

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

Université Mohamed El Bachir El Ibrahimi – Bord Bou Arreridj

جامعة محمد البشير الإبراهيمي «برج بوعريريج»

Faculté des Sciences et de la Technologie

كلية العلوم والتكنولوجيا

Département Génie Civil

قسم الهندسة المدنية



Mémoire de fin d'études

Mémoire pour L'obtention du Diplôme de Master

Filière : Génie Civil

Option : Matériaux de Construction

THÈME :

Amélioration de la stabilité du sol dans les projets de construction routière par les déchets de céramiques et les liants hydrauliques

Présenté le : 28/06/2017 Par

HAMLA Wafa

CHETBANI Yazid

Devant le Jury Composé de :

Mf. Bouzid Chaoki

Président

Mf. Ziani Hocine

Examineur

Mf. Guelmine Layachi

Examineur

M^{me}. Djeloul Chafia

Examineur

Dr. Deboucha Sadek

Encadreur

Année Universitaire 2016-2017

REMERCIEMENTS

Nous remercions du fond du cœur DIEU avant tous, le tout puissant, qui nous a accordé la force, la volonté et le courage afin de mener à bout ce travail.

Ce mémoire de master est le résultat de l'engagement de plusieurs personnes qui ont décidé de m'accompagner résolument dans cet exaltant parcours. Je voudrais profiter de cet espace pour leur exprimer toute ma gratitude et ma reconnaissance

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

Nous remercions également Mr Nacer Logzit le chef de département de génie civil pour leur précieuse aide. Nous rendons hommage à tous nos professeurs de la faculté des sciences et de la technologie et du département de génie civile à qui nous devons notre formation scientifique.

Nous témoignons également toute nos reconnaissances à tous nos collègues pour leur soutien et leur encouragement permanent à nos plus fidèles amies et amis.

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



DEDICACE DEDICACE

Je dédie ce modeste travail aux deux étoiles de ma vie ceux que je vois jour et nuit, je parle bien sure de ma mère et mon père Dieu les protègent, ceux qui ont été toujours là pour moi, c'est grâce à eux ce que je suis.

À mes sœurs qui mon soutenu et encourager pendant toutes ces années d'études. Merci pour votre présence à ma côtés pour vos encouragements permanents, seul ligne ne saurait exprimer ma gratitude envers ma famille

À mes meilleurs mes plus fidèles amies. Je prends le temps de vous remercier tous et toutes individuellement pour votre soutien, votre aide et les services que vous m'avez rendus. Je vous en serais éternellement reconnaissant.

À la fin je dédie ce travail à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail

*À toute Personne
Qui m'aime
Et qui me respecte...*



Abstract

The growing demand to construct new roads and the extension of existing facilities has forced the construction industry to build upon soft ground.

The challenges faced by engineers on road construction over soft ground include limited accessibility, expectation of very large settlement on extended time period especially at winter time, lower bearing capacity and possibility of stability problems. However, the waste of ceramics and marble problems, which produce a huge, tones every year to the environmental impact.

The objective of this study is to added waste of ceramic and marble, moreover the cement to improve the soil parameters such as physical and mechanical properties as limits dries densities and bearing capacity. Effective mix designs are an important factor affecting the quality of stabilized soils. The effects of various proportion of waste ceramic, marble and cement on geotechnical properties of modified soil were investigated experimentally. The laboratory tests that were carried out in this research work were the Atterberg limit, Modified compaction, and California bearing ration tests.

The results from this study, provided evidence that the plasticity index was between and, the dry density reached $1.99, \text{g/cm}^3$. The CBR increased with increasing the amount of waste of ceramics and marble, moreover the CBR with 4% cement to the soil gave the higher values about 129%.

The finding concluded that from this study indicate that the waste of ceramic gave high CBR with wet condition, however when added the cement, in both condition wet and immersed the CBR increased to 129%. In conclusion stabilized soil with waste of ceramic, marble and cement is suitable for layer of road construction.

Key words: Soil stabilization, waste of ceramic, waste of marble, road construction.

Résumé

La demande croissante de construire de nouvelles routes et l'extension des installations existantes ont forcé l'industrie de la construction à construire sur terrain doux.

Parmi les défis posés aux ingénieurs sur terrain pentu la réalisation des routes sont : le sol doux incluant une accessibilité limitée, le tassement en fonction du temps spécialement en hiver, ainsi la capacité portante du sol et les problèmes de stabilisation. Cependant, le problème de déchet de céramique et de marbre, qui produisent énormément, tonifie chaque année représente l'impact environnemental.

L'objectif de cette étude est d'ajouter des déchets de céramique, de marbre, et du ciment pour améliorer les paramètres du sol tels que les propriétés physiques et mécaniques, comme les limites, les densités et la capacité portante. La bonne conception du mélange est le facteur important qui affecte la qualité des sols stabilisés. Les effets de différentes proportions de déchets de céramique, de marbre et de ciment sur les propriétés géotechniques des sols modifiés ont été étudiés expérimentalement. Les tests de laboratoire effectués dans le cadre de ce travail de recherche ont été la limite Atterberg, le compactage et le test de California Bearing Ratio.

Les résultats de cette étude ont permis de constater que l'indice de plasticité était entre 6% et 15%, la densité sèche atteignait $1,99 \text{ g/cm}^3$. Le CBR a augmenté avec l'augmentation de la quantité de déchets de céramique et de marbre, en outre le CBR du sol traité à 4% de ciment donné des valeurs supérieures à environ 129%.

D'après de cette étude ont conclu que, l'utilisation de déchet de céramique a donné un CBR élevée avec un état humide. Cependant, lors de l'ajout du ciment dans les deux conditions humide et immergé, le CBR a augmenté jusqu'à 129%. Finalement, le sol stabilisé avec des déchets de céramique, du marbre et ciment peut être efficace à la construction routière

Mots clés : Stabilisation de sol, Déchet de céramique, Déchet de marbre, Construction routier.

تلخيص

ان الطلب المتزايد على تشييد الطرق الجديدة أدى إلى ضرورة البناء على أرضية ناعمة. من ضمن التحديات التي يواجهها المهندسون في تشييد الطرق: نوعية التربة الغير ملائمة، انخفاض قدرة تحمل هذه الأخيرة، إضافة الى ذلك مشاكل الاستقرار التربة وهبوطها خاصة في فصل الشتاء. كما تعتبر كمية النفايات الضخمة من السيراميك والرخام، احدى المشاكل التي تهدد البيئة.

الهدف من هذه الدراسة هو إضافة نفايات السيراميك ونفايات الرخام علاوة على ذلك الاسمنت لتحسين معاملات التربة كالخصائص الفزيائية والميكانيكية مثل حدود اتربارغ، وكثافة التربة وقدرة تحملها. اذ ان تصميم المزيج السليم هو عامل مهم يؤثر على نوعية التربة المستقرة.

تمت دراسة الاثار المترتبة على إضافة نسب مختلفة من نفايات السيراميك والرخام وكذلك الاسمنت على الخصائص الجيوتقنية بمجموعة من التجارب المخبرية مثل حدود اتربارغ، الضغط على عينات التربة المعالجة وقياس قدرة تحملها.

كشفت نتائج هذه الدراسة ان مؤشر اللدونة كان بين 6 بالمائة و15 بالمائة، وبلغت الكثافة الجافة 1.99 غرام / سم³ حيث ان زيادة كمية النفايات من السيراميك والرخام يؤدي الى ارتفاع قدرة تحمل التربة، حيث ان ل استقرار التربة عند إضافة 4 بالمائة من الاسمنت رفع نسبة تحمل هاته الأخيرة الى 129 بالمائة.

باختصار ان استخدام نفايات السيراميك ترفع قدرة تحمل التربة المعالجة، نفس الملاحظة بالنسبة للإسمنت (قدرة تحمل تصل لغاية 129 بالمائة).

أخيرا، معالجة التربة بنفايات السيراميك والرخام يؤدي الى استقرارها حيث تعتبر هذه التقنية فعالة لبناء الطرق.

الكلمات الدالة: استقرار التربة، نفايات السيراميك، نفايات الرخام، تشييد الطرق.

Liste des figures

Figure I.1.	La zone de Tixter	03
Figure I.2.	La carte géographique de Tixter.	04
Figure I.3.	Les photos de la route.	05
Figure I.4.	Déchet de céramique.	05
Figure I.5.	Le marbre.	06
Figure II.1.	Sol produit de l'érosion des roches.	08
Figure II.2.	Exemple sol.	09
Figure II.3.	Schéma simplifié des trois phases du sol.	09
Figure II.4.	L'échelle granulométrique.	10
Figure II.5.	Coupe type d'une structure de chaussée et terminologie des différentes couches.	12
Figure II.6.	Marbre blanc.	12
Figure II.7.	Utilisation de la céramique.	14
Figure II.8.	Déchet de céramiques	15
Figure II.9.	Les méthodes d'amélioration et de renforcement des sols.	21
Figure II.10.	Variation de la résistance à la compression en fonction du pourcentage en ciment à différentes durées de cure.	25
Figure II.11.	Variation des caractéristiques de compactage à l'OPM pour les différents pourcentages de l'eau.	27
Figure II.12.	Variation de la résistance à la compression en fonction de la durée de cure et le pourcentage en chaux additionné.	28
Figure II.13.	Variation de l'indice de portance IPI et du CBR en fonction des différents pourcentages de chaux.	29
Figure II.14.	Variation des paramètres de compressibilité en fonction du pourcentage en chaux additionnée (a) l'indice de compressibilité C_c (b) indice de gonflement C_g .	29
Figure II.15.	Vue générale d'un chantier de traitement de sol.	30
Figure II.16.	Arroseuse.	30
Figure II.17.	Epannage du liant.	31
Figure II.18.	Malaxage.	31

Figure II.19.	Compactage partiel.	32
Figure II.20.	Compactage final.	33
Figure II.21.	Protection de surface de la couche traitée.	33
Figure III.1.	Zone de prélèvement de sol	35
Figure III.2.	Photo du sol utilisé.	35
Figure III.3.	Schéma du principe de la diffraction des rayons X.	37
Figure III.4.	Appareille Diffraction des rayons X (DRX).	37
Figure III.5.	Concassage de céramique .	38
Figure III.6.	Poudre de marbre.	38
Figure III.7.	Ciment utilisé.	39
Figure III.8.	Appareillage -Teneur en eau (NF P 94-050).	40
Figure III.9.	la courbe granulométrique.	41
Figure III.10.	Appareillage - essai granulométrique.	42
Figure III.11.	Représentation des limites d'Atterberg.	43
Figure III.12.	Appareil de Casagrande.	44
Figure III.13.	Appareillage nécessaire pour déterminer W_p .	44
Figure III.14.	déroulement de l'essai - limite d'Atterberg.	45
Figure III.15.	Détermination de la limite de plasticité.	46
Figure III.16.	Abaque de plasticité de Casagrand.	48
Figure III.17.	Classification triangulaire des sols fins (Contenant moins de 30 % d'éléments de diamètre supérieur à 2 mm).	49
Figure III.18.	Appareillage - essai Proctor.	52
Figure III.19.	Déroulement de l'essai - Proctor.	53
Figure III.20.	Schéma de principe de l'essai CBR.	54
Figure III.21.	Appareillage - essai CBR.	55
Figure III.22.	CBR immédiat.	56
Figure III.23.	CBR du sol traité en liant hydraulique après plusieurs jours (7j ; 14j ; 28j)	56
Figure III.24.	CBR du sol traité en liant hydraulique après immersion.	57
Figure III.25.	Déroulement de l'essai - CBR.	57
Figure IV.1.	La courbe granulométrique du sol.	60
Figure IV.2.	La courbe granulométrique de la céramique.	61
Figure IV.3.	Limite d'Atterberg (100% sol).	62

Figure IV.4.	Limite d'Atterberg (5% déchet de céramique).	63
Figure IV.5.	Limite d'Atterberg -10% déchet de céramique.	64
Figure IV.6.	Limite d'Atterberg -15% déchet de céramique.	65
Figure IV.7.	Limite d'Atterberg-20% déchet de céramique.	66
Figure IV.8.	Limite d'Atterberg -4% déchet de Marbre.	67
Figure IV.9.	Limite d'Atterberg-6% déchet de Marbre.	68
Figure IV.10.	Limite d'Atterberg -8% déchet de Marbre.	69
Figure IV.11.	Limite d'Atterberg-10% déchet de Marbre.	70
Figure IV.12.	Variation de l'indice de plasticité en fonctions de déchet de céramique.	71
Figure IV.13.	Variation de l'indice de plasticité en fonctions de déchet de marbre.	71
Figure IV.14.	Variation de la masse volumique sèche en fonction de teneur en eau.	72
Figure IV.15.	Variation de la masse volumique sèche en fonction de teneur en eau (5% de déchet céramique).	74
Figure IV.16.	Variation de la masse volumique sèche en fonction de teneur en eau (10% de déchet céramique).	74
Figure IV.17.	Variation de la masse volumique sèche en fonction de teneur en eau (15% de déchet céramique).	75
Figure IV.18.	Variation de la masse volumique sèche en fonction de teneur en eau (4% de déchet du marbre).	76
Figure IV.19.	Variation de la masse volumique sèche en fonction de teneur en eau (6 % de déchet du marbre).	76
Figure IV.20.	Variation de la masse volumique sèche en fonction de teneur en eau (8 % de déchet du marbre).	77
Figure IV.21.	Variation de la masse volumique sèche en fonction de teneur en eau (10 % de déchet du marbre).	78
Figure IV.22.	Variation de la masse volumique sèche en fonction de teneur en eau (3% de liant hydraulique).	78
Figure IV.23.	Variation de la masse volumique sèche en fonction de teneur en eau (4% de liant hydraulique).	79
Figure IV.24.	Variation de la masse volumique sèche en fonction de teneur en eau (5% de déchet céramique + 3% de liant hydraulique).	80
Figure IV.25.	Variation de la masse volumique sèche en fonction de teneur en eau (5% de déchet céramique + 4% de liant hydraulique).	80

Figure IV.26.	Variation de la masse volumique sèche en fonction de teneur en eau (10% de déchet céramique + 3% de liant hydraulique).	81
Figure IV.27.	Variation de la masse volumique sèche en fonction de teneur en eau (10% de déchet céramique + 4% de liant hydraulique).	82
Figure IV.28.	Variation de la masse volumique sèche en fonction de teneur en eau (15% de déchet céramique + 3% de liant hydraulique).	82
Figure IV.29.	Variation de la masse volumique sèche en fonction de teneur en eau (15% de déchet céramique+ 4% de liant hydraulique).	83
Figure IV.30.	Variation de la masse volumique de sol sec en fonction de teneur en eau pour l'ensemble des pourcentages (marbre, céramique).	85
Figure IV.31.	Variation de la masse volumique de sol sec en fonction de teneur en eau pour l'ensemble des pourcentages en liants hydrauliques.	86
Figure IV.32.	Variation de la masse volumique de sol sec en fonction de teneur en eau pour l'ensemble des pourcentages de déchet céramique (5%) et liants hydrauliques.	86
Figure IV.33.	Variation de la masse volumique de sol sec en fonction de teneur en eau pour l'ensemble des pourcentages de déchet céramique (10%) et liants hydrauliques.	87
Figure IV.34.	Variation de la masse volumique de sol sec en fonction de teneur en eau pour l'ensemble des pourcentages de déchet céramique (15%) et liants hydrauliques.	87
Figure IV.35.	La courbe CBR (100% sol).	88
Figure IV.36.	La courbe CBR (10% céramique).	88
Figure IV.37.	La courbe CBR (4% ciment).	88
Figure IV.38.	Résultat essai CBR (Sol+ de déchet céramique).	89
Figure IV.39.	Résultat essai CBR (Sol+ de déchet marbre).	89
Figure IV.40.	Résultat essai CBR (Sol+ 3% ciment).	90
Figure IV.41.	Résultat essai CBR (Sol+4% ciment).	91
Figure IV.42.	Essai de tassement par le comparateur.	91
Figure IV.43.	Tassement du sol traité à 4% du ciment.	92

Liste des tableaux

Tableau I.1.	Données climatiques de la ville de Bordj Bou Arreridj.	04
Tableau III.1.	La composition chimique de l'échantillon de sol.	37
Tableau III.2.	Type de sol en fonction d' I_p .	47
Tableau III.3.	Etat de consistance du sol en fonction d' I_c .	47
Tableau III.4.	Etat de consistance du sol en fonction de I_L .	47
Tableau III.5.	La classe de portance.	58
Tableau IV.1.	La composition chimique de l'échantillon de sol.	60
Tableau IV.2.	Résultat essai limite d'Atterberg (100% sol).	60
Tableau IV.3.	les limites et les indice tiré d'essai limite d'Atterberg (100% sol).	62
Tableau IV.4.	Résultat essai limite d'Atterberg (5% de déchet céramique).	63
Tableau IV.5.	les limites et les indice tiré d'essai limite d'Atterberg (5% déchet céramique)	63
Tableau IV.6.	Résultat essai limite d'Atterberg (10% de déchet céramique).	64
Tableau IV.7.	les limites et les indice tiré d'essai limite d'Atterberg (10% déchet céramique)	64
Tableau IV.8.	Résultat essai limite d'Atterberg (15% de déchet céramique).	65
Tableau IV.9.	les limites et les indice tiré d'essai limite d'Atterberg (15% déchet céramique)	65
Tableau IV.10.	Résultat essai limite d'Atterberg (20% de déchet céramique).	66
Tableau IV.11.	les limites et les indice tiré d'essai limite d'Atterberg (20% déchet céramique)	66
Tableau IV.12.	Résultat essai limite d'Atterberg (4% de déchet Marbre).	67
Tableau IV.13.	les limites et les indice tiré d'essai limite d'Atterberg (4% déchet Marbre)	67
Tableau IV.14.	Résultat essai limite d'Atterberg (6% de déchet Marbre).	68
Tableau IV.15.	les limites et les indice tiré d'essai limite d'Atterberg (6% déchet Marbre)	68
Tableau IV.16.	Résultat essai limite d'Atterberg (8% de déchet Marbre).	69
Tableau IV.17.	les limites et les indice tiré d'essai limite d'Atterberg (8% déchet Marbre)	69
Tableau IV.18.	Résultat essai limite d'Atterberg (10% de déchet Marbre).	70
Tableau IV.19.	les limites et les indice tiré d'essai limite d'Atterberg (10% déchet Marbre)	70
Tableau IV.20.	Résumé des résultats de l'essai limite d'Atterberg.	71
Tableau IV.21.	Résultat essai Proctor (100 % Sol).	73
Tableau IV.22.	Résultat essai Proctor (5 % de déchet céramique).	73

Tableau IV.23.	Résultat essai Proctor (10 % de déchet céramique).	74
Tableau IV.24.	Résultat essai Proctor (15 % de déchet céramique).	75
Tableau IV.25.	Résultat essai Proctor (4 % de déchet Marbre).	75
Tableau IV.26.	Résultat essai Proctor (6 % de déchet Marbre).	76
Tableau IV.27.	Résultat essai Proctor (8 % de déchet Marbre).	77
Tableau IV.28.	Résultat essai Proctor (10 % de déchet Marbre).	77
Tableau IV.29.	Résultat essai Proctor (Sol + 3 % Ciment).	78
Tableau IV.30.	Résultat essai Proctor (Sol + 4 % Ciment).	79
Tableau IV.31.	Essai Proctor (5% de déchet céramique + 3 % ciment).	79
Tableau IV.32.	Résultat essai Proctor (5% de déchet céramique + 4 % ciment).	80
Tableau IV.33.	Essai Proctor (10% de déchet céramique + 3 % ciment).	81
Tableau IV.34.	Résultat essai Proctor (10 % de déchet céramique + 4 % ciment).	81
Tableau IV.35.	Résultat essai Proctor (15 % de déchet céramique + 3 % ciment).	82
Tableau IV.36.	Résultat essai Proctor (15 % de déchet céramique + 4 % ciment).	83
Tableau IV.37.	Synthèse des résultats d'essais Proctor.	84
Tableau IV.38.	Résultat essai CBR (déférénte pourcentage du céramique et marbre).	89
Tableau IV.39.	Résultat essai CBR (Sol+3% ciment).	90
Tableau IV.40.	Résultat essai CBR (Sol+4% ciment).	90
Tableau IV.41.	Résultat essai de tassement (sol + 4 % liant hydraulique).	92

Sommaire

Chapitre I : Introduction Générale

I.1. Introduction générale.....	01
I.2. Emplacement de site (Tixer la zone de prélèvement).....	03
I.2.1. Situation.....	03
I.2.2. Contexte Géo-environnementale.....	04
I.2.2.1. Géographie.....	04
I.2.2.2. Climat.....	04
I.2.2.3. Précipitations.....	04
I.3. Problématique.....	05
I.4. Objectifs de l'étude.....	06
I.5. Organisation du mémoire.....	07

Chapitre II : Revue bibliographique

II.1. Introduction.....	08
II.2. Généralité sur sol.....	08
II.2.1. Principales caractéristiques du sol.....	09
II.2.2. Structure des sols.....	09
II.3. Définition des sols évolutifs.....	10
II.3.1. Les argiles.....	10
II.3.2. Les limons.....	10
II.3.3. Les marnes.....	11
II.4. Caractéristique générale des chaussées.....	11
II.4.1. Constitution des structures de chaussée.....	11
II.4.2. Les grandes familles de chaussée.....	12
II.5. Le marbre.....	12
II.5.1. La poudre de marbre.....	12
II.6. Céramique.....	13
II.6.1. Généralité.....	13
II.6.2. Définition.....	13
II.6.2.1. Leur Utilisation.....	14
II.6.3. Les faïences.....	15
II.6.4. Déchet de céramique et de faïence.....	15
II.7. L'amélioration des sols.....	16
II.7.1. Qu'est-ce que l'amélioration des sols.....	16
II.7.2. Comment l'amélioration des sols est-elle utilisée pour réduire les incidences sur l'environnement.....	16
II.7.3. L'amélioration des sols est-elle toujours nécessaire.....	17
II.7.4. Que sont les drains verticaux.....	17
II.7.5. Ya-t-il d'autres méthodes pour améliorer, renforcer ou stabiliser des sols.....	18
II.7.6. Comment les géotextiles sont-ils utilisés pour améliorer les sols.....	18
II.7.7. Quels sont les autres avantages de l'amélioration des sols.....	18
II.7.8. L'amélioration des sols vaut-elle la peine.....	19

II.7.9. Y-a-t-il un système d'amélioration des sols préférable aux autre.....	19
II.8. Les sols stabilisés.....	20
II.8.1. Généralités.....	20
II.8.2. La stabilisation des sols.....	20
II.8.3. Les technique de stabilisation.....	20
II.9. Stabilisation chimique des sols.....	21
II.9.1. Liant organique.....	21
II.9.2. Les liants hydraulique.....	22
II.10. Les étapes de traitement traité le sol en place.....	30
II.10.1. Préparation du sol traiter le sol en place.....	30
II.10.2. Ajustement de l'état hydrique du sol.....	30
II.10.3. Epan dage du liant.....	31
II.10.4. Malaxage.....	31
II.10.5. Compactage partiel.....	31
II.10.6. Réglage.....	32
II.10.7. Compactage final.....	32
II.10.8. Protection de surface.....	33
II.11. Conclusion.....	34

