20] www.unece.org

[21] Terminologie routière (Circulaire ministérielle n° 64), "Nomenclature routière". Ministère des travaux publics, des transports et du tourisme. 1957

[22] www.planete-tp.com.

[23] M.Yıldız, A.S.Soğancı. Effect of freezing and thawing on strength and permeability of lime-stabilized clays. Selcuk University, Turkey, 2012

[24] Akshaya Kumar Sabat. Stabilization of Expansive Soil Using Waste Ceramic Dust. EJGE. (17) 2012

[25]. l'American Road Builders Association**.** Lime-treated soil construction manual lime stabilization & lime modification. Article:1959 sous le numéro ARBA Technical Bulletin 243

[26]. Centre d'information sur le ciment et ces applications. Documentation technique-Route n° 89 Septembre 2004, le traitement des sols à la chaux et/ou aux liants hydrauliques pour l'exécution des remblais et des couches de forme.

[27] www.chauxflash.be

[28] Joseph ABDO. Le retraitement en place à froid aux liants hydrauliques

[29] www. constructionequipment.com

[30] www. sixequipment.be

[31] Behzâd Nasri. Évaluation des fonctions de pédotransfert d'un sol hétérogène, milieu récepteur d'eau usée traitée, sur un site pilote dédié. Thèse: Université Paris-Est. 2013

[32] Mohammed Thafer Abdulnafaa. Use of waste ceramic tiles for road pavement subgrade. Road Materials and Pavement Design (17) 4. 2016.
doi.org/10.1080/14680629.2016.1194884

[33] Sitaram Nayak, Purushotham et G. Sarvade. Effect of Cement and Quarry Dust on Shear Strength and Hydraulic Characteristics of Lithomargic Clay. Institute of Technology, Manipal. 2011

[34] Reynolds W.D, Elrick D.E, 1985, in situ measurement of field-saturated hydraulic conductivity, sorptivity and the –parametre using the guelph pereameter, soil sci. 1985, vol. 140, p 292-302