Chapitre III : Méthodologie

III.1. Introduction.....	35
III.2. Matériaux utilisé.....	35
III.2.1. Le Sol étudié.....	35
III.2.2. Céramique.....	38
III.2.3. Poudre de marbre.....	38
III.2.4. Ciment.....	39
III.3. Essai de Teneur en Eau (NF P 94-050).....	39
III.3.1. Principe de la détermination la teneur en eau.....	39
III.3.2. Appareillage.....	39
III.3.3. Mode opératoire.....	40
III.3.4. Expression des résultats.....	40
III.4. Essai d'Analyse Granulométrique (NF P 94-056).....	41
III.4.1. Généralité.....	41
III.4.2. Objectif.....	41
III.4.3. Principe de l'essai.....	41
III.4.4. But de l'essai.....	42
III.4.5. Appareillage.....	42
III.4.6. Mode opératoire.....	42
III.5. Essai limite d'Atterberg (NF P 94-051).....	43
III.5.1. Généralités.....	43
III.5.2. Définition.....	43
III.5.3. But de l'essai.....	43
III.5.4. Appareillage.....	44
III.5.5. Mode opératoire.....	45
III.6. Essai Proctor Modifier (NF P 94-093).....	50
III.6.1. Généralité.....	50
III.6.2. Définition du compactage.....	50
III.6.3. L'objet de l'essai.....	50
III.6.4. But de l'essai.....	51
III.6.5. Principe de la méthode.....	51

III.6.6. Appareillage nécessaire.....	51
III.6.7. Mode opératoire.....	52
III.7. Essai CBR (California Bearing Ratio).....	54
III.7.1. Généralité.....	54
III.7.2. Définition.....	54
III.7.3. But de l'essai.....	54
III.7.4. Appareillage nécessaire.....	55
III.7.5. Principe de l'essai.....	56
III.7.6. Mode opératoire.....	57
III.7.7. Portance du sol.....	58
III.7.8. L'indice CBR (I.CBR).....	58
III.8. Conclusion.....	59

Chapitre IV : Résultats et discussions

IV.1. L'analyse par diffraction aux rayons X.....	60
IV.2. Teneur en Eau (NF P 94-050).....	60
IV.3. Analyse Granulométrique (NF P 94-056).....	60
IV.4. Limites D'Atterberg (NF P 94-051).....	62
IV.5. Essais Proctor Modifier (NF P 94-093).....	73
IV.5.1. Présentation des résultats sol et céramique.....	73
IV.5.2. Présentation des résultats sol et marbre.....	75
IV.5.3. Présentation des résultats sol et ciment.....	78
IV.5.4. Présentation des résultats céramique et ciment.....	79
IV.7. Essais de tassement.....	91
IV.8. Conclusion.....	93

Chapitre V : Conclusion Générale

Introduction générale

I.1.Introduction :

La construction ou l'amélioration du réseau routier est à juste titre considérée comme un des moyens efficaces de promouvoir le développement économique d'un pays, l'infrastructure en général, l'infrastructure des transports en particulier sont incontestablement un des éléments moteurs du développement , conjuguer leurs efforts avec ceux qui sont faits dans les autres domaines, c'est-à-dire réaliser ces infrastructures en harmonie avec les autres actions de développement, en sorte qu'elles ne se trouvent ni en retard, ni trop en avance, c'est bien une tâche essentielle des responsables des pays en voie de développement.[1]

Etat d'un réseau routier et développement économique d'un pays sont donc liés l'un à l'autre ; en fait d'abord, puisque le premier est une des conditions du second mais par raison aussi à cause de cette harmonie indispensable entre les différentes actions de développement. [1]

Ces considérations expliquent pourquoi la conception et la réalisation de routes dans les pays en voie de développement présentent un caractère particulier : on n'y construira pas une route seulement sous la pression du trafic, c'est-à-dire en fonction d'une demande exprimée ; mais aussi et surtout dans le cadre d'actions intégrées de développement concourant toutes à créer cette demande et à la satisfaire ; y en outre et compte tenu de cette interaction continue entre le service offert et l'usage qui en est fait, le degré d'équipement devra être particulièrement adapté aux besoins pour assurer le meilleur rendement aux efforts entrepris. [1]

L'économie de ces pays est en effet très sensible aux investissements routiers, qui créent rapidement des échanges entièrement nouveaux ; tout investissement prématuré ou excessif sur une route retarderait ou restreindrait d'autant des actions dans d'autres parties du réseau, actions qui pourraient précisément avoir des effets importants sur l'économie. Adaptation économique de la route aux besoins particuliers, rencontrés, adaptation technique aux conditions locales, tels sont les deux aspects complémentaires qui dominent la construction des routes dans les pays en voie de développement. Construire une route est une chose souvent facile, à la portée de tout bon ingénieur de Génie Civil ; mais la concevoir, la réaliser et la conserver avec le souci d'un optimum économique et social devenait difficile. [1]

Chaque pays a ses problèmes propres, étroitement liés au milieu économique et humain, à ses ressources naturelles, à son climat ; dans la compétition mondiale, chacun a ses vocations propres, plus ou moins concrétisées dans les plans de développement qu'il s'assigne lui-même. Parmi ces problèmes, celui de la conception des réseaux routiers lui est également propre.

Le corps de chaussée est une structure multicouche de matériaux. Son comportement global dépend de la nature de matériaux, et leur importance de réaliser un bon collage à l'interface entre couches de chaussée, pendant toute sa durée de vie. Les sollicitations dues au trafic ainsi que les conditions d'environnement sont les principales causes d'endommagement des couches de la chaussée, conduisent à plusieurs modes de dégradation, nuit à la sécurité, et à la qualité de service, pour réduire le coût de maintenance, un bon collage entre couches de chaussée est nécessaire. [2]

La construction des chaussées sur un sol évolutif est un des problèmes les plus communs de la construction des routes et d'autoroutes dans beaucoup de parties du monde. L'approche habituelle à la stabilisation des chaussée est d'enlever le sol fin à faible résistance et de le remplacer par un sol plus durable et résistant. Le coût élevé de remplacement a conduit généralement les gestionnaires de routes et d'autoroutes à utiliser la technique de stabilisation des sols en place. Un matériau évolutif peut être défini comme un matériau dont les propriétés physiques et mécaniques évoluent dans le temps. Les sols qui ont un caractère évolutif sont généralement les sols fins (argile, marne) qui peuvent être créés dans les ouvrages, des tassements, gonflement et glissement pendant sa durée de vie.

Dans les travaux de terrassements routiers, le recours à la technique de traitement du sol peut se faire par l'amélioration immédiate des sols trop humides en augmentant leur stabilité et en assurant leur mise en œuvre pour la réalisation des plates-formes rigides et stables, sous forme de couches de forme traitées, en visant des caractéristiques mécaniques élevées.

Le choix de l'agent de traitement et son dosage sont déterminés par le type de sol, sa teneur en eau au moment du traitement ainsi que les caractéristiques visées. L'approche que nous avons choisie pour comprendre les mécanismes conduisant à la stabilisation du sol support de la future route, est une approche expérimentale.

La durabilité naturelle du sol peut être améliorée par le processus de la stabilisation de sol en utilisant différents types de stabilisateurs (ciment, chaux, cendre volante). Le but est d'augmenter la résistance contre les forces destructives dans le temps par l'accroissement de la cohésion et la diminution du mouvement d'humidité dans le sol.

Il faut rendre quand la construction génère aussi une quantité importante de déchets de brique et de béton et de carrelage et faïence rarement valorisés. Le besoin universel de protéger l'environnement et de bien gérer les ressources, nécessitent d'établir des nouveaux lois et d'adapter des nouveaux concepts [3]. La valorisation et le recyclage des déchets est un moyen efficace face aux contraintes d'ordres économiques et écologiques de ces dernières années [4-5]. Les déchets constituent un réel problème, inévitable à toute vie biologique et à toute activité industrielle [6]. Le recyclage et la valorisation des déchets sont aujourd'hui considérés comme une solution d'avenir afin de répondre au déficit entre production et consommation et de protéger l'environnement [7]. Le recyclage a deux conséquences écologiques bénéfiques : la réduction du volume de déchets et la préservation des ressources naturelles [8].

Donc le traitement des sols avec le déchet de céramique résulte de la construction est une technique aisée à mettre en œuvre, économique et efficace. Elle permet de réutiliser les déblais issus des travaux de terrassement destinés à être rejetés, d'éviter de faire appel à des matériaux d'emprunt de qualité issus de carrières dont le transport implique la détérioration du réseau routier existant.

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

I.2.1. Situation

Dans notre étude on a choisi un matériau provenant de la zone Tixter : une commune de la daïra Aïn Taghrouit avec une superficie totale de 64 km². 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.



Figure I.1 : La zone de Tixter.

I.2.2. Contexte Géo-environnementale

I.2.2.1. 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



Figure I.2 : La carte géographique de tixter

I.2.2.2. Climat :

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.

I.2.2.3. Précipitations

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. (en 2014)

Tableau I.1.Données climatiques de la ville de Bordj Bou Argeridj.

Mois	jan	fév	mars	avril	mai	Juin	juil	aout	sep	oct	nov	déc
Température moyenne (°C)	6	6	9	11	16	22	26	26	21	15	10	6
Précipitation (mm)	32	26	27	35	41	16	11	11	11	63	33	35

I.3.Problématique :

Beaucoup de routes en Algérie endommagent rapidement après avoir été construites, car le type de sol est très compressible, surtout en time de pluie.

Problèmes de projets actuels présents dans la Fig I.3. Cependant, des spécifications techniques, problématiques de ces sols qui ont une faible résistance et une grande compressibilité avec un état d'immersion, ce qui peut causer divers problèmes d'ingénierie.

Le rôle de l'eau comme facteur défavorable à la stabilité ou comme facteur déclenchant la rupture est clairement mis en évidence, une pluie brève de très forte intensité entraînera de tassements alors que des pluies d'intensité modérée mais persistantes pendant plusieurs semaines sont susceptibles de provoquer des grandes compressibilités du sol et dommage la route.



Figure I.3 : Les photos de la route de Tixter.

Les déchets constituent un réel problème, inhérent à toute vie biologique et à toute activité industrielle, agricole ou urbaine. Le besoin universel de protéger l'environnement et de bien gérer les ressources, nécessitent d'établir des nouveaux lois et d'adapter des nouveaux concepts. Par conséquent, les ingénieurs ont eu recours au traitement ou à l'amélioration des propriétés du sol en modifiant les sols in situ par des matériaux de construction recyclés comme la céramique (Fig. I.4), le marbre (Fig. I.5) et liant hydraulique.



Figure I.4 : Déchet de céramique



Figure I.5 : Déchet de marbre.

Dans cette étude, la construction de la route à partir de Tixter de BBA est prise comme échantillon à améliorer en ajoutant différents pourcentages des déchets de céramique, marbre et ciment et testés avec plusieurs tests de laboratoire pour déterminer la performance la plus efficace des sols améliorés. Cette amélioration s'effectue pour améliorer les paramètres du sol avant la construction afin de construire une couche de terrassement stabilisée.

I.4.Objectif :

L'objectif principal de notre travail est de stabiliser la couche de terrassement d'une route décrit précédemment. Par une méthode qui nous offre trois types d'avantages : techniques, économiques, écologiques et environnementaux

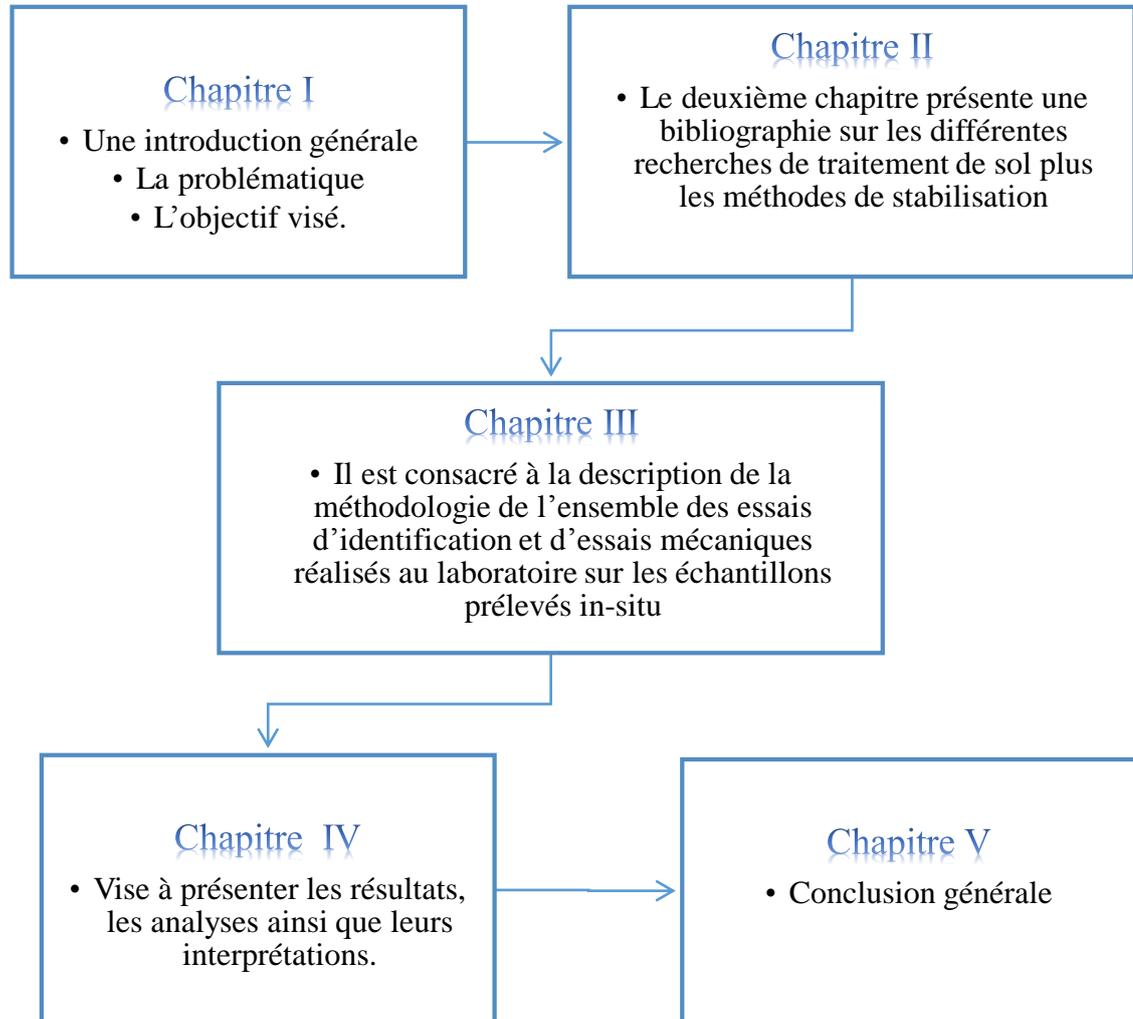
Une démarche expérimentale a été adoptée en réalisant des essais d'identification et des essais mécaniques, dans le but d'agir sur les paramètres physiques et mécaniques du sol qui compose la couche de terrassement de la route.

Plusieurs méthodes de stabilisation existent dans la littérature (techniques mécaniques, thermiques et chimiques) mais le coût de ces méthodes diffèrent les uns par rapport aux autres.

Nous allons utiliser dans notre étude la stabilisation à base d'ajouts de déchets de céramique, marbre et liant hydrauliques en recherchant la teneur en Ajouts adéquate en analysant les paramètres suivants : L'indice de plasticité, Densités, Teneur en eau optimal, CBR et Compressibilité du sol traité et non traité.

I.5. Organisation du mémoire

Pour atteindre les objectifs visés, le travail sera divisé suivant le plan ci-dessous



Chapitre II :

Etude Bibliographique

II.1.Introduction :

Devant les besoins croissant des ressources en matériaux et aux exigences de préservation de l'environnement dans une vision de développement durable, il est devenu nécessaire et pertinent de prospecter et d'étudier toutes les possibilités de réutilisation et de valorisation des déchets et sous-produits industriels notamment dans le domaine de génie civil.

Le traitement des sols est souvent opéré pour augmenter leur résistance, pour réduire ou augmenter 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.Généralité sur le sol :

Le sol est défini par opposition au mot roche, dans sa définition géotechnique. C'est un agrégat naturel de grains minéraux, séparables par une action mécanique légère. Le sol est le résultat d'une altération naturelle physique ou chimique des roches. On conçoit donc que la limite entre un sol et une roche altérée ne soit pas définie nettement. Le sol est un matériau meuble, ce caractère étant fondamental. Il ne suffit cependant pas à définir un sol naturel car certains matériaux produits par l'homme présentent aussi ce caractère. Par exemple les sous-produits miniers et les granulats concassés (sable, gravier, ballast...) sont aussi des matériaux meubles. Le mécanicien des sols étudie donc aussi bien des sols naturels que des matériaux fabriqués artificiellement à partir de sols ou de roches et présentant un caractère meuble [9]

Dans le cadre de l'amélioration des sols nous nous limiterons à l'étude des sols ayant un comportement mécanique ne pouvant pas répondre aux besoins d'un projet du génie civil.



Figure II.1 : Sol produit de l'érosion des roches. [10]



Figure II.2 : Exemple sol [11-12]

II.2.1.Principales caractéristiques du sol

Le sol est un matériau hétérogène et anisotrope comportant des minéraux et des matériaux organiques. La présence de l'air et de l'eau font du sol un matériau complexe à effet du temps. Son comportement est non linéaire et irréversible d'où la nécessité de combiner essais en laboratoire et en place, analyse théorique et modélisation, expérience cumulée et bon jugement pour la réussite d'une étude géotechnique. [9]

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.

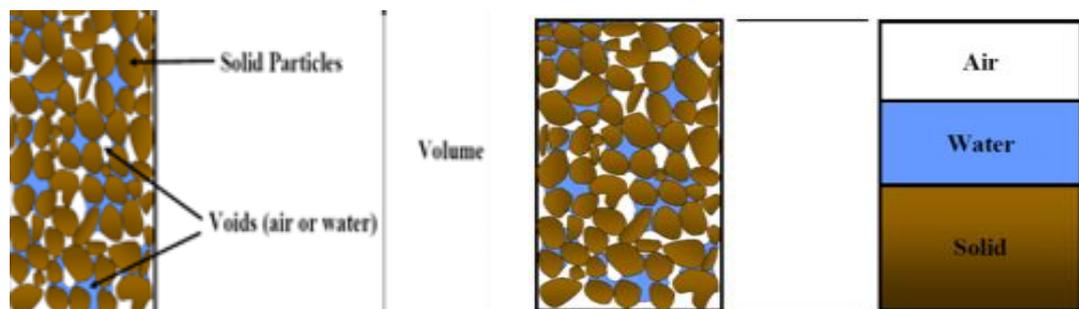


Figure II.3 : Schéma simplifié des trois phases du sol. [13]

II.2.2. Structure des sols

Le sol est un matériau constitué de particules. Les dimensions de ces particules peuvent être uniformes ou variées allant des cailloux de 10 cm et s'étendant jusqu'aux particules fines de moins du micron. Autre que la grosseur des grains, les particules possèdent d'autres caractéristiques telles que forme, texture et structure élémentaire. [13]

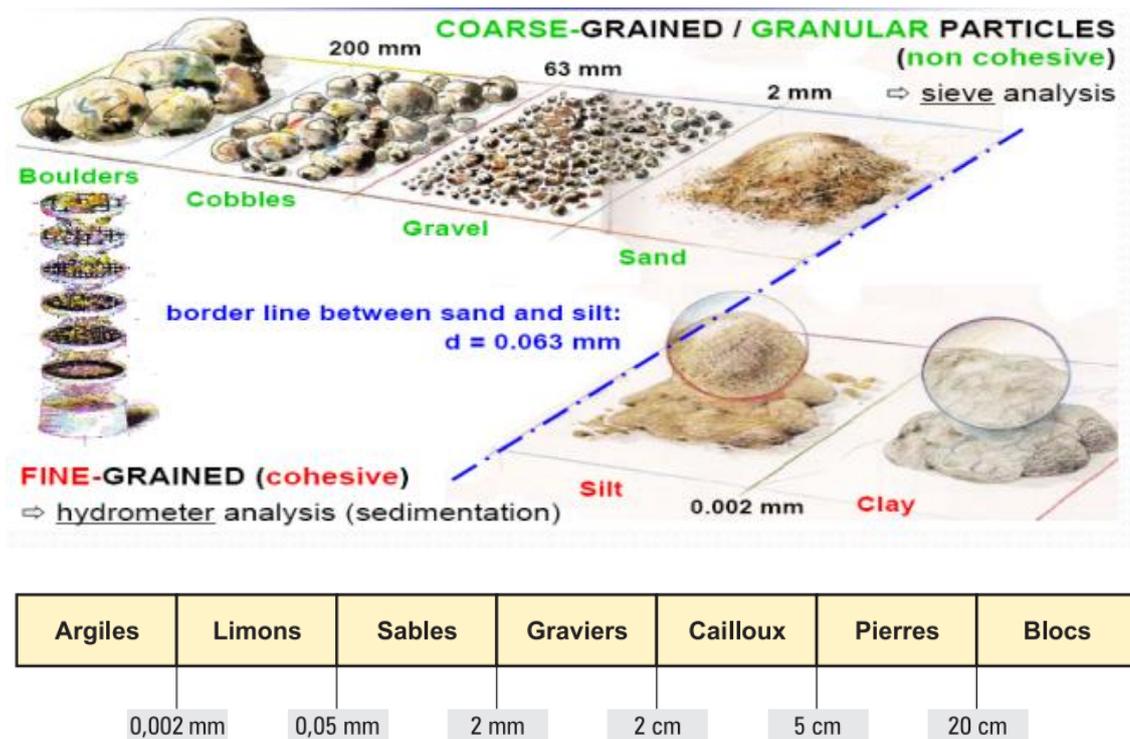


Figure II.4 : L'échelle granulométrique. [13]

II.3. Définition des sols évolutifs :

On peut définir un matériau évolutif comme un matériau dont les propriétés physiques et mécaniques évoluent dans le temps. Les sols qui ont un caractère évolutif sont les sols fins (limons, argiles, marne ...) qui peuvent créer dans les ouvrages, des tassements, gonflements et glissements pendant leur durée de vie. [14]

II.3.1. Les argiles

Les argiles sont des roches sédimentaires à grains fins, de taille inférieure à 0,005 mm, contenant au moins 50 % de silicate d'alumine. Elles absorbent l'eau et forment une pâte imperméable (perméabilité inférieure à 0,2 mm/h), appelée couramment terre glaise, colorée par des oxydes de fer en ocre, rouge, vert. [14]

II.3.2. Les limon

Les limons, constitués de silt, de loess et de, possèdent un squelette siliceux à silicocalcaire à grains fins. Leur taille est située entre celle des sables et celle des argiles, la teneur en argile est variable. Ils sont peu perméables et constituent des terres de culture fertiles. Leur assise est médiocre et sont donc à éviter pour les fondations. [14]

II.3.3. Les marnes

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

- les marnes argileuses qui contiennent 5 à 35 % de carbonate de calcium ;
- les marnes proprement dites et les calcaires marneux avec des taux respectivement de 35 à 65 % et 65 à 95 %.

Les marnes sont des roches relativement tendres, elles subissent une géodynamique très active à leur surface et leur fragilité les rend très vulnérables aux aléas de la nature et des hommes. Une combinaison de facteurs naturels et anthropiques a provoqué une érosion hydrique intense qui s'est manifestée par une dégradation des sols et une diminution importante de leur productivité. [15]

II.4. Caractéristique générale des chaussées :

II.4.1. Constitution des structures de chaussée

De tout temps, on a eu besoin de circuler. Mais, les routes ne furent guère que des pistes plus ou moins sommaires permettant de joindre des villes, villages ou hameaux sans empiéter sur les prairies ou terre cultivées. La route ne déférait alors pas tellement des surfaces qui la bordaient. [2]

Il est vrai 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. L'idée est restée avec les chaussées actuelles, qui sont des structures multicouches surmontant un ensemble appelé plateforme support de chaussée, constituée du sol support le plus souvent protégé par une couche de forme vis-à-vis de la description adoptée par les méthodes de dimensionnements, on associe à chacune des couches en fonction. [2]

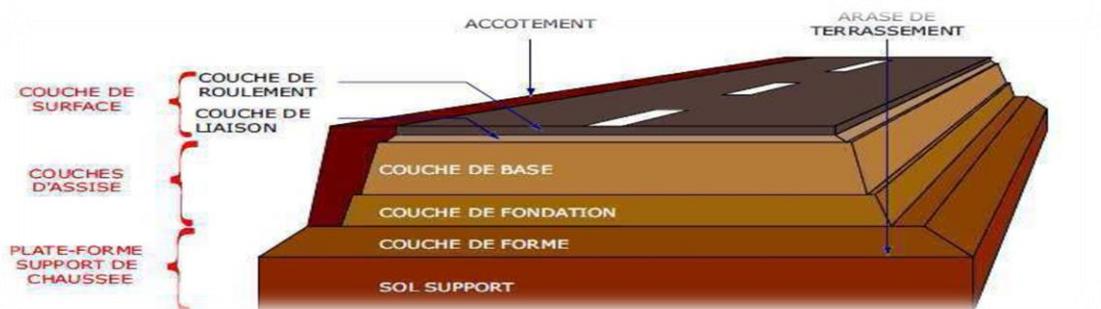


Figure II.5 : Coupe type d'une structure de chaussée et terminologie des différentes couches. [2]

II.4.2. 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. [2]

II.5. Le marbre :

Un marbre est une roche métamorphique dérivant d'un calcaire ou d'une dolomie sédimentaire ayant été transformée généralement par métamorphisme régional ou plus rarement par métamorphisme de contact. Dans ce processus de transformation de la roche originelle, les structures sédimentaires sont effacées et la roche carbonatée recristallise en un amas de cristaux de calcite et/ou de dolomie engrenés de dimensions millimétriques à centimétriques. [16]



Figure II.6 : Marbre blanc. [17-18]

II.5.1. La poudre de marbre

La poudre de marbre broyée en granulométrie fine est une charge minérale recherchée pour ses utilisations en peinture pour donner de la matière, en papeterie pour donner de la densité et de la brillance, en additif de pH neutre pour les plastiques, les cosmétiques, la pharmacie et la nourriture animale (ajout de calcium). [16]

II.6.Céramique :

II.6.1.Généralités :

Le terme céramique a pour origine le mot grec *keramikos*, qui fait référence à la poterie et à la « terre brûlée ». Les céramiques constituent une gamme très étendue de matériaux non métalliques. Elles sont toutes élaborées par des procédés thermiques et incluent de nombreux silicates et oxydes ; beaucoup ont pour origine les argiles naturelles analogues à celles qui servent à la fabrication de tuiles et de briques pour le bâtiment, argiles qui sont durcies par chauffage. Les constituants principaux sont les argiles et les aluminosilicates provenant des feldspaths. Aujourd'hui la gamme de matières premières est beaucoup plus étendue et elle aboutit, via la poterie et la céramique d'art, à des produits industriels très élaborés. [19]

La structure moléculaire des céramiques est parmi les plus complexes de toutes celles du monde minéral. Les liaisons entre les atomes, de type covalent ou ionique, sont très fortes. En conséquence, du point de vue de la dureté, de la résistance thermique ou mécanique, les céramiques montrent une nette supériorité par rapport à la plupart des matériaux métalliques.

Les céramiques possèdent trois avantages importants par rapport à d'autres matériaux concurrents : les matières premières utilisées pour leur fabrication sont relativement disponibles et peu onéreuses, elles sont peu denses et résistent à des températures très élevées, là où la plupart des métaux perdent leur résistance, enfin elles ont des propriétés optiques, électriques, chimiques, magnétiques, thermiques, etc. qui les rendent irremplaçables dans de nombreuses industries.

II.6.2.Définition :

Les céramiques sont définies selon le Larousse comme étant « Art de fabriquer les poteries, fondé sur la propriété des argiles de donner avec l'eau une pâte plastique, facile à façonner, devenant dure, solide et inaltérable après cuisson ». [19]

La société américaine ASTM (American Society for Testing and Materials) définit une céramique comme : « un article ayant un corps vitrifié ou non, de structure cristalline ou partiellement cristalline, ou de verre, dont le corps est formé de substances essentiellement inorganiques et non métalliques, et qui est formé par une masse en

fusion qui se solidifie en se refroidissant, ou qui est formé et porté à maturité, en même temps ou ultérieurement, par l'action de la chaleur. »

Les céramiques sont des matériaux inorganiques, non métalliques, nécessitant de hautes températures lors de leur fabrication. Il s'agit en général d'oxydes métalliques, et plus généralement de métaux oxydés, mais pas uniquement. Les céramiques ont en général une structure cristalline, parfois associée à une phase amorphe. Lorsque la majorité est amorphe, on parle de vitrocéramique ; lorsque la totalité est amorphe, on parle du verre.

II.6.2.1. Leur Utilisation :

Les produits céramiques destinés aux revêtements des surfaces forment un assemblage désigné par le terme classique de "carrelage". [19]

Il faut tout de suite distinguer deux utilisations distinctes : le carrelage des sols, le carrelage des murs. L'un et l'autre proviennent d'un assemblage de carreaux ou d'éléments similaires, mais les matériaux et les produits utilisés sont parfois très différents, et il faut savoir les reconnaître.



Figure II.7 : Utilisation de la céramique [20]

II.6.3. Les faïences :

Les faïences sont des terres cuites recouvertes en surface d'un émail qui les rend imperméables aux liquides. La fabrication s'effectue en deux stades : d'abord établissement et cuisson de l'objet, appelé alors "biscuit de faïence", puis émaillage et nouvelle cuisson pour durcir le décor. [19]

II.6.4. 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 Fayence d'un tel site. Celui envisagé au vallon des Fréyères en zone Natura 2000 n'est pas adapté. [21]

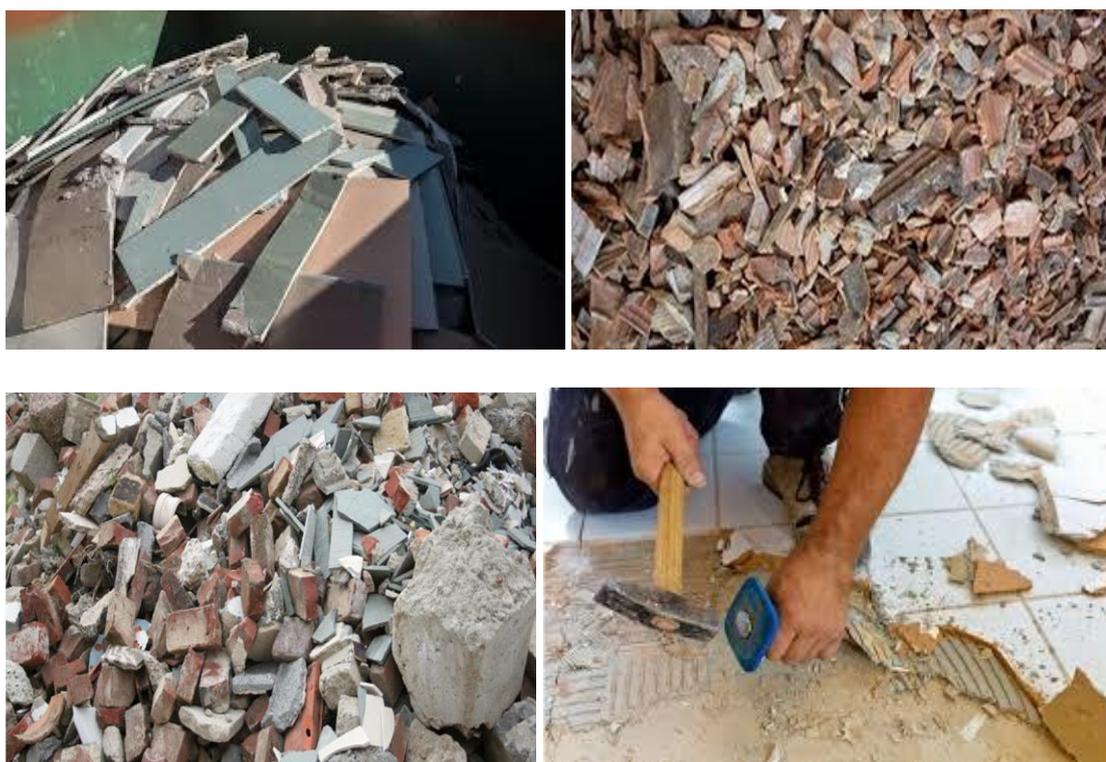


Figure II.8 : Déchet de céramiques [22-23]

II.7.L'amélioration des sols :

Elle est appliquée aux sols ayant une grande plasticité (limon, argile), afin d'améliorer leurs caractéristiques géotechniques : facilité de mise en œuvre et de compactage, portance et résistance au poinçonnement. Ceci se traduit par une meilleure praticabilité pour le trafic de chantier. [24]

II.7.1.Qu'est-ce que l'amélioration des sols ?

Dans le secteur du dragage l'amélioration des sols est généralement appliquée pour :

- 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.

Les techniques d'amélioration changent selon les caractéristiques du sol. Certaines techniques sont appliquées pour consolider le sous-sol meuble existant et d'autres le sont spécifiquement pour compacter les terres nouvellement créées. [25-35]

II.7.2.Comment l'amélioration des sols est-elle utilisée pour réduire les incidences sur l'environnement ?

L'amélioration des sols est également appliquée pour améliorer les caractéristiques mécaniques des sols meubles contaminés en immobilisant les métaux lourds et autres contaminants.

Plusieurs techniques ont été développées afin de consolider les sédiments contaminés, notamment l'assèchement des sédiments pour réduire la quantité de terre, ou en combinant les sédiments avec des additifs, par exemple en mélangeant les sédiments avec du ciment, ce qui permet le recyclage des sédiments en tant que matériau de construction ou de récupération de terres sur les eaux. [25-35]

II.7.3.L'amélioration des sols est-elle toujours nécessaire ?

Dans le cas de terres renflouées, une consolidation laissée à son cours naturel peut prendre une décennie ou plus. Compte tenu de l'urgence des besoins d'expansion, ce délai d'attente pour pouvoir construire est considéré comme trop long. En fait, si les nouvelles terres ne sont pas utilisables pour la construction dans un délai raisonnable, et si la construction des équipements prévus est retardée jusqu'à ce que la terre se soit assez tassée pour soutenir des bâtiments, un aéroport ou des maisons, le projet peut être compromis. Une période d'attente prolongée peut avoir ainsi des implications sociales et financières cruciales, puisque pour des raisons économiques et sociales les nouvelles terres sont habituellement nécessaires le plus tôt possible.

Les techniques d'amélioration des sols utilisées aujourd'hui ont sensiblement raccourci les délais de préparation des nouvelles terres pour l'utilisation, et ont donc assuré la viabilité économique de beaucoup de projets. La phase de consolidation est devenue une part essentielle de l'amélioration des sols, et plusieurs techniques ont été développées pour stabiliser les terres conquises. Parmi ces dernières, il y a les drains verticaux préfabriqués, le mélange de sol in-situ ou les méthodes de mélange profond de ciment. Le compactage par impact avec énergie élevée est employé pour compacter les 2 ou 3 mètres supérieurs des nouvelles terres. [25-35]

II.7.4.Que sont les drains verticaux ?

La stabilisation des sols recourt à des drains verticaux préfabriqués ou « mèche » pour les zones dont les sols sont meubles, compressibles et saturés en eau, notamment l'argile et l'argile limoneuse. Ces sols sont caractérisés par une structure très faible et une grande porosité, et sont donc habituellement remplis d'eau (eau interstitielle).

Quand une charge comme celle d'un remblai de route, d'un remblai hydraulique ou d'une digue est placée sur des sols meubles compressibles, des tassements significatifs peuvent se produire. Ces tassements peuvent créer des problèmes sérieux. Toute augmentation de charge peut provoquer une augmentation de pression de l'eau interstitielle. Dans les sols imperméables, cette eau se dissipe très lentement, coulant graduellement de la zone soumise à la contrainte. Une pression interstitielle accrue peut également causer l'instabilité du sol et des glissements peuvent en résulter. [25-35]

Un système de drains verticaux généralement placé selon un modèle carré ou triangulaire, avec des drains espacés d'environ 1 à 3 mètres, permet une évacuation accélérée de l'excès d'eau interstitielle, ce qui réduit le risque de glissements de terrain. La consolidation des sols cohésifs meubles avec des drains verticaux peut ramener le temps de tassement de quelques années à quelques mois, avec une garantie de portance adéquate, et la construction peut débuter rapidement. [25-35]

II.7.5. Y a-t-il d'autres méthodes pour améliorer, renforcer ou stabiliser des sols ?

Pour réduire le tassement et améliorer la résistance au cisaillement ainsi que la rigidité, et donc pour améliorer les sols, d'autres méthodes incluent les colonnes ballastées, les piliers, une variété de techniques de mélange de sol, ou le mélange in-situ des sols dans une grille. Quand on utilise une grille de colonnes, de piliers ou des colonnes mélangées in-situ, un matelas de transition peut être nécessaire sur le site pour transférer les charges de surface sur des supports discrets dans le sol. Ces techniques requièrent significativement moins de surcharge, voire aucune, et elles fournissent généralement une économie substantielle de temps. Ces traitements sont en général plus coûteux.

II.7.6. Comment les géotextiles sont-ils utilisés pour améliorer les sols ?

Les géotextiles ont beaucoup d'applications, notamment la filtration et le drainage. Des types spécifiques de géotextiles peuvent également être employés pour stabiliser des remblais et améliorer la portance des fondations de projets marins dans des sols meubles. Il convient d'être attentif à la composition du géotextile dans des situations spécifiques. Utiliser le géotextile approprié augmente la sécurité contre un affaissement souterrain et réduit le tassement des fondations en sous-sol. [25-35]

II.7.7. Quels sont les autres avantages de l'amélioration des sols ?

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. [25-35] 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.

les deux augmentent la portance des sols pour des travaux de construction et immobilisent également les sédiments marins contaminés.

II.7.8.L'amélioration des sols en vautelle la peine ?

Dans les projets de remblai de terres, les coûts des opérations de dragage et de remplissage, y compris l'amélioration des sols et la construction de digues, sont encore moins élevés que les prix par mètre carré de terre existante en bord de mer. De récentes études ont comparé les propriétés existantes en bord de mer à Rotterdam, Singapour, Dubaï et Tokyo avec les terres refloulées sur la mer. [25-35]

Dans tous les cas, les coûts de récupération et d'amélioration de sol rendaient les nouvelles terres financièrement attractives et viables par comparaison aux terres urbanisées côtières et leurs prix élevés. En outre, les avantages environnementaux inhérents à l'amélioration du sol peuvent être vus dans le cadre d'une atténuation de l'instabilité pendant des événements sismiques, avec par conséquent une limitation de l'effondrement catastrophique possible du sous-sol et des infrastructures construites sur ce sous-sol. En termes écologiques, l'utilisation d'un sol dragué, stabilisé et amélioré réduit la nécessité des extractions de sable.

II.7.9.Y-a-t-il un système d'amélioration des sols préférable aux autres ?

Après avoir examiné de nombreux essais et tests, on doit en conclure qu'il existe de nombreuses options pouvant accélérer de manière fructueuse la consolidation des sols et des sédiments dragués pour développer de nouvelles terres, ou des méthodes de compactage permettant de stabiliser le sous-sol dans les zones sismiques sensibles. Chaque technique a ses propres avantages et inconvénients par rapport au temps, au coût et à la mise en œuvre.

La meilleure méthode est toujours d'étudier les besoins spécifiques et d'entrer en contact avec des entrepreneurs spécialisés pour évaluer les besoins du projet. Bien que cette étape d'évaluation puisse apporter des coûts additionnels, une préparation appropriée, que ce soit par des essais, des tests de terrain ou en laboratoire, et avec un suivi intensif de la mise en œuvre, sera finalement amortie dans l'efficacité plus grande avec laquelle la terre sera sécurisée. Un système d'amélioration de sol bien géré et approprié au site augmentera les perspectives d'une remise sûre du projet dans les délais impartis. [25-35]

II.8. Les sols stabilisés

II.8.1. Généralités :

Les sols stabilisés font partie intégrante du vocabulaire des espaces publics. Ils appartiennent à la famille des matériaux compactés. La variété de la taille des granulats utilisés, de leurs couleurs, de leurs origines en font un matériau de très bonne qualité en termes d'intégration paysagère. Leur utilisation apporte une connotation naturelle au site. Ainsi, la mise en œuvre de sols stabilisés est courante sur le territoire du Pays de Gâtine. On les retrouvera souvent comme revêtement de places, de placettes, de zones de stationnement, de trottoirs, d'allées piétonnes, de terrains de jeux...

Il s'agit d'un matériau compacté lors de sa mise en œuvre. Il est plus ou moins rugueux en fonction de la taille du granulat utilisé. [36]

Economiques et de mise en œuvre rapide, les sols stabilisés sont un mélange de graviers, de sables, de fines et de liant, appliqués en une ou plusieurs couches.

II.8.2. La stabilisation des sols :

Elle a pour objectif la réalisation des couches de fondations de qualité dont les caractéristiques mécaniques ont été considérablement rehaussées, ce qui donne une plus grande portance et une meilleure distribution des charges. En outre, ces couches acquièrent ainsi une meilleure résistance à l'érosion et au gel, augmentant dès lors sensiblement leur durabilité. La stabilisation exige des pourcentages de 4 à 6 % de ciment ou d'une combinaison de ciment avec d'autres liants, tels que la chaux, les laitiers de haut fourneau ou l'émulsion de bitume. [37]

II.8.3. Technique de stabilisation

Les techniques de stabilisation les plus utilisées qu'elles soient chimiques ou autres dans le domaine routier sont : La stabilisation mécanique ; la stabilisation thermique et La stabilisation chimique. (Par ajout de matériaux). [37]

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.

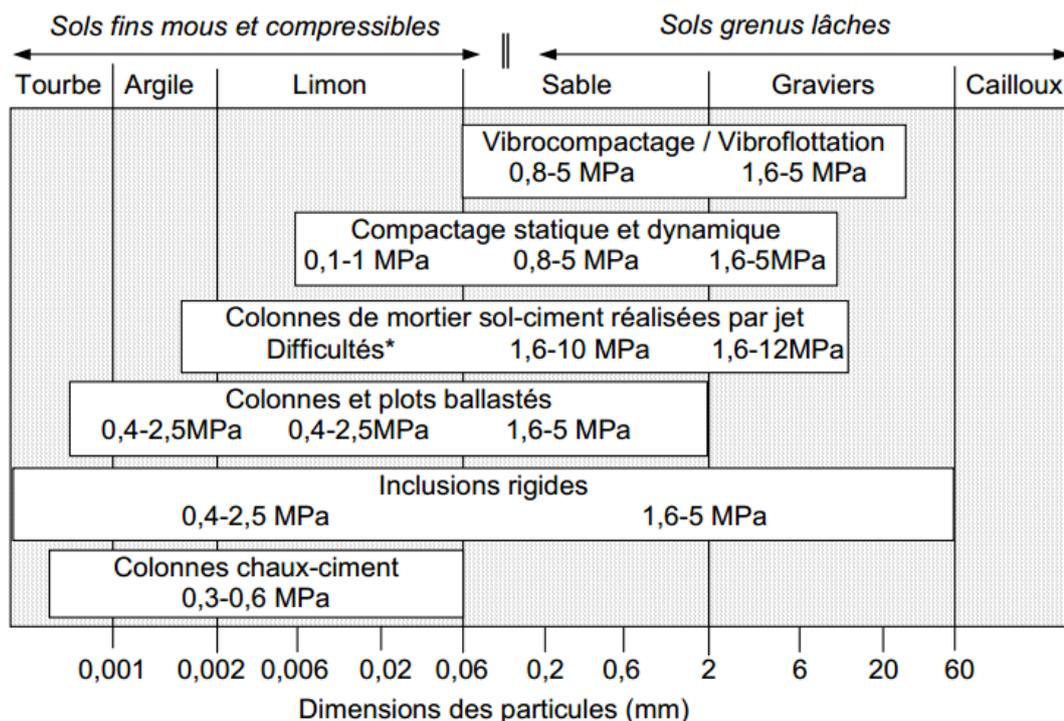


Figure II.9 : Les méthodes d'amélioration et de renforcement des sols. [38]

II.9. 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.[37]

Ils sont deux types :

- Les liants organiques (goudrons, bitume, résine naturelle, polymère)
- Les liants hydrauliques (ciment, chaux, Les liants hydrauliques routiers (LHR), cendres volantes, pouzzolane)

II.9.1. Liants organiques :

Les liants organiques sont des produits collants. Lors du malaxage, ils enrobent les particules argileuses et donnent aux sols gonflants des propriétés d'hydrophobes. Ceci entraîne une diminution de l'affinité du sol à l'eau et une modification de sa structure microscopique. L'action de ces produits donne au sol des propriétés hydrophobes qui dépendent de l'enrobage des particules du sol par le liant. L'inconvénient majeur de ces liants organiques est leur biodégradabilité sous des climats tropicaux. [14]

De nombreux chercheurs ont travaillé sur ce genre de traitement :

- Vessely et al (2002), ont montré que les inclusions de géosynthétiques sont efficaces sur la réduction du potentiel de gonflement des sols expansifs [39]
- Ikizler et al 2008, ont reporté que la réduction du potentiel et la pression de gonflement est le résultat de l'inclusion de polystyrène placé entre un sol expansive et un mur rigide. [40]
- Tang et al (2007), montrent que le renforcement par les fibres augmente la résistance à la compression et permet de réduire le potentiel de gonflement des argiles expansives. [41]
- Cai et al (2006), reportent que l'augmentation de contenu en fibre implique une réduction dans le potentiel de gonflement des argiles stabilisées à la chaux. [42]
- Viswanadham et al (2006), ont montré que les mélanges renforcés par les fibres engendrent une grande réduction du gonflement avec des faibles pourcentages (0.25%) et des petites rations de 15 et 30. [43]

II.9.2. Les liants hydrauliques

Ce sont des produits d'origine minérale qui par réaction avec l'eau donnent des réseaux cristallins enchevêtrés ayant une bonne cohésion et pouvant aboutir à des jonctions avec le squelette minéral. Ils sont tous à base de la chaux qui va réagir avec l'argile par échange cationique, floculation et agglomération, carbonatation et par réaction pouzzolanique. Ces réactions se traduisent par une amélioration immédiate des propriétés mécaniques du sol et une diminution de la sensibilité à l'eau par floculation et échange cationique. 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. [14]

A. 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. [37]

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).

B. Les cendres volantes

Les cendres volantes sont des produits dérivés de la combustion du charbon. Sont un sous-produit des centrales thermiques qui brûlent le charbon en poudre. Elles sont considérées comme une pouzzolane artificielle et s'emploient comme telle, avec du ciment pour faire du béton ou dans le sol-ciment. Les cendres volantes ont été employées aussi avec de la chaux dans la stabilisation des sols. [44]

Les constituants varient en fonction du mode de combustion qui les a générées. La classe FS FurnaceSlag : produit de haut fourneau est une pouzzolane qui requiert souvent un activateur tel que le ciment ou la chaux pour réagir.

La classe CS est une combinaison de la pouzzolane et du matériau Self Setting. Quand ils sont combinés à l'eau, des réactions de cimentation se produisent et créent des liaisons entre les particules. En fonction de la composition chimique, on assiste à une modification de la structure des particules, une augmentation de la résistance, une réduction du gonflement-retrait et de la sensibilité à l'eau. [37]

Ces réactions immédiates accélérées par les cendres volantes sont plus lentes que celles obtenues avec le ciment et plus rapides que celles obtenues avec la chaux. Le compactage doit se faire dans les six heures de l'application de la stabilisation.

Pour un sol silteux peu cohérent ou pour reprendre la chaussée sur toute l'épaisseur d'asphalte, des investigations récentes et quelques pratiques récentes ont montré que la stabilisation à la chaux et aux cendres volantes de classe F peut être économiquement utilisée pour réaliser des performances à long terme. Pour les sols appropriés, LFA Lime Fly Ash peuvent offrir des économies en réduisant le coût des matériaux jusqu'à de 50% comparé à la stabilisation au ciment Portland. [45]

La stabilisation des argiles gonflantes par les cendres volantes, noté une réduction de l'indice de plasticité et le potentiel de gonflement avec une amélioration de la texture. [46]

C. Le ciment

Le traitement au ciment convient plus particulièrement aux sols peu plastiques, qui sont à priori inadaptés au traitement à la chaux du fait de leur faible teneur en argiles, auxquels il apporte cohésion, résistance mécanique et stabilité à l'eau et au gel.

Le ciment rigidifie rapidement le sol de manière irréversible mais s'il y a rupture de l'horizon traité (action mécanique) il n'y a pas de nouvelle prise. Les constituants hydratés du ciment relient les grains de sable entre eux en formant des sortes de ponts nombreux et solides, d'où l'augmentation de la portance, de la résistance mécanique et de la résistance au gel. Les doses varient de 3,5 à 5 % du poids de sol sec à traiter. [47]

Dans les sols argileux, la réaction chimique sol-ciment est le responsable de son amélioration. Le processus d'hydratation du ciment produit les deux majeurs produits : les CSH et la chaux, l'interaction de cette chaux avec les minéraux argileux du sol joue un rôle essentiel en termes de processus de stabilisation sol- ciment. [48].

- D'après Léonarde, cité par [49], une argile très plastique traitée avec 10% de ciment acquière une résistance à la compression de plus de 3,5 bars.
- D'après Chen, Jones, cité par [49], le traitement de l'argile gonflante de Porterville de Californie avec 2 à 6% de ciment portland, présente une réduction considérable du potentiel de gonflement.

L'action de stabilisation par les ciments, est complexe et dépend de la nature du sol, de la teneur en ciment, de la teneur en eau et des conditions de température. De plus, la présence de la chaux dans les ciments provoque des réactions d'échange. Les pourcentages utilisés varient de 2 à 6%. Le ciment est parmi les liants les plus fréquemment utilisés dans le traitement des sols de surface. [50].

- D'Après Haofeng et al (2009), la résistance à la compression à 7, 14 et 28 jours, augmente au fur et à mesure que l'augmentation du pourcentage en ciment (figure II. 9) [51]

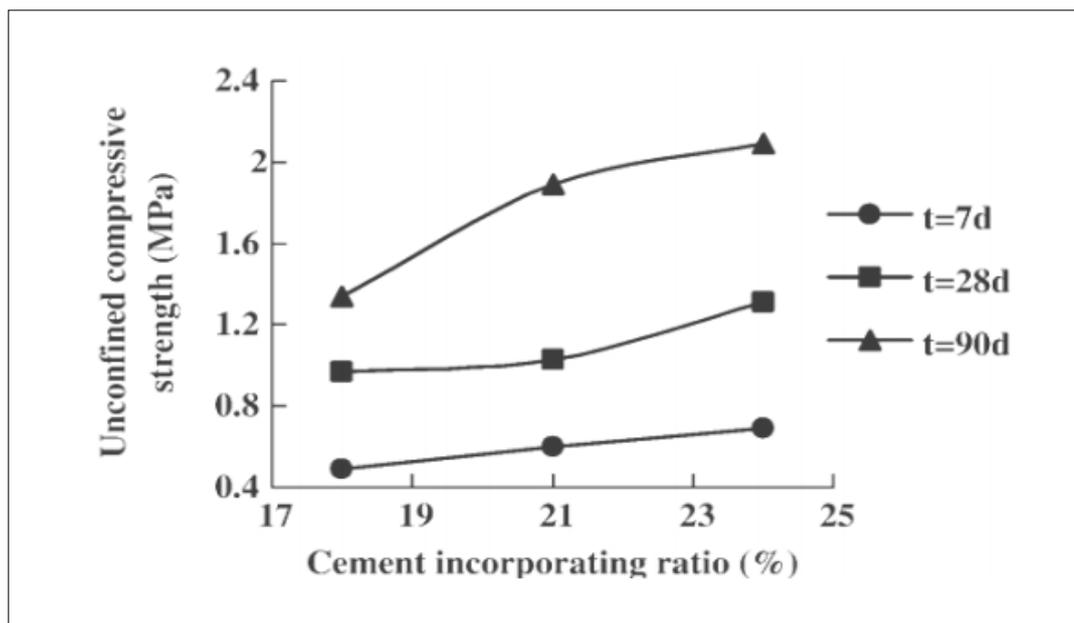


Figure II.10 : Variation de la résistance à la compression en fonction du pourcentage en ciment à différentes durées de cure. [51]

Les quatre mécanismes contribuant à la stabilisation au ciment des sols argileux sont résumés et classés selon leur importance comme suit :

Hydratation par ciment : les fortes interactions se développent entre les particules de sol. Le plus haut squelette continu des formes matérielles dure et fortes et enferme une matrice de sol inchangé, renforçant le matériel traité et en remplir des vides

Echange cationique : l'échange cationique change la charge électrique, réduit la plasticité et a pour résultat la floculation et l'agrégation des particules de sol.

Carbocation : la chaux libre produite pendant l'hydratation du ciment réagit avec de l'anhydride carbonique en air aux agents de cimentages de forme.

Réaction pouzzolanique : la chaux libre libérée pendant l'hydratation réagit avec la silice ou l'alumine des particules d'argiles en présence de l'humidité pour former les agents de cimentation.

D. Chaux

La stabilisation par ajout de la chaux est la technique de traitement des sols la plus répandue, elle concerne essentiellement les sols fins (argileux, limoneux et marneux)

L'utilisation de cette technique permet :

- D'éviter des volumes de terrassement importants dans le cas de substitution des sols médiocres.
- De donner aux sols argileux d'une manière assez rapide une bonne consistance pour des dosages compris entre 1% et 2%. Ceci montre aussi l'intérêt économique de ce procédé.
- De modifier les propriétés du sol.

Sachant qu'il y a deux types de chaux, vive et éteinte, le choix s'effectue en se basant sur les essais de laboratoire, les essais de chantier et sur le prix de revient. [14]

❖ Etude de la compactibilité

La sensibilité à l'eau des mélanges se traduit par des formes de courbes variées, selon la figure 1, on remarque que pour l'état naturel, la courbe de compactage soit à l'OPM présente une forme accentuée, ce qui explique la grande sensibilité du sol. [14]

Pour les mélanges de C= 1, 2,3 et 4%, les courbes Proctor sont déplacées vers la droite elles présentent une forme aplatie qui traduit la faible sensibilité des mélange à l'eau.

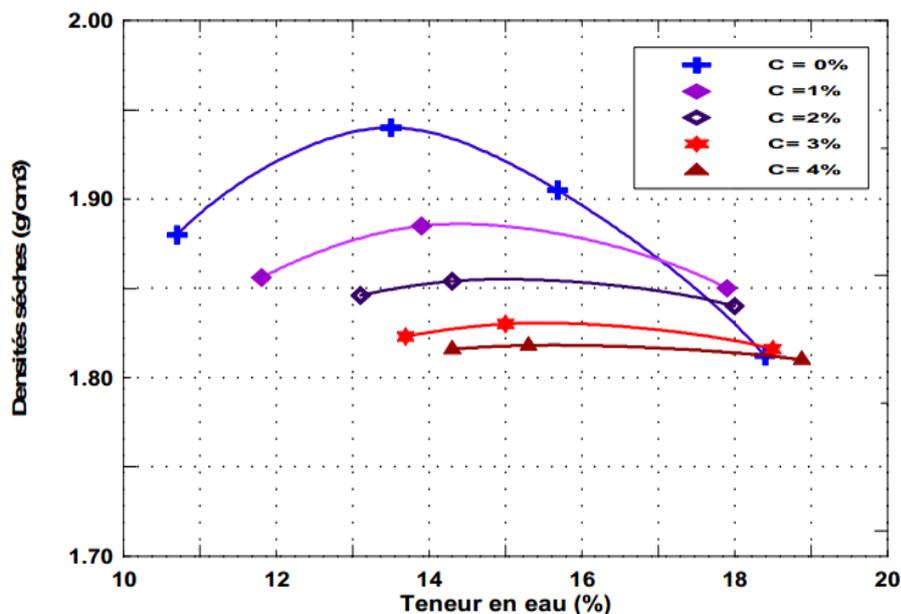


Figure II.11 : Variation des caractéristiques de compactage à l'OPM pour les différents pourcentages de l'eau. [14]

Le traitement à la chaux réduit donc la valeur maximale de la masse volumique apparente sèche et augmente la valeur de la teneur en eau optimale. L'augmentation de la teneur en eau optimale est due à l'accroissement de la surface totale des particules des mélanges traités par les grains fins de la chaux additionnée, puis la raison la diminution de la densité sèche maximum est le faible poids volumique de la chaux .

❖ Résistance à la compression des mélanges

La résistance à la compression de la marnes à l'état naturel et très faible, elle est de l'ordre de 0.644 MPa. La figure II.12, représente le développement de la résistance à la compression en fonction des différentes conditions de cure pour les mélanges traités et non traités. On remarque que pour une durée de cure nulle (l'écrasement immédiat), la résistance à la compression garde sa valeur faible pour les différents mélanges. [14]

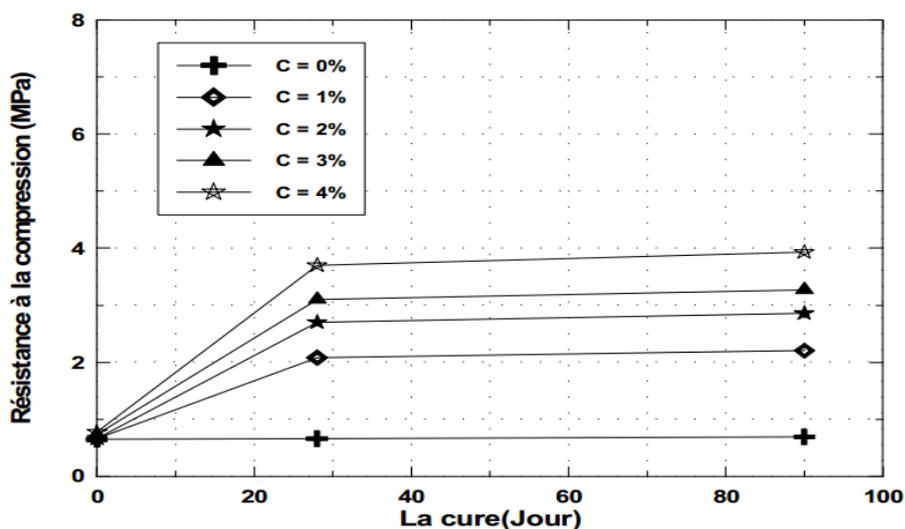


Figure II.12 : Variation de la résistance à la compression en fonction de la durée de cure et le pourcentage en chaux additionné. [14]

Pour la durée de cure de 28 jours, on constate une évolution importante avec l'augmentation du pourcentage de la chaux, les valeurs de la résistance obtenues pour les mélanges C= 1, 2,3et 4 % sont respectivement 2.08, 2.7, 3.1 et 3.7 MPa. Pour la durée de cure de 90 jours, on remarque une faible augmentation de la résistance qui varie de 3.7 à 3.93 MPa pour un pourcentage de 4%. La résistance à la compression augmente avec l'accroissement du pourcentage en chaux dans les mélanges traités, cette augmentation peut être expliquée par l'addition des matériaux fins dans les sols qui implique une augmentation de la cohésion. La raison de la forte augmentation de la résistance à la compression après 28 jours est justifiée par la réaction d'hydratation de la chaux pendant cette période.

❖ Etude de la portance

La figure 3 donne les effets de l'additif chaux sur les deux indices de portance IPI et le CBR. On montre qu'il y a une tendance générale d'augmenter des valeurs de CBR et IPI avec l'augmentation de contenu en chaux, un pourcentage de 1% de chaux donne une augmentation de 50% de CBR. Un accroissement de l'IPI de 15 à 41% et de 14 à 43% pour le CBR a été montré sur les échantillons de sol stabilisés à la chaux avec un pourcentage variait de 2 à 4%

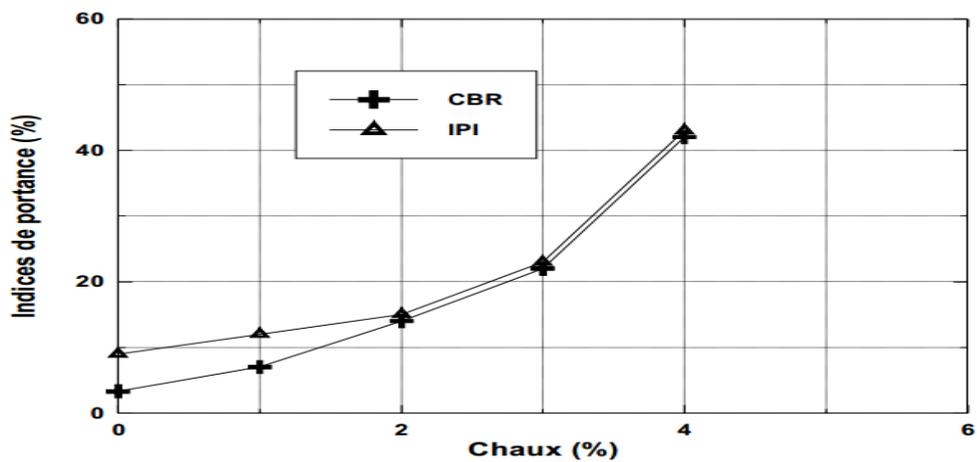


Figure II.13 : Variation de l'indice de portance IPI et du CBR en fonction des différents pourcentages de chaux. [14]

L'amélioration de la portance de la marne traitée (augmentation de CBR et IPI) est justifiée par la diminution du volume des vides dans le sol qui est due à la bonne distribution des particules du sol avec les particules fins de l'additive chaux. [14]

❖ **Détermination de l'indice de compressibilité (Cc) et de l'indice de gonflement (Cg)**

A l'état naturel de la marne étudiée, les valeurs de Cc et Cg sont respectivement 3.32 % et 4.11%, ce qui donne une marne argileuse très peu compressible et gonflante

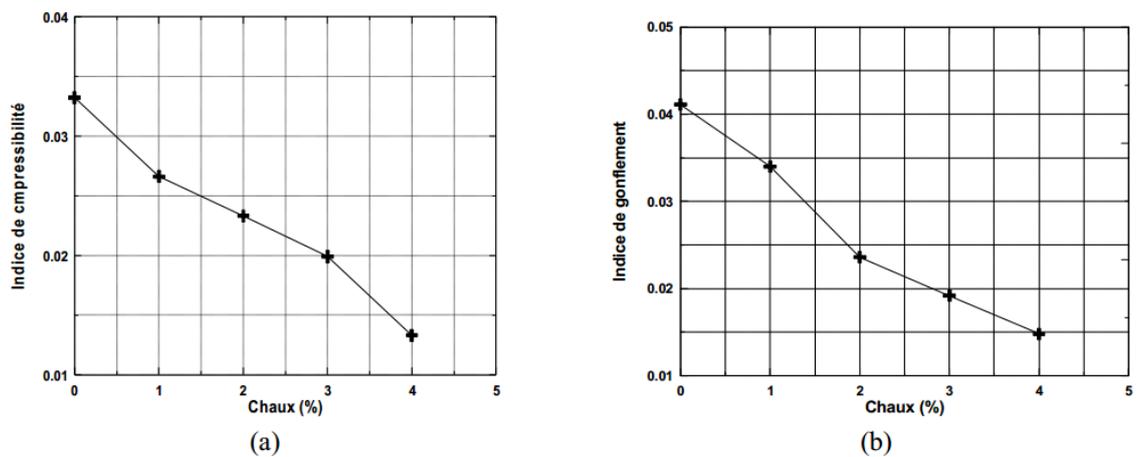


Figure II.14 : Variation des paramètres de compressibilité en fonction du pourcentage en chaux additionnée (a) l'indice de compressibilité Cc (b) indice de gonflement Cg.

[14]

II.10. Les étapes de traitement (traiter le sol en place) :

II.10.1. Préparation du sol à traiter

Cette opération, visant à faciliter le malaxage ultérieur, consiste à procéder à l'ouverture du sol au scarificateur ou au ripper. [52]



Figure II.15 : Vue générale d'un chantier de traitement de sol. [52-53]

II.10.2. Ajustement de l'état hydrique du sol

Une teneur en eau optimale est indispensable pour obtenir, après compactage du mélange sol-liant, une densité maximale. Ainsi, il est possible soit d'assécher le sol par brassage mécanique, soit de l'humidifier avec une arroseuse avec rampes à eau, gicleurs ou systèmes enfouisseurs. [52]



Figure II.16 : Arroseuse. [52]

II.10.3.Épandage du liant

Pour réduire et maîtriser la dispersion du liant, il est préférable de retenir dans le cas de chantiers moyens ou importants – un épandeur à dosage pondéral, asservi à la vitesse d’avancement. Le contrôle de la régularité de l’épandage et de la quantité des liants est réalisé par la méthode dite “à la bêche”. [52]



Figure II.17 : Epandage du liant. [52-53]

II.10.4.Malaxage

Pour assurer une bonne homogénéité du matériau et une profondeur importante du malaxage, il est judicieux de retenir un malaxeur ou un pulvimixer à rotor horizontal. D’autre part, le malaxage foisonnant énormément les matériaux, il faut veiller lorsqu’on traite par bandes jointives – à mordre suffisamment (20 cm) dans la partie déjà foisonnée, pour ne pas laisser de matériau non malaxé en bordures de bandes. [52]



Figure II.18 : Malaxage. [52-53]

II.10.5.Compactage partiel

La qualité du compactage est, en général, déterminée par un objectif de densification. Ainsi, pour le compactage des remblais, l’objectif de densification est une énergie de compactage, qui correspond succinctement à 95 % de la densité optimale de l’essai Proctor Normal et pour le compactage des couches de forme. [52]

Il est une énergie de compactage qui correspond succinctement à 98,5 % de la densité optimale de l'essai Proctor Normal. Le guide technique Sétra / LCPC sur la "Réalisation des remblais et des couches de forme" (GTR) de septembre 1992 donne une détermination pratique des conditions de compactage, sur la base du paramètre Q/S, "épaisseur unitaire de compactage" (Q étant le volume de sol compacté pendant un temps donné et S la surface balayée par le compacteur pendant le même temps).

L'atelier de compactage, ainsi que le nombre de passes nécessaires, seront définis sur une planche d'essais de compactage,



Figure II.19 : Compactage partiel. [52-53]

En respectant les épaisseurs de couches à compacter et en appliquant un plan de balayage répartissant l'énergie de compactage sur toute la surface de la couche. Le compactage partiel doit suivre sans tarder la fin du malaxage pour ne pas laisser un matériau foisonné exposé aux intempéries et doit apporter 70 à 80 % de l'énergie exigée pour obtenir la qualité de compactage recherchée suivant la couche considérée

II.10.6. Réglage

Le réglage définitif doit se faire par rabotage sur toute la largeur à régler et en aucun cas par comblement des points bas par les matériaux provenant de l'écrêtage des bosses. Il se fait le plus souvent à la niveleuse. Les matériaux provenant du rabotage doivent être évacués. [52]

L'épaisseur à raboter doit être prise en compte au stade du traitement, en prévoyant une surépaisseur suffisante du matériau traité (environ 3 cm).

II.10.7. Compactage final

Il doit être réalisé immédiatement après le réglage final et dans tous les cas, avant expiration du "délai de maniabilité" du mélange sol-liant, pour apporter le complément

de l'énergie exigée pour obtenir la qualité de compactage recherchée suivant la couche considérée.



Figure II.20 : Compactage final. [52]

II.10.8. Protection de surface

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



Figure II.21 : Protection de surface de la couche traitée. [52]

Les travaux de construction des remblais et des couches de formes représentent une part importante du coût global de réalisation des projets routiers. Cette importance justifie une recherche d'optimisation globale, visant à minimiser les coûts. [52]

L'optimisation des solutions techniques consiste, d'abord, en un choix judicieux de tracé en plan et de profil en long des terrassements pour limiter au maximum les mouvements de terre en fonction de la qualité des matériaux exigés. Optimiser, c'est aussi déterminer le couple couche de forme/chaussée le mieux adapté.

II.11.Conclusion :

Le traitement des sols permet d'utiliser des sols qui, dans leur état naturel, ne peuvent être mis en œuvre (difficultés de réaliser des travaux de terrassement, problèmes de circulation des véhicules, difficulté d'obtention d'une compacité suffisante) et évite ainsi le recours à des solutions coûteuses (mise en décharge de terres excavées et apport de matériaux de remplacement).

Actuellement, cette technique du traitement des sols connaît un important regain d'intérêt en raison du renforcement des législations environnementales et de la pression croissante sur les matières premières

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

De nombreux chercheurs ont étudié différentes méthodes avec différents ajouts en vue de stabiliser ces formations évolutives, C'est pourquoi cette étude a consacré pour d'étudier l'influence du traitement à base d'ajouts de déchets de céramique, marbre et liant hydrauliques sur notre sol comme une nouvelle solution.

Chapitre III :

Méthodologie

III.1.Introduction :

Pour bien comprendre le phénomène de stabilisation du sol, dans ce chapitre on présente les matériaux de traitement (déches de céramique ; poudre de marbre et ciment CEM / II .42.5 MPA).et le sol utilise les matériaux ajouté au ce dernier sont en pourcentage volumique.

On décrira les différents essais effectuer d'identification en laboratoire (Analyse granulométrique, Limites d'Atterberg, la teneur en eau) et les différents essais mécaniques (Proctor modifier, CBR) ainsi nous allons site le mode opératoire de chaque essai effectué en se référant à la norme en vigueur.

III.2.Matériaux utilisé :

III.2.1. Le Sol étudié :

Dans notre étude on a choisi des matériaux provenant de la zone **TIXTER** une commune de la région Aïn Taghrouit de Bordj Bou Arreridj.



Figure III.1 : Zone de prélèvement de sol.



Figure III.2 : Photo du sol utilisé.

III.2.1.1. Propriétés chimiques :

III.2.1.1.1. Diffraction des rayons X (DRX) du Sol utilisé :

La découverte des rayons X a été faite par Wilhelm Conrad Röntgen en 1895. Ce moyen de caractérisation est souvent utilisé afin de connaître le degré de cristallinité d'un matériau et pouvoir montrer la direction de croissance cristallographique préférentielle des grains constituant la matière. C'est une méthode privilégiée pour caractériser les couches minces. Facile à mettre en œuvre et non destructive, la technique utilisée dans l'étude cristallographique des solides ayant des structures ordonnées (cristaux) provoque un phénomène discontinu (contrairement aux gaz, aux liquides et aux solides amorphes dont le comportement vis-à-vis des rayons X donne lieu à un phénomène de diffusion continue) en ne renvoyant le faisceau X incident que dans certaines directions privilégiées [55].

Le principe d'analyse repose sur la diffraction des rayons X monochromatiques par les plans atomiques des cristaux du matériau étudié (figure III-3). La diffraction aura lieu seulement dans les matériaux cristallisés. L'interaction des rayons X avec la matière entraîne une diffusion cohérente qui est caractérisée par le fait que [56-57] :

- le champ électromagnétique des RX incidents fait vibrer les électrons des atomes du cristal.
- chaque atome devient alors une source de rayons de même longueur d'onde que les RX incidents. Et lorsque la relation de Bragg est vérifiée :

$$2d_{hkl} \sin \theta = n\lambda$$

- **n** : Nombre entier qui est l'ordre de diffraction.
- **λ** : Longueur d'onde du faisceau incident.
- **d_{hkl}** : Distance inter-réticulaire.
- **θ** : Angle de faisceau incident par rapport au plan réticulaire.

Le diffractomètre employé dans ce travail est de type : Philips X-Pert Pro (cimenterie d'Ain el kebira). Les rayons X ont été produits à partir d'une source de radiation Cu K α , ayant une longueur d'onde de $\lambda = 1.5418 \text{ \AA}$.

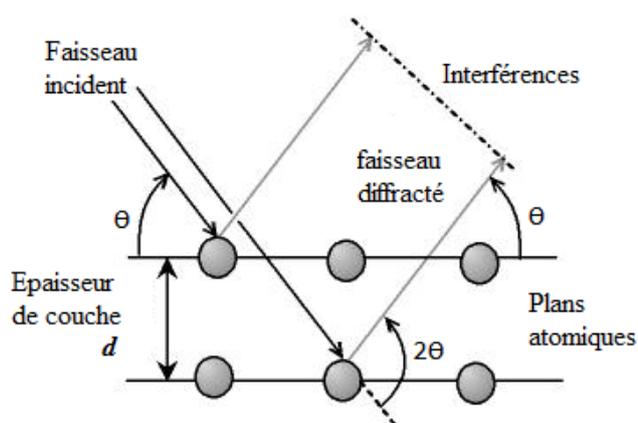


Figure III.3 : Schéma du principe de la diffraction des rayons X.



Figure III.4 : Appareil Diffraction des rayons X (DRX).

Dans ce cadre, une analyse chimique quantitative réalisée par fluorescence X a été déterminée la composition chimique de notre sol, les résultats sont résumés dans le tableau suivant :

Tableau III.1 : La composition chimique de l'échantillon de sol

Minéraux	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	Cl	PAF
%	21.10	6.06	3.00	34.54	1.36	0.24	0.56	0.13	0.003	33.01

III.2.2.Céramique :

La céramique utilise pour les expériences effectuées au niveau de laboratoire ; se présente se forme d'un déchet qui nous allons broyer et tamiser par le tamis numéro 5 mm



Figure III.5 : Concassage de céramique .

III.2.3.Poudre de marbre :

La poudre de marbre ajouté au sol pendant les essais représente le déchet de marbre de découpage des roches de marbre.



Figure III.6 : Poudre de marbre.

III.2.4.Ciment :

Le liant hydraulique utilisé est un ciment portland composé obtenu par un mélange finement broyé de clinker et d'ajouts, Le sulfate de calcium est ajouté sous forme de gypse en tant que régulateur de prise. Provient de l'usine d'Ain-El-Kebira Le produit a comme identification CPJ-CEMII/A 42, 5.



Figure III.7 : Ciment utiliser.

III.3.Essai de Teneur en Eau (NF P 94-050)

III.3.1.Principe de la détermination de la teneur en eau :

La perte d'eau d'un échantillon de matériau est provoquée par étuvage. Les masses de l'échantillon et de l'eau évaporée sont mesurées par pesage.

III.3.2.Appareillage :

- Etuve réglable à 50°C et à 105°C ;
- Balance permettant les pesées avec une incertitude maximale de 1/1000 de la pesée ;
- Des capsules en métal ou boîtes de pétri. Des spatules, une truelle.



Figure III.8 : Appareillage –Teneur en eau (NF P 94-050)

III.3.3.Mode opératoire :

1. Prélever un échantillon de sol représentatif, sa masse est choisie en fonction de la dimension des éléments qu'il contient.
2. Placer le prélèvement sur une capsule.
3. Peser immédiatement, soit P_h .
4. Mettre à l'étuve à 105°C pour les matériaux insensibles à la chaleur et à 50°C pour les matériaux sensibles à la chaleur (les matériaux gypsifères, latéritiques ou s'ils contiennent des matières organiques), jusqu'à dessiccation complète et poids stable (la durée totale de séchage peut donc varier entre quelques heures et plusieurs jours).
5. Peser l'échantillon sec immédiatement à la sortie de l'étuve, ou après refroidissement dans un dessiccateur, soit P_s .

III.3.4.Expression des résultats :

$$\omega (\%) = \frac{P_h - P_s}{P_s} \times 100$$

Avec :

ω : teneur en eau (exprimée en%).

P_h : poids de sol humide en (g).

P_s : poids de sol sec en (g).

III.4. Essai d'Analyse Granulométrique (NF P 94-056) :

III.4.1. Généralité :

L'essai granulométrique est une manipulation de laboratoire qui permet de classer les grains d'un sol en fonction de la taille des grains. Pour cela on utilise des tamis, de tailles de mailles différentes, empilés. Celui qui a la maille la plus grande est au-dessus. Une quantité de sol est mise en partie supérieure. L'ensemble est remué. Les grains passent à travers les mailles et sont arrêtés par une maille plus petite que leur taille. La quantité passée s'appelle "**tamisât**". La quantité retenue s'appelle "**refus**". Puis on pèse chaque refus (Cet essai sera prochainement vu en laboratoire). Ces données sont traitées pour obtenir une courbe.

III.4.2. Objectif :

C'est un essai qui a pour objet de déterminer la répartition des grains suivant leur dimension ou grosseur. Les résultats de l'analyse granulométrique sont donnés sous forme d'une courbe dite courbe granulométrique et construite sur un graphique.

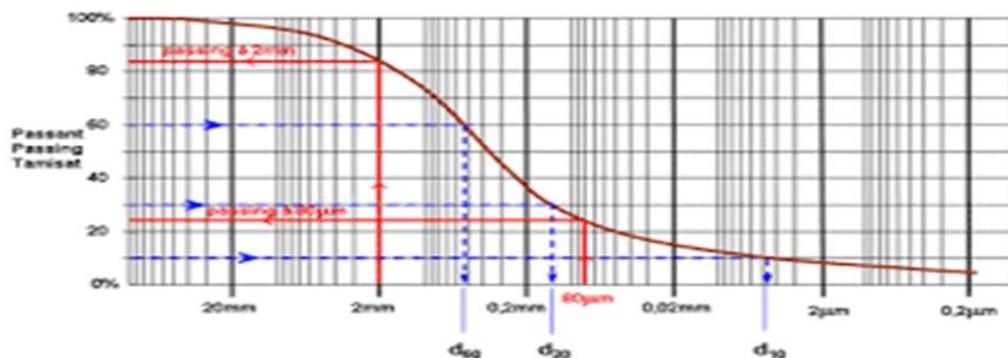


Figure III.9 : La courbe granulométrique.

Les dimensions des tamis correspondant à d_{10} , d_{30} et d_{60} sont interpolées graphiquement sur la courbe. A partir de ces résultats on peut calculer le facteur de courbure C_c et le facteur d'uniformité (coefficient de Hazen) C_u

III.4.3. Principe de l'essai :

L'essai consiste à classer les différents grains constituant l'échantillon en utilisant une série de tamis, empilés les uns sur les autres, dont les dimensions des ouvertures sont décroissantes du haut vers le bas. Le matériau étudié est placé en partie supérieure des tamis et les classements des grains s'obtiennent par vibration de la colonne de tamis.

III.4.4. But de l'essai :

L'analyse granulométrique permet de déterminer la grosseur et les pourcentages pondéraux respectifs des différentes familles de grains constituant l'échantillon.

III.4.5. Appareillage :

- Une série de tamis normalisés avec couvercle et fond pesés préalablement
- Une balance
- Un Tamiseur électrique
- Un Etuve



Figure III.10 : Appareillage – essai granulométrique.

III.4.6. Mode opératoire :

- 1- Préparer les tamis d'ouvertures nécessaire
- 2- Peser ces tamis vide
- 3- Dresser la colonne des tamis de telle manière que la progression des ouvertures soit croissante du bas de la colonne vers le haut. le fond étanche et le couvercle sont disposés respectivement en bas en haut de la colonne.
- 4- Peser deux kilogramme de sol
- 5- Verser le sol en haut de colonne de tamis puis fermer le couvercle
- 6- Procéder manuellement puis automatiquement à l'agitation de la colonne pendant environ 5 min.
- 7- Peser les tamis avec les refus partiels en commençant par le tamis supérieur (la masse perdue lors du tamisage ne doit pas dépasser 1% de la masse de la prise).

III.5. Essai Limites d'Atterberg (NF P 94-051) :

III.5.1. Généralités :

Atterberg, ingénieur agronome suédois, a défini en 1911, des teneurs en eau limites qui séparent le passage du sol d'un état de consistance à un autre. Ces teneur en eau particulière sont appelées limites de consistance ou limites d'atterbrg, et casagrande a repris plus tard ce lesquelles la transition s'effectue.

III.5.2. Définition :

La consistance d'un sol fin varie avec sa teneur en eau, la limite de liquidité W_L (teneur en eau pondérale) sépare l'état liquide de l'état plastique, la limite de plasticité W_P (teneur en eau pondérale) sépare l'état plastique de l'état solide. La limite de retrait W_S ou (W_r) est la teneur en eau pondérale au-dessous de laquelle le volume de l'échantillon ne varier plus.

Les limites d'Atterberg sont déterminées uniquement pour les éléments fins d'un sol (fraction passant au tamis de **0,4 mm**), car se sont les seuls éléments sur lesquels l'eau agit en modifiant la consistance du sol.

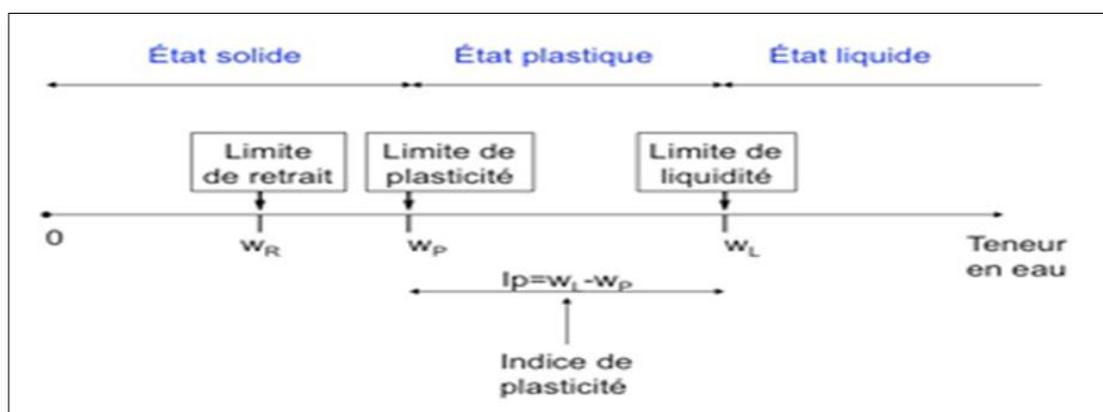


Figure III.11 : Représentation des limites d'Atterberg.

III.5.3. But de l'essai :

Déterminer la limite de liquidité W_L et la limite de plasticité W_P qui sont des teneuses en eau pondérales, caractéristiques du sol. Ces résultats permettent de prévoir le comportement des sols sous l'action des variations de teneur en eau.

III.5.4.Appareillage :

III.5.4.1.Pour la préparation du sol :

- Tamis à mailles carrées de 0.4mm d'ouverture ;
- Récipient.

III.5.4.2.Pour la détermination de W_L :

Appareil de Casa grande (NF P 94-051), il est constitué d'une coupelle normalisée (coupelle lisse pour la majorité des essais et coupelle rugueuse pour les échantillons sableux qui ont tendance à glisser sur la surface de la coupelle lors de chaque choc), montée sur un support métallique avec manivelle, le tout étant fixé sur un socle en bois dur. L'ensemble permet de faire tomber la coupelle d'une hauteur de 10 mm sur le socle, chaque choc entraînant la fermeture progressive de la rainure pratiquée dans l'échantillon de sol, celle-ci ayant été effectuée à l'aide de l'outil à rainurer.



Figure III.12 : Appareil de Casagrande.

III.5.4.3.Pour la détermination de W_P :

- Une plaque de verre et sa cale pour l'évaluation du diamètre du rouleau de sol.
- un calibre de \varnothing 3 mm.
- des tares.



Figure III.13 : Appareillage nécessaire pour déterminer W_P .

III.5.5.Mode opératoire (NF P94-051) :

➤ **Détermination de la limite de liquidité W_L :**

1. Prendre environ 200g de sol préalablement tamisé au tamis de 0,4 mm par voie sèche.
2. Malaxer la totalité de la prise de telle sorte à obtenir une pâte quasi homogène et fluide.
3. Mettre en place une partie de la pâte en l'étalant avec une spatule (épaisseur au centre est de 15 à 20 mm).
4. Creuser une rainure dans cette pâte dans l'axe de la coupelle, l'outil étant sensiblement perpendiculaire à celle-ci.
5. Tourner la manivelle, de manière très régulière, à raison de 2 chocs par seconde.
6. Compter le **nombre de coups** nécessaires pour que les deux lèvres se referment sur **1 cm** environ.

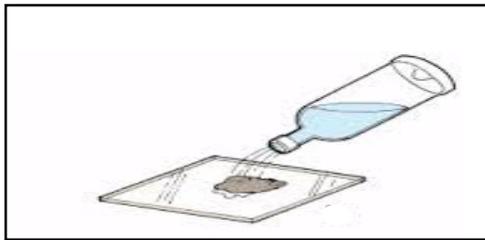


Figure III.14 : Déroulement de l'essai –limite d'Atterberg.

➤ Détermination de la limite de plasticité W_P :

La limite de plasticité W_P est inférieure à W_L . Il faut donc laisser sécher l'échantillon un peu plus. Quand sa teneur en eau est correcte, faire une boulette de mortier grosse comme une noisette (environ 12 mm de diamètre) et en faire un cylindre en la roulant sur la plaque de marbre propre ; lisse et sèche. Ceci se fait à la main, ou en utilisant une plaque plane, par un mouvement alternatif d'environ un aller et retour par seconde.

Par définition, la limite de plasticité est la teneur en eau du cylindre qui se brise lorsque son diamètre atteint 3mm. Cette teneur en eau doit être déterminée immédiatement après le test selon la procédure décrite lors de la détermination de W_L . Le cylindre terminé doit avoir 10 à 15 cm de longueur.

Dans la pratique, procéder ainsi :

1. Confectionner le cylindre de 3 mm ;
2. S'il se brise avant d'atteindre ce diamètre le matériau est trop sec, il faut alors le remodifier également ;
3. S'il ne s'est pas brisé. Le soulever en son milieu de 15 à 20 mm. La limite de plasticité est atteinte si la rupture se produit pendant ce soulèvement. On effectue alors directement la mesure de la teneur en eau W sur le rouleau de sol
4. Si la rupture ne se produit pas, laisser le teneur en eau diminuer

L'essai est effectué une deuxième fois. Les teneurs en eau obtenues ne devront pas s'écarter de plus de 2 % de la valeur moyenne, si non un nouvel essai est à effectuer.



Figure III.15 : Détermination de la limite de plasticité.

La détermination des limites d'Atterberg permet de calculer les paramètres :

Indice de plasticité I_P : Cet indice définit l'étendue du domaine plastique du sol entre les limites de liquidité et de plasticité

$$I_P = W_L - W_P$$

Tableau III.2 : Type de sol en fonction de I_P .

Indice de plasticité (%)	Type de sol
$< 1\%$	Pulvérulent
$1\% < I_P < 7\%$	Sable argileux
$7\% < I_P < 17\%$	Argile sableuse
$I_P > 17\%$	Argile

Indice de consistance I_C : Cet indice prend la teneur en eau W du sol à l'état naturel pour la fraction inférieure à 0.4mm

$$I_C = \frac{W_L - W}{I_P}$$

Tableau III.3 : Etat de consistance du sol en fonction de I_C .

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

L'indice de liquidité « I_L » :

$$I_L = \frac{W - W_P}{I_P}$$

Tableau III.4 : Etat de consistance du sol en fonction de I_L .

Indice de liquidité	Consistance du sol
$I_L < 0$	Très dure
$0 < I_L \leq 1$	Dure à très plastique
$I_L > 1$	Fluide

La classification des sols fins utilise les critères de plasticité liés aux limites d'Atterberg. Elle est précisée dans le diagramme de plasticité ci - après (fig.2). Selon la position dans le diagramme du point représentatif ayant pour abscisse la limite de liquidité et pour ordonnée l'indice de plasticité, on définit quatre grandes catégories principales :

- les limons très plastiques L_t
- les limons peu plastiques L_p
- les argiles très plastiques A_t
- les argiles peu plastiques A_p

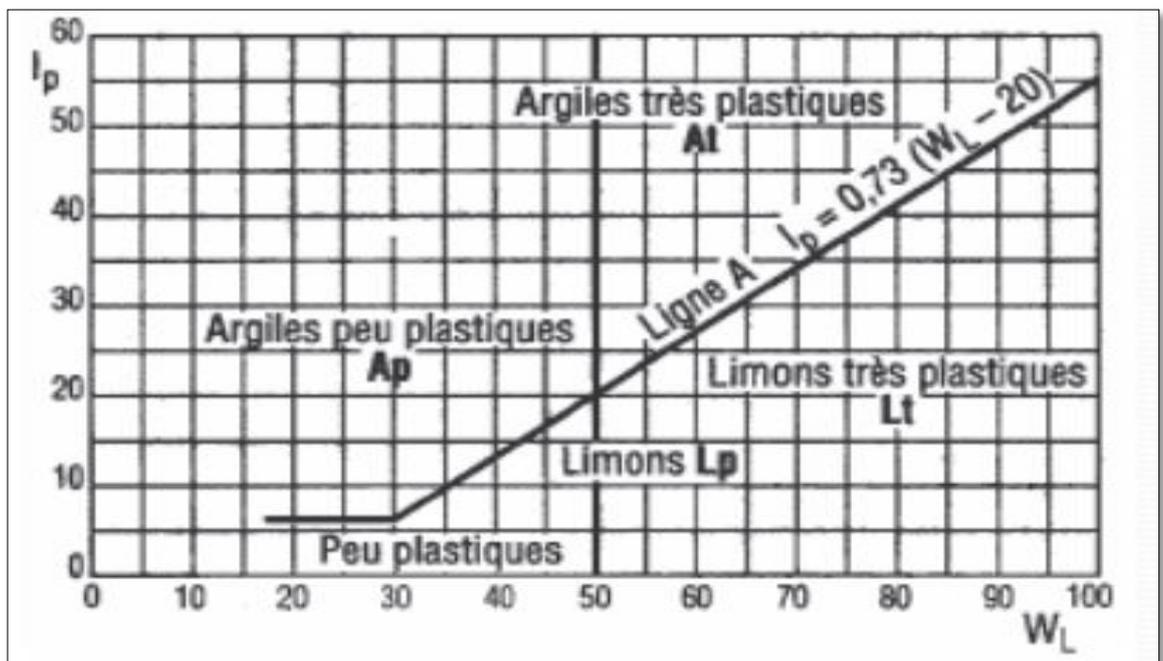
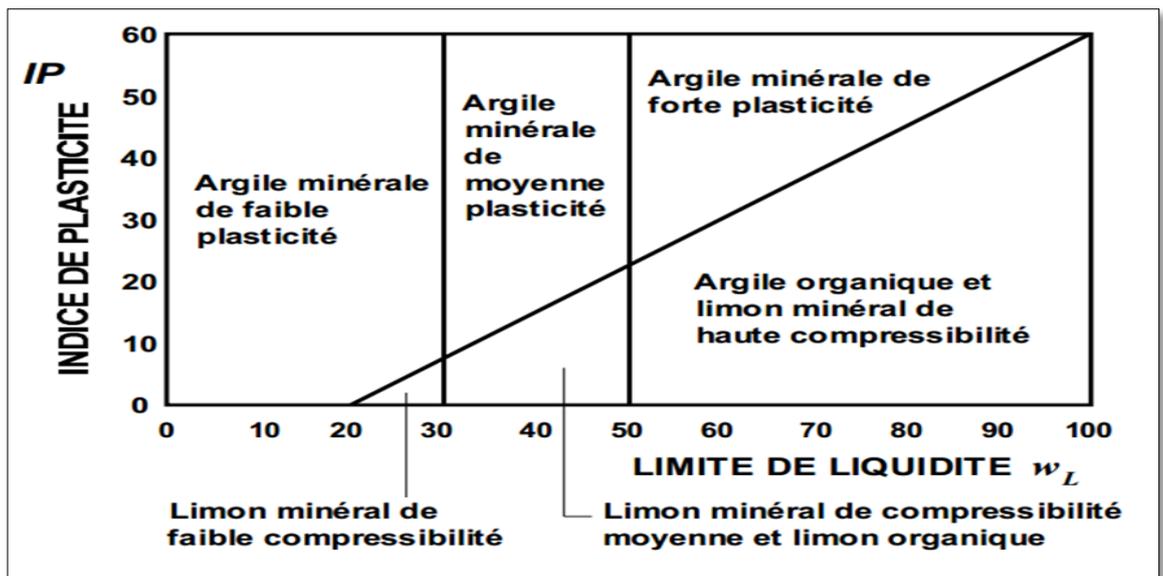


Figure III.16 : Abaque de plasticité de Casagrand

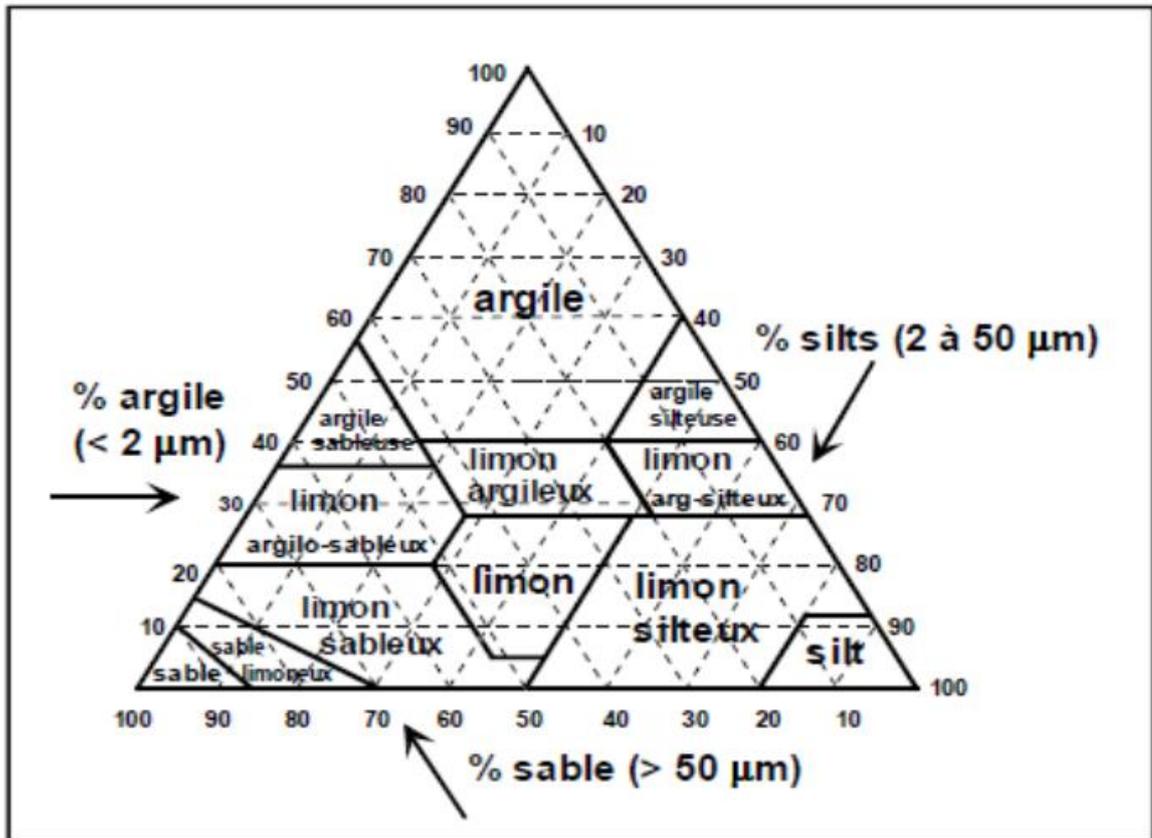


Figure III.17 : Classification triangulaire des sols fins (Contenant moins de 30 % d'éléments de diamètre supérieur à 2 mm)

III.6. Essai Proctor Modifier (NF P 94-093) :

III.6.1. Généralité :

L'essai Proctor, mis au point par l'ingénieur Ralph R. Proctor (1933), est un essai géotechnique qui permet de déterminer la teneur en eau nécessaire pour obtenir la densité sèche maximale d'un sol granulaire (ou non) par compactage à une énergie fixée (poids de dame, nombre de coups et dimensions normés).

Le protocole de l'essai Proctor suit la norme NF P 94-093 (détermination des références de compactage d'un matériau). Les valeurs obtenues par l'essai sont notées W_{OPN} pour la teneur en eau optimale, et γ_{OPN} pour la masse volumique sèche optimale. Une autre référence peut être déterminée pour une énergie supérieure (notamment pour des couches de chaussées granulaires), il s'agit de l'optimum Proctor modifié (OPM).

III.6.2. Définition du compactage :

Le sol est utilisé comme matériau pour la construction d'ouvrage en terre (corps de remblai, des couches de formes et d'assise de chaussées). Il est bien connu, la résistance d'un sol est d'autant plus forte et sa déformabilité est d'autant plus faible que les grains de ce sol sont serrés et rapprochés. Pour détenir un remblai de bonne qualité (résistant et peu déformable) on a recours au compactage du sol. On appelle compactage, l'opération qui consiste à accroître la densité en place du sol par des moyens mécaniques appropriés. On dit que l'opération de compactage augmente la compacité du sol, resserre la texture des grains, réduit la déformabilité et augmente la résistance du sol. L'expérience montre que pour un sol donné, la compacité obtenue lors d'une opération de compactage varie avec la teneur en eau de compactage et avec l'intensité ou l'énergie de compactage.

III.6.3. L'objet de l'essai :

Le compactage d'un sol vise à améliorer les propriétés géotechniques des sols, Il est fonction de quatre principales variables :

- La masse volumique du sol sec.
- La teneur en eau.

- L'énergie de compactage.
- Le type de sol (étalement granulométrique, présence de minéraux argileux, etc)

III.6.4. But de l'essai :

L'essai Proctor a pour but de déterminer la teneur en eau optimale pour un sol de remblai donné et des conditions de compactage fixées, qui conduit au meilleur compactage possible ou encore capacité portante maximale.

III.6.5. Principe de la méthode :

L'essai consiste à compacter dans un moule normalisé, à l'aide d'une dame normalisée, selon un processus bien défini, l'échantillon de sol à étudier et à mesurer sa teneur en eau et son poids spécifique sec après compactage l'essai est répété plusieurs fois de suite sur des échantillons portés à différentes teneurs en eau. On définit ainsi plusieurs points d'une courbe (γ_d ; ω), on trace cette courbe qui représente un maximum dont l'abscisse est la teneur en eau optimale et l'ordonnée la densité sèche optimale

III.6.6. Appareillage nécessaire :

- Moule CBR (éventuellement Proctor),
- Compacteur électrique
- Dame Proctor modifié,
- Règle à araser,
- Disque d'espacement,
- Bacs d'homogénéisation pour préparation du matériau,
- Tamis 5 et 20 mm (contrôle et écrêtage le cas échéant de l'échantillon),
- Truelle, spatule, pinceau, etc...
- Eprouvette graduée,
- Tare (mesures des teneurs en eau),
- Balance portée 20 kg, précision ± 5 g,
- Balance de précision 200 g, précision $\pm 0,1$ g,
- Etuve $105^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$,
- Burette à huile.

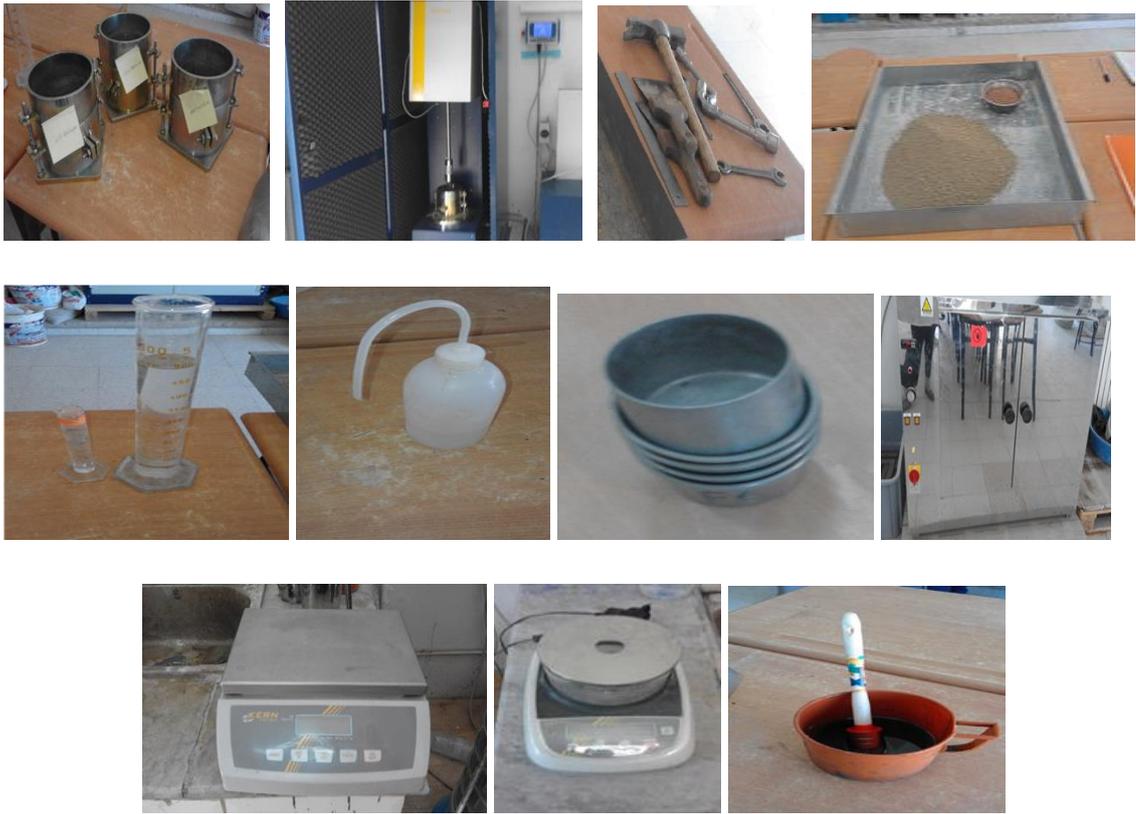


Figure III.18 : Appareillage – essai Proctor.

III.6.7. Mode opératoire :

- 1- Peser l'ensemble du moule vide + embase (soit P_m). Mettre en place la hausse.
- 2- Prendre 5 Kg de sol passé au tamis de 5 mm.
- 3- Ajouter 8% d'eau à cette quantité, l'homogénéiser et partager en Cinq.
- 4- Introduire la 1^{ère} couche de sol et la compacter en 56 coups.
Scarifier la surface compactée.
- 5- Procéder de manière identique pour les quatre couches suivantes.
- 6- Enlever délicatement la hausse et araser soigneusement le moule, le nettoyer puis le peser (soit P_h).
- 7- Enlever l'embase et prélever deux prises sur l'échantillon, l'une en haut et l'autre en bas, et en déterminer la teneur en eau (On prendra la moyenne des deux valeurs).



Figure III.19 : Déroulement de l'essai – Proctor.

III.7. Essais CBR (California Bearing Ratio)

III.7.1. 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.7.2. Définition :

L'essai CBR est un essai qui caractérise la portance d'un sol du point de vue routier. Il s'agit d'un essai totalement empirique et qui n'est pas relié aux caractéristiques intrinsèques (ϕ , c) du matériau étudié. L'échantillon de sol étudié est compacté dans un moule (moule CBR $\phi = 15,2$ cm, hauteur : 15,2 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.

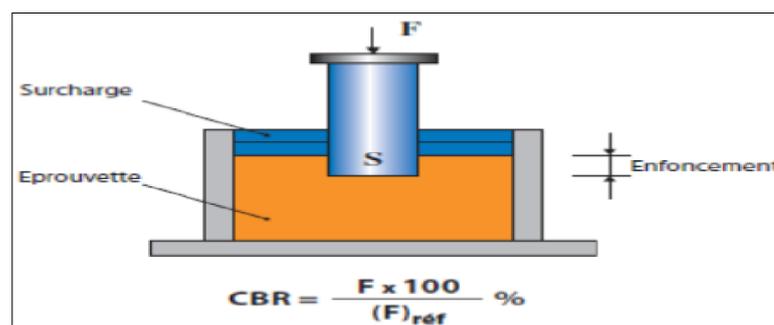


Figure III.20 : Schéma de principe de l'essai CBR.

III.7.3. 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 \Rightarrow épaisseur diminue).

III.7.4.Appareillage nécessaire :

- moules standard CBR
- Disques d'espacement de 151mm de diamètre et 25,5mm d'épaisseur
- 1 dame Proctor modifiée constituée par un mouton de 4,530kg et la hauteur de chute de 457mm actionnée manuellement ou mécaniquement.
- Des disques de surcharge annulaire en plomb de 2,265kg en deux parties de diamètre extérieur de 150mm de diamètre intérieur de 27mm.
- 1 appareil de mesure de gonflement comprenant un trépied pouvant s'adapter sur la face supérieure 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 piston cylindrique ayant une section de 19,6cm² et approximativement 200mm de long.
- 1 presse hydraulique de 60kn pouvant assurer une vitesse de poinçonnement de 1,27 mm / minute.
- Des bacs de contenance de 35kg environ
- Pelle à main, truelles, mains métalliques, pinceau
- des disques de papier filtre correspondant aux côtés moule CBR
- Couteau maillet, burin, marteau, plane à araser.



Figure III.21 : Appareillage – essai CBR.

III.7.5.Principe de l'essai :

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

Trois types d'indices CBR sont à distinguer :

- **CBR immédiat :** il correspond au poinçonnement d'une éprouvette confectionnée immédiatement après son compactage ;



Figure III.22 : CBR immédiat

- **CBR après plusieurs jours** (généralement 7, 14 ou 28 jours selon l'application) ;



Figure III.23 : CBR du sol traité en liant hydraulique après plusieurs jours (7j ; 14j ; 28j).

- **CBR après immersion** : il correspond au poinçonnement d'une éprouvette confectionnée après immersion dans l'eau durant 24 h à 20°C. Ceci simule un sol humidifié après son compactage en place.



Figure III.24 : CBR du sol traité en liant hydraulique après immersion.

III.7.6. Mode opératoire :

- 1-peser l'ensemble du moule vide + embase (soit P_m)
- 2-Prendre 5Kg de sol sec passée au tamis 5mm
- 3-Ajouter W (opt) de l'essai de Proctor.
- 4-Introduire la 1^{er} couche de sol et compacter en 56 coups. Scarifier la surface compactée.
- 5-Procéder de manière identique pour les couches suivantes.
- 6-Enlever l'embase et prélever deux prises sur l'échantillon, l'une en haute et l'autre en bas, et en déterminer la teneur en eau (On prendra la moyenne des deux valeurs)
- 7-Placer l'ensemble dans la machine et lire la force et déplacements.



Figure III.25 : Déroulement de l'essai –CBR.

III.7.7. Portance du sol :

La portance d'un sol est la caractéristique qui définit sa capacité à supporter les charges qui lui sont appliquées. La portance dépend de la nature du sol, du pourcentage d'eau et du degré de compactage. Quel que soit le sol, sa résistance mécanique augmente avec sa densité en faisant passer plusieurs fois des engins lourds qui assurent le compactage. La portance du sol et sa teneur en eau optimum sont déterminés par l'essai Proctor. Les paramètres de portance obtenus suite à l'essai de poinçonnement immédiat et après quatre jours d'immersion.

III.7.8. 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 :

$$I_1 = \frac{\text{Effort de penetration a 2.5 (KN)}}{13.35 \text{ KN}} \times 100$$

$$I_2 = \frac{\text{Effort de penetyration a 5 mm (KN)}}{19.93 \text{ KN}} \times 100$$

$$I.CBR = \max (I.CBR_{2,5} ; I.CBR_5)$$

Tableau III.5 : 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.8.Conclusion

Quelque soient les objectifs recherchés dans une étude géotechnique, il est de règle d'effectuer initialement l'identification des sols concernés. Cette procédure permet d'orienter les analyses géotechniques ultérieures et surtout d'effectuer une classification des matériaux rencontrés. Les paramètres nécessaires pour cette classification sont aussi bien de natures physico-chimiques et mécaniques.

Ainsi L'analyse du comportement mécanique des sols repose sur des essais de laboratoire ou sur site. Cette discipline permet de déterminer la résistance du sol et sa capacité portante, et par conséquent, elle permet de prévoir de façon quantitative la déformation ou tassement.

Ce chapitre a été consacré à l'identification des matériaux désirés pour cette étude qui sont : le sol, le déchet céramique, le déchet de marbre et le liant hydraulique (ciment). Il contient tous les essais effectués au niveau de laboratoire de l'université.

Chapitre IV :

Résulta et discussions

IV.I. 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 d'ajouts hydraulique, de déchet de céramique et de la poudre de marbre. Les essais sont agencés comme suit : Essais d'identification (L'analyse par diffraction aux rayons X, la teneur en eau, Analyse granulométrique, Limites d'Atterberg) et essais mécaniques (Proctor modifier, CBR). Ces résultats sont représentés sous forme de tableaux et de courbures.

IV.1. L'analyse par diffraction aux rayons X

Tableau IV.1 : La composition chimique de l'échantillon de sol (Cimenterie d'Ain el kebira).

Minéraux	SiO ₂	AL ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	Cl	PAF
%	21.10	6.06	3.00	34.54	1.36	0.24	0.56	0.13	0.003	33.01

IV.2. Teneur en Eau (NF P 94-050) :

$$\omega (\%) = \frac{Ph-Ps}{Ps} \times 100 = \frac{100-94}{94} \times 100 = 6.38\%$$

IV.3. Analyse Granulométrique (NF P 94-056) :

IV.3.1. Analyse granulométrique du sol :

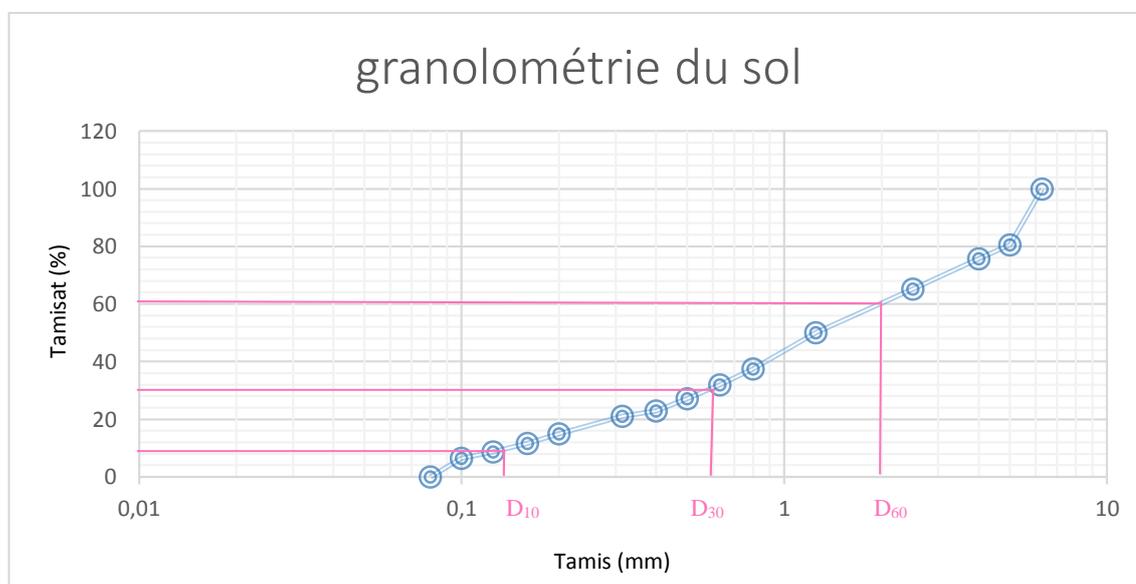


Figure IV.1 : La courbe granulométrique du sol.

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

$$D_{10} = 0,15 \text{ cm}$$

$$D_{30} = 0,65 \text{ cm}$$

$$D_{60} = 1,96 \text{ cm}$$

$$C_U = \frac{D_{60}}{D_{10}} = \frac{1,96}{0,15} = 13,07 > 6$$

$$C_C = \frac{(D_{30})^2}{D_{10} \times D_{60}} = \frac{(0,65)^2}{(0,15 \times 1,96)} = 1,44$$

$1 < C_C = 1,44 < 3$, Sol propre bien graduée.

IV.3.2. Analyse granulométrique de la céramique :

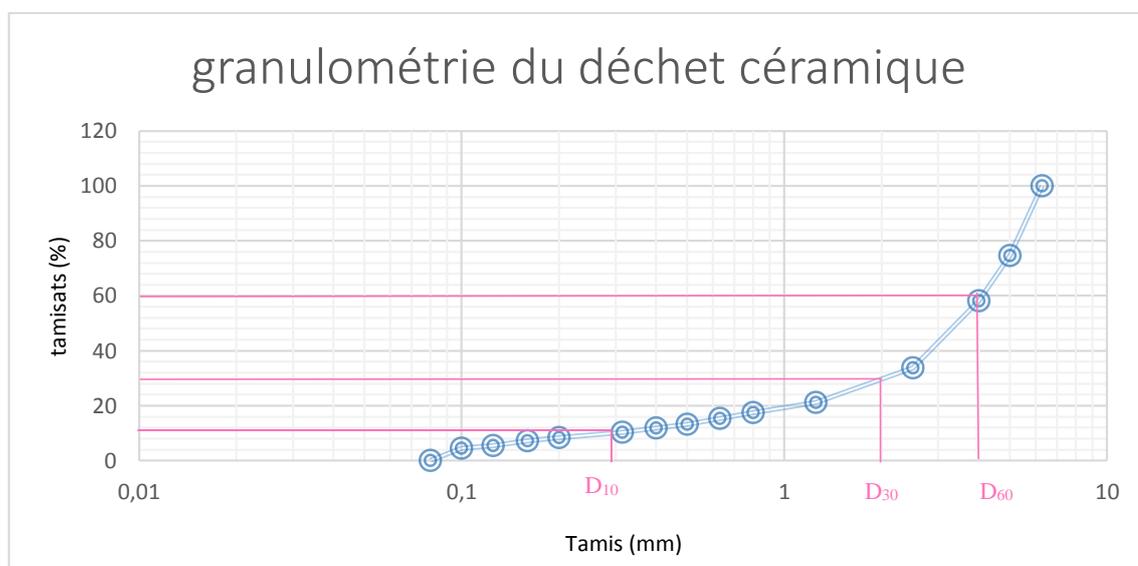


Figure IV.2 : La courbe granulométrique de la céramique.

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

$$D_{10} = 0,32 \text{ cm}$$

$$D_{30} = 2,03 \text{ cm}$$

$$D_{60} = 4,1 \text{ cm}$$

$$C_U = \frac{D_{60}}{D_{10}} = \frac{4,1}{0,32} = 12,81 > 4$$

$$C_C = \frac{(D_{30})^2}{D_{10} \times D_{60}} = \frac{(2,03)^2}{(0,32 \times 4,1)} = 3,14$$

$C_C = 3,14 > 3$, Céramique propre mal graduée.

IV.4. Limites D’Atterberg (NF P 94-051) :

IV.4.1.Représentation des résultats

IV.4.1.1.100% sol

Tableau IV.2 : Résultat essai limite d’Atterberg (100% sol).

Echantillon		Limite de liquidité			limite de plasticité		
		1	2	3	1	2	3
ESSAIS N							
Numéro de la tare	(N°)	9	6	3	4	f14	5
Poids de la tare	(g)	21,98	21,16	22,15	22,00	10,24	22,59
Poids Tare + Sol Humide	(g)	45,82	46,02	48,82	23,63	12,59	23,95
Poids sol humide	(g)	23,84	24,86	26,67	1,63	2,35	1,35
Poids Tare + Sol Sec	(g)	39,71	40,11	42,88	23,33	12,18	23,64
Poids Sol Sec	(g)	17,73	18,95	20,73	1,33	1,94	1,05
Poids Eau	(g)	5,95	5,91	5,94	0,30	0,41	0,31
TENEUR EN EAU (%)		33,55	31,18	28,66	22,16	20,88	29,10
Moyenne			31,13			24,05	
Nombre de coups		15	23	30			

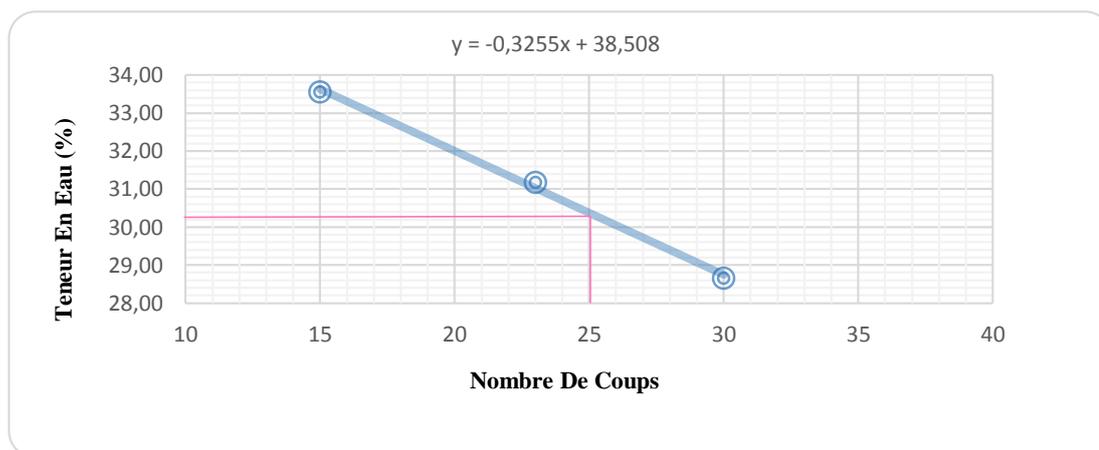


Figure IV.3 : Limite d’Atterberg (100% sol).

Tableau IV.3 : 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

IV.4.1.2.5% déchet de céramique

Tableau IV.4 : Résultat essai limite d’Atterberg (5% déchet de céramique).

Echantillon	ESSAIS N	Limite de liquidité			limite de plasticité		
		1	2	3	1	2	3
Numéro de la tare	(N°)	F12	1	2	f 11	f 6	f 7
Poids de la tare	(g)	10,20	22,20	22,05	10,28	10,38	10,30
Poids Tare + Sol Humide	(g)	26,01	36,24	37,91	11,73	11,63	12,14
Poids sol humide	(g)	15,81	14,04	15,86	1,45	1,25	1,84
Poids Tare + Sol Sec	(g)	22,16	32,94	34,27	11,48	11,41	11,81
Poids Sol Sec	(g)	11,95	10,74	12,22	1,20	1,03	1,50
Poids Eau	(g)	3,86	3,30	3,64	0,25	0,22	0,34
TENEUR EN EAU (%)		32,30	30,71	29,82	20,80	21,42	22,30
Moyenne			30,95			21,51	
Nombre de coups		15	25	31			

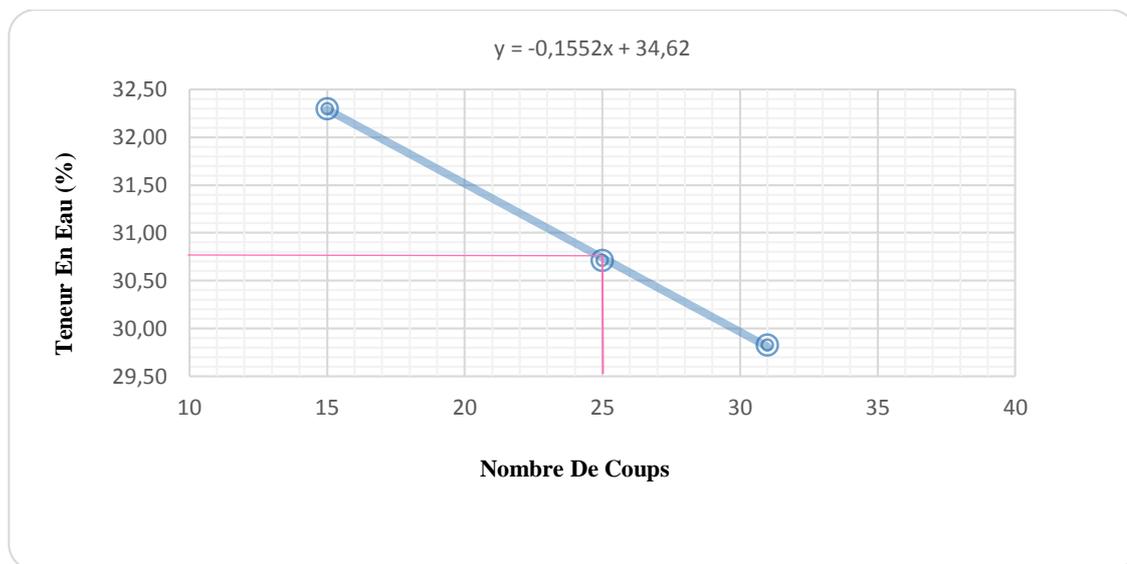


Figure IV.4 : Limite d’Atterberg (5% déchet de céramique).

Tableau IV.5 : les limites et les indice tiré d’essai limite d’Atterberg (5% déchet céramique).

Limite de liquidité (W _L)	limite de plasticité (W _P)	Teneur en eau W(%)	Indice de plasticité (I _P)	Indice de consistance (I _C)
30.74	21.51	6.38	9.23	2.64

IV.4.1.3.10% déchet de céramique

Tableau IV.6 : Résultat essai limite d’Atterberg (10% déchet de céramique).

Echantillon	ESSAIS N	Limite de liquidité			limite de plasticité		
		1	2	3	1	2	3
Numéro de la tare	(N°)	11	f 3	f 16	12	f 10	f 9
Poids de la tare	(g)	22,11	10,48	10,37	22,79	10,32	10,17
Poids Tare + Sol Humide	(g)	50,20	31,55	27,74	23,64	12,08	12,36
Poids sol humide	(g)	28,09	21,07	17,37	0,85	1,76	2,19
Poids Tare + Sol Sec	(g)	34,27	26,51	23,77	23,55	11,79	12,02
Poids Sol Sec	(g)	21,17	16,03	13,40	0,76	1,47	1,85
Poids Eau	(g)	6,92	5,04	3,97	0,09	0,29	0,34
TENEUR EN EAU (%)		32,70	31,44	29,64	12,02	19,95	18,44
Moyenne			31,26			16,80	
Nombre de coups		16	23	33			

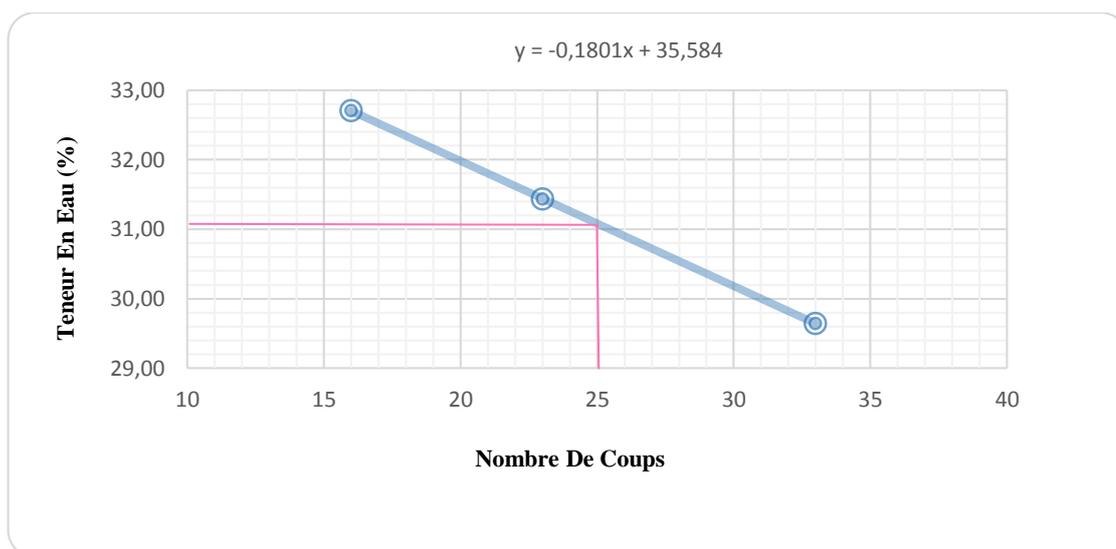


Figure IV.5 : Limite d’Atterberg (10% déchet de céramique).

Tableau IV.7 : les limites et les indice tiré d’essai limite d’Atterberg (10% déchet céramique)

Limite de liquidité (W_L)	limite de plasticité (W_P)	Teneur en eau $W(\%)$	Indice de plasticité (I_P)	Indice de consistance (I_C)
31.08	16.80	6.38	14.28	1.73

IV.4.1.4.15% déchet de céramique

Tableau IV.8 : Résultat essai limite d’Atterberg (15% déchet de céramique).

Echantillon	Limite de liquidité			limite de plasticité		
	1	2	3	1	2	3
ESSAIS N						
Numéro de la tare (N°)	9	3	6	13	5	14
Poids de la tare (g)	21,99	22,15	22,16	18,15	21,62	18,39
Poids Tare + Sol Humide (g)	41,91	36,34	39,35	19,58	23,13	19,68
Poids sol humide (g)	19,92	14,19	17,19	1,43	1,51	1,29
Poids Tare + Sol Sec (g)	36,90	33,04	35,59	19,35	22,87	19,42
Poids Sol Sec (g)	14,91	10,89	13,43	1,20	1,25	1,03
Poids Eau (g)	5,01	3,30	3,76	0,23	0,26	0,26
TENEUR EN EAU (%)	33,61	30,30	27,99	19,40	20,90	25,44
Moyenne		30,63			21,91	
Nombre de coups	16	24	32			

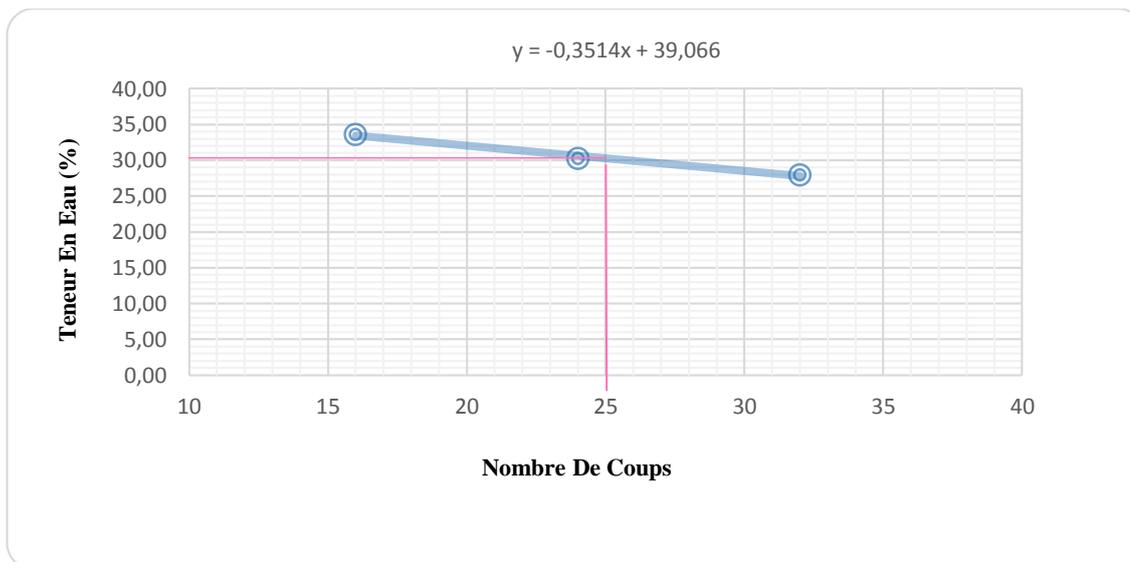


Figure IV.6 : Limite d’Atterberg (15% déchet de céramique).

Tableau IV.9 : les limites et les indice tiré d’essai limite d’Atterberg (15% déchet céramique).

Limite de liquidité (W _L)	limite de plasticité (W _P)	Teneur en eau W(%)	Indice de plasticité (I _P)	Indice de consistance (I _C)
30.28	21.91	6.38	8.37	2.86

IV.4.1.5.20% déchet de céramique

Tableau IV.10 : Résultat essai limite d’Atterberg (20% déchet de céramique).

Echantillon		Limite de liquidité			limite de plasticité		
		1	2	3	1	2	3
ESSAIS N							
Numéro de la tare	(N°)	f 2	4	8	f 13	f 14	f 4
Poids de la tare	(g)	10,32	22,09	22,16	10,17	10,19	10,44
Poids Tare + Sol Humide	(g)	29,67	34,10	37,82	12,11	11,10	11,65
Poids sol humide	(g)	19,35	12,01	15,67	1,94	0,91	1,21
Poids Tare + Sol Sec	(g)	24,72	31,37	34,36	11,75	10,93	11,42
Poids Sol Sec	(g)	14,39	9,28	12,21	1,58	0,74	0,98
Poids Eau	(g)	4,96	2,72	3,46	0,36	0,17	0,23
TENEUR EN EAU %		34,44	29,31	28,33	22,78	22,97	23,46
Moyenne			30,69			23,07	
Nombre de coups		15	26	33			

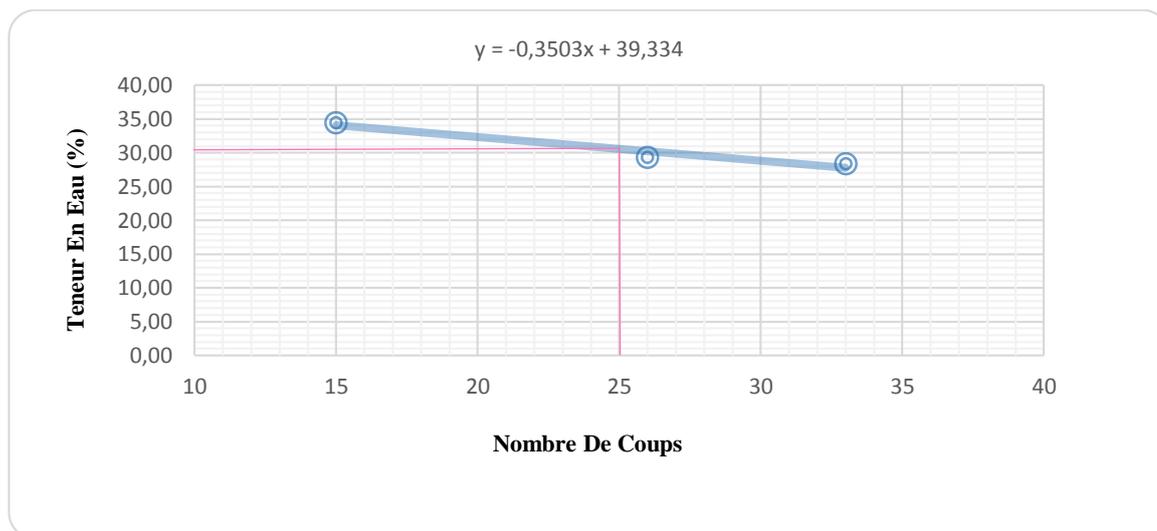


Figure IV.7 : Limite d’Atterberg (20% déchet de céramique).

Tableau IV.11 : les limites et les indice tiré d’essai limite d’Atterberg (20% déchet céramique).

Limite de liquidité (W_L)	limite de plasticité (W_P)	Teneur en eau $W(\%)$	Indice de plasticité (I_P)	Indice de consistance (I_C)
30.57	23.07	6.38	7.50	3.22

IV.4.1.6.4% déchet de Marbre

Tableau IV.12 : Résultat essai limite d'Atterberg (4% déchet de Marbre).

Echantillon		Limite de liquidité			limite de plasticité		
		1	2	3	1	2	3
ESSAIS N							
Numéro de la tare	(N°)	5	3	5	9	14	13
Poids de la tare	(g)	21,59	22,15	22,15	21,96	18,36	18,04
Poids Tare + Sol Humide	(g)	37,26	35,25	34,93	23,67	19,60	19,50
Poids sol humide	(g)	15,67	13,10	12,78	1,71	1,23	1,47
Poids Tare + Sol Sec	(g)	33,22	31,66	31,95	23,41	19,44	19,26
Poids Sol Sec	(g)	11,63	10,81	9,81	1,45	1,08	1,22
Poids Eau	(g)	4,04	3,59	2,97	0,26	0,15	0,25
TENEUR EN EAU %		34,73	33,22	30,30	17,93	14,15	20,08
Moyenne			32,75			17,39	
Nombre de coups		14	20	34			

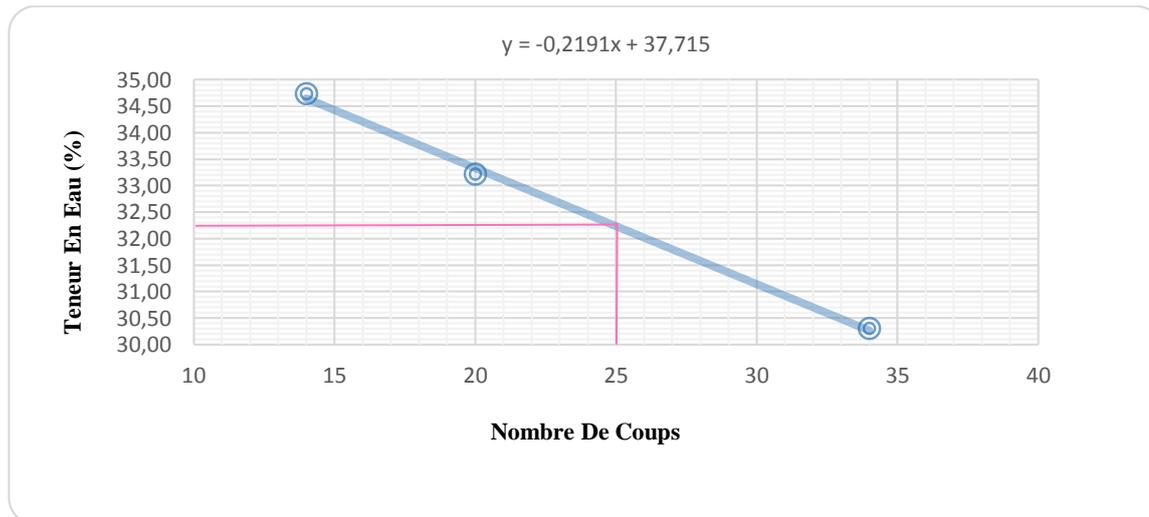


Figure IV.8 : Limite d'Atterberg (4% déchet de Marbre).

Tableau IV.13 : les limites et les indice tiré d'essai limite d'Atterberg (4% déchet Marbre).

Limite de liquidité (W_L)	limite de plasticité (W_P)	Teneur en eau $W(\%)$	Indice de plasticité (I_P)	Indice de consistance (I_C)
32,23	17.39	6.38	14.84	1.74

IV.4.1.7.6% déchet de Marbre

Tableau IV.14 : Résultat essai limite d'Atterberg (6% déchet de Marbre).

Echantillon	Limite de liquidité			limite de plasticité		
	1	2	3	1	2	3
ESSAIS N						
Numéro de la tare (N°)	3	6	13	5	9	14
Poids de la tare (g)	22,14	22,16	18,08	21,60	21,97	18,38
Poids Tare + Sol Humide (g)	38,84	36,93	34,49	22,77	23,00	19,42
Poids sol humide (g)	16,70	14,77	16,41	1,17	1,02	1,04
Poids Tare + Sol Sec (g)	34,48	33,18	30,51	22,66	22,87	19,25
Poids Sol Sec (g)	12,34	11,02	12,43	1,06	0,90	0,87
Poids Eau (g)	4,36	3,75	3,98	0,11	0,12	0,17
TENEUR EN EAU (%)	35,33	34,02	32,03	10,38	13,56	19,31
Moyenne		33,79			14,41	
Nombre de coups	15	22	35			

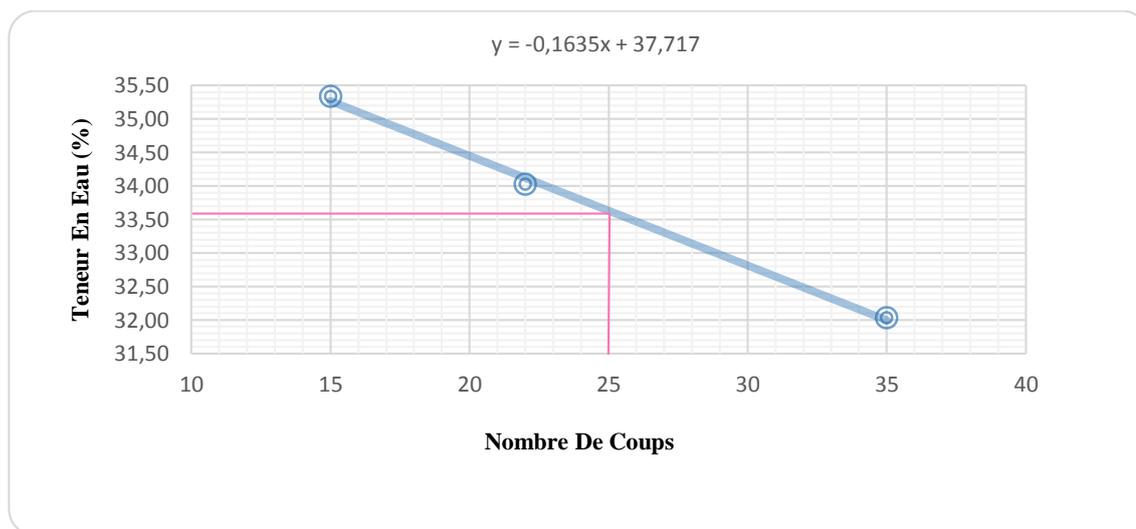


Figure IV.9 : Limite d'Atterberg (6% déchet de Marbre).

Tableau IV.15 : les limites et les indice tiré d'essai limite d'Atterberg (6% déchet Marbre).

Limite de liquidité (W_L)	limite de plasticité (W_P)	Teneur en eau $W(\%)$	Indice de plasticité (I_P)	Indice de consistance (I_C)
33.62	14.41	6.38	19.21	1.42

IV.4.1.8.8% déchet de Marbre

Tableau IV.16 : Résultat essai limite d'Atterberg (8% déchet de Marbre).

Echantillon		Limite de liquidité			limite de plasticité		
		1	2	3	1	2	3
ESSAIS N		1	2	3	1	2	3
Numéro de la tare	(N°)	3	F 3	4	f 6	f 7	f 9
Poids de la tare	(g)	22,32	10,47	22,06	10,38	10,30	10,16
Poids Tare + Sol Humide	(g)	33,81	30,56	33,25	11,41	11,61	11,79
Poids sol humide	(g)	11,49	20,09	11,19	1,71	1,31	1,63
Poids Tare + Sol Sec	(g)	30,93	25,70	30,68	11,23	11,39	11,54
Poids Sol Sec	(g)	8,62	15,23	8,62	0,85	1,09	1,38
Poids Eau	(g)	2,88	4,86	2,57	0,18	0,22	0,25
TENEUR EN EAU (%)		33,39	31,92	29,78	21,18	20,24	18,36
Moyenne			31,70			19,93	
Nombre de coups		15	22	31			

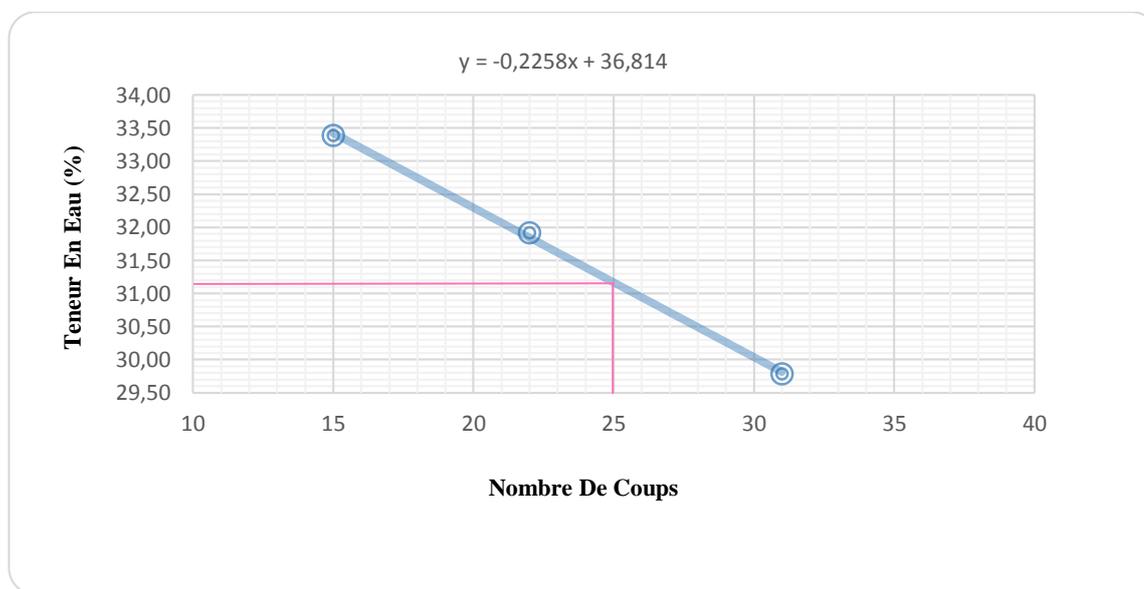


Figure IV.10 : Limite d'Atterberg (8% déchet de Marbre).

Tableau IV.17 : les limites et les indice tiré d'essai limite d'Atterberg (8% déchet Marbre).

Limite de liquidité (W _L)	limite de plasticité (W _P)	Teneur en eau W(%)	Indice de plasticité (I _P)	Indice de consistance (I _C)
31.16	19.93	6.38	11.23	2.21

IV.4.1.10.10% déchet de Marbre

Tableau IV.18 : Résultat essai limite d’Atterberg (10% déchet de Marbre).

Echantillon	ESSAIS N	Limite de liquidité			limite de plasticité		
		1	2	3	1	2	3
Numéro de la tare	(N°)	f 13	f 4	f 11	f 10	f 14	f 2
Poids de la tare	(g)	10,17	10,42	10,27	10,32	10,19	10,32
Poids Tare + Sol Humide	(g)	24,28	29,21	22,42	11,44	11,56	11,50
Poids sol humide	(g)	14,11	18,79	12,15	1,12	1,37	1,18
Poids Tare + Sol Sec	(g)	20,74	24,65	19,66	11,23	11,31	11,28
Poids Sol Sec	(g)	10,57	14,23	9,39	0,91	1,13	0,96
Poids Eau	(g)	3,54	4,56	2,76	0,21	0,24	0,22
TENEUR EN EAU (%)		33,49	32,01	29,43	23,08	21,65	23,17
Moyenne			31,64			22,63	
Nombre de coups		16	22	35			

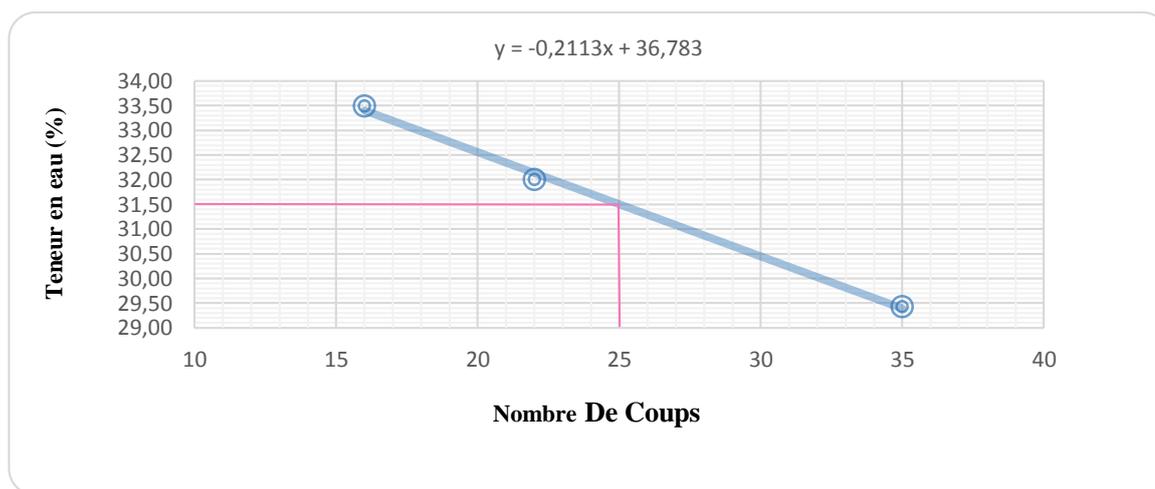


Figure IV.11 : Limite d’Atterberg (10% déchet de Marbre).

Tableau IV.19 : les limites et les indice tiré d’essai limite d’Atterberg (10% déchet Marbre).

Limite de liquidité (W_L)	limite de plasticité (W_P)	Teneur en eau $W(\%)$	Indice de plasticité (I_P)	Indice de consistance (I_C)
31.50	22.63	6.38	8.87	2.83

IV.4.2. Interprétation

Les limites d'Atterberg sont des paramètres géotechniques destinés à identifier un sol et à caractériser son état. Le tableau suivant résume tous les résultats obtenus au niveau de laboratoire.

Tableau IV.20 : Résumé des résultats de l'essai limite d'Atterberg.

déchet	Limite de liquidité (W _L)	limite de plasticité (W _P)	Teneur en eau W(%)	Indice de plasticité (I _P)	Indice de consistance (I _C)
0%	30.37	24.05	6.38	6.32	3.80
5% Céramique	30.74	21.51	6.38	9.23	2.64
10% Céramique	31.08	16.80	6.38	14.28	1.73
15% Céramique	30.28	21.91	6.38	8.37	2.86
20% Céramique	30.57	23.07	6.38	7.50	3.22
4% Marbre	32,23	17.39	6.38	14.84	1.74
6% Marbre	31.16	19.93	6.38	11.23	2.21
8% Marbre	31.16	19.93	6.38	11.23	2.21
10% Marbre	31.50	22.63	6.38	8.87	2.83

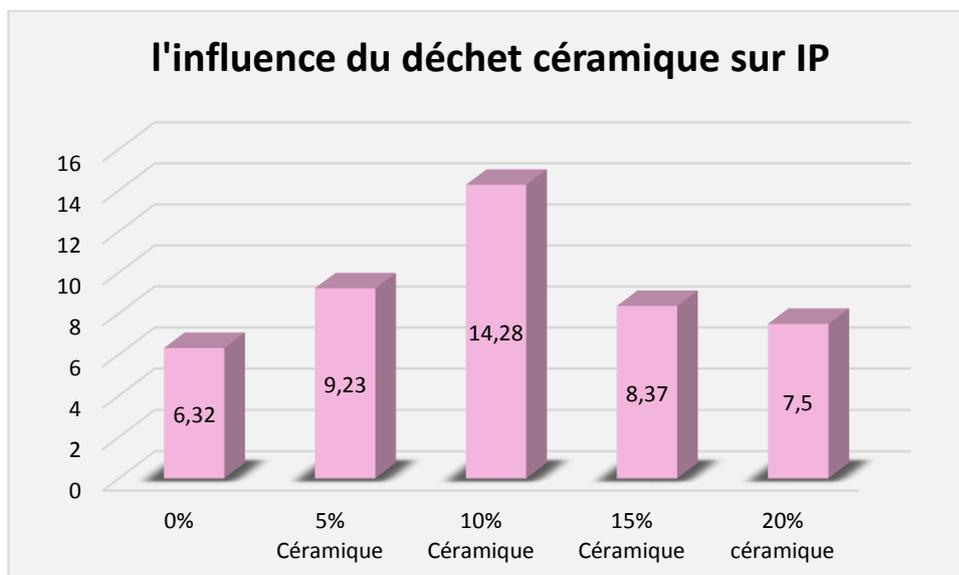


Figure IV.12 : Variation de l'indice de plasticité en fonction de déchet de céramique.

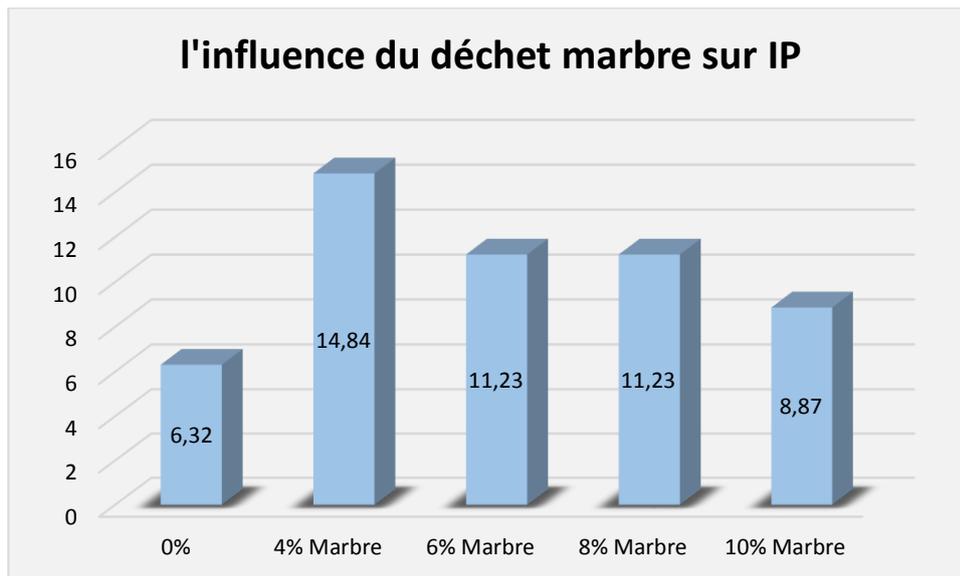


Figure IV.13 : Variation de l'indice de plasticité en fonctions de déchet de marbre.

D'après les résultats, présentés dans le tableau et les figures dessus. Le sol étudié est classé comme un matériau faiblement argileux (Sable argileux : $1\% < I_p < 7\%$), avec un état de consistance solide ou semi solide ($I_c > 1$). À partir d'abaque de plasticité de Casagrande c'est affirmé que le sol utilisé est une argile minérale de moyenne plasticité.

Les résultats issus des essais des limites d'Atterberg montrent que l'indice de plasticité augmente en fonction du pourcentage du déchet ajouté soit du marbre ou bien de la déchets de céramique, contrairement pour les limites de liquidité qui ne donnent aucun signe de changement, elles gardent presque la même valeur du sol non stabilisé.

Pour le déchet de céramique on remarque la chute de l'indice de plasticité à partir du 10%, où ce dernier donne l'effet inverse. Ce qui concerne l'ajout du marbre (Figure IV.13) on observe une stabilisation des valeurs d'IP entre 6 à 8%.

L'augmentation de la plasticité réduit la sensibilité du sol à l'eau ; ce qui montre que le déchet ajouté ne change pas l'état de l'échantillon. D'après les résultats trouvés et suivant les différentes classifications du sol citées dans le chapitre 2, le sol reste toujours une argile minérale de moyenne plasticité. Compare notre travail pour certain chercheur [Shahram Pourakbar et al 2015] ont constaté I_p entre 23% et 27% pour argile stabilisé avec palm oil and ciment mais nos étude nous trouvons I_p entre 6% et 14% cette résultats efficace pour couche de forme.

IV.5.Essais Proctor Modifier (NF P 94-093) :

IV.5.1.Présentation des résultats sol et déchet de céramique :

IV.5.1.1. 100% Sol

Tableau IV.21 : Résultat essai Proctor (100 % Sol).

Echantillon n° :	Essai 1	Essai 2	Essai 3	Essai 4	Essai 5
Eau ajouté (%)	8%	10%	12%	14%	16%
Poids total humide (g)	9506	9653	9924	9973	9852
Poids moule vide (g)	5315	5318	5318	5318	5315
Poids sol humide (g)	4191	4335	4606	4655	4537
Poids sol sec (g)	3880,5	3940,9	4112,5	4083,3	3911,2
Volume du moule (cm ³)	2108,5				
Teneur en eau mesuré (%)	7,10	8,79	12,33	14,09	15,90
D _{app} du sol (g/cm ³)	1,85	1,88	1,94	1,93	1,85

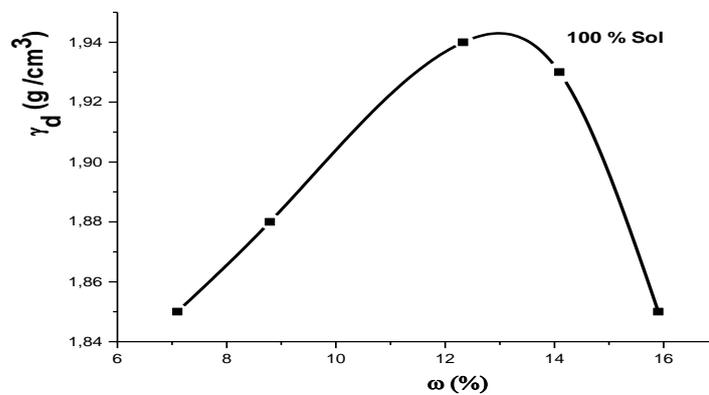


Figure IV.14 : Variation de la masse volumique sèche en fonction de teneur en eau.

IV.5.1.2. 5% déchet de céramique :

Tableau IV.22 : Résultat essai Proctor (5 % déchet de céramique).

Echantillon n° :	Essai 1	Essai 2	Essai 3	Essai 4
Eau ajouté (%)	8%	10%	12%	14%
Poids total humide (g)	9517	9753	9926	9889
Poids moule vide (g)	5318	5315	5318	5318
Poids sol humide (g)	4199	4438	4608	4571
Poids sol sec (g)	3887,9	4034,5	4114,2	4009,6
Volume du moule (cm ³)	2108,5			
Teneur en eau (%)	7,65	9,41	11,57	13,76
D _{app} du sol (g/cm ³)	1,84	1,92	1,95	1,90

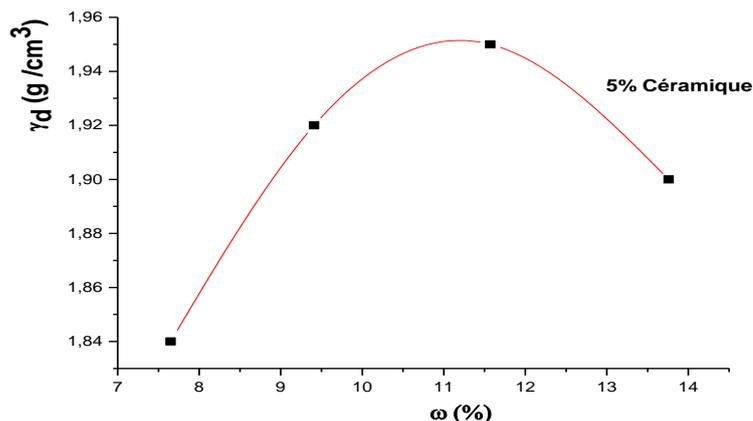


Figure IV.15 : Variation de la masse volumique sèche en fonction de teneur en eau (5% déchet de céramique).

IV.5.1.3. 10 % déchet de céramique :

Tableau IV.23 : Résultat essai Proctor (10 % déchet de céramique).

Echantillon n° :	Essai 1	Essai 2	Essai 3	Essai 4
Eau ajouté (%)	8%	10%	12%	14%
Poids total humide (g)	9527	9868	9916	9883
Poids moule vide (g)	5315	5318	5315	5318
Poids sol humide (g)	4212	4550	4601	4565
Poids sol sec (g)	3900	4136,3	4108,03	4004,3
Volume du moule (cm ³)	2108,5			
Teneur en eau (%)	7,68	9,09	11,94	13,72
D _{app} du sol (g/cm ³)	1,85	1,97	1,94	1,90

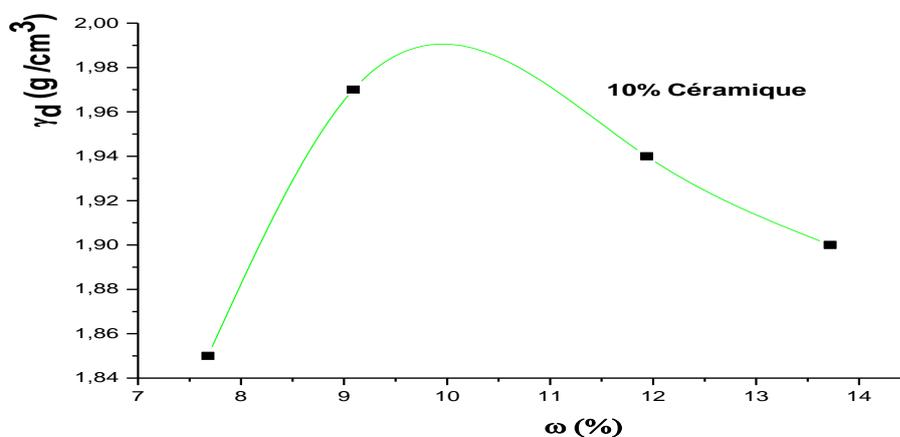


Figure IV.16 : Variation de la masse volumique sèche en fonction de teneur en eau (10% déchet de céramique).

IV.5.1.4. 15% déchet de céramique :

Tableau IV.24 : Résultat essai Proctor (15 % déchet de céramique).

Echantillon n° :	Essai 1	Essai 2	Essai 3	Essai 4	Essai 5
Eau ajouté (%)	8%	10%	12%	14%	16%
Poids total humide (g)	9402	9806	9864	9934	9835
Poids moule vide (g)	5315	5318	5315	5318	5315
Poids sol humide (g)	4087	4488	4549	4616	4520
Poids sol sec (g)	3784,2	4080	4061,6	4049,1	3896,5
Volume du moule (cm ³)	2108,5				
Teneur en eau (%)	7,54	9,89	10,58	13,50	14,76
D _{app} du sol (g/cm ³)	1,80	1,93	1,95	1,92	1,86

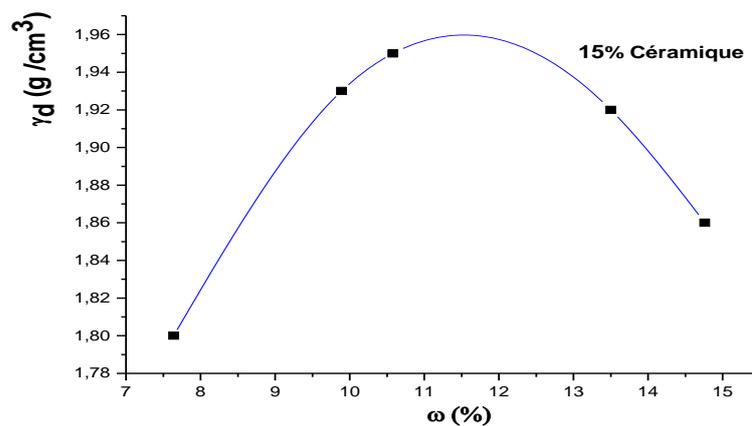


Figure IV.17 : Variation de la masse volumique sèche en fonction de teneur en eau (15% déchet de céramique).

IV.5.2.Présentation des résultats sol et marbre :

IV.5.2.1. 4 % déchet de Marbre :

Tableau IV.25 : Résultat essai Proctor (4 % déchet de Marbre).

Echantillon n° :	Essai 1	Essai 2	Essai 3	Essai 4
Eau ajouté (%)	8%	10%	12%	14%
Poids total humide (g)	9605	9722	9943	9992
Poids moule vide (g)	5318	5315	5315	5318
Poids sol humide (g)	4287	4407	4628	4674
Poids sol sec (g)	3969,4	4006,3	4132,1	4100
Volume du moule (cm ³)	2108,5			
Teneur en eau (%)	8,09	9,49	11,54	13,20
D _{app} du sol (g/cm ³)	1,88	1,90	1,96	1,95

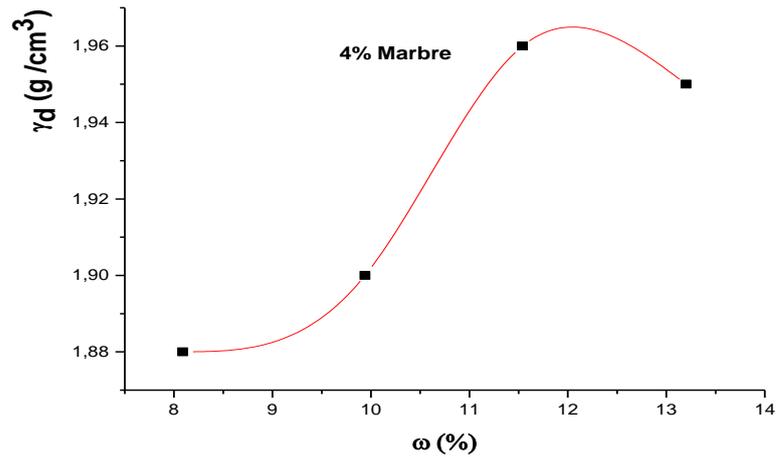


Figure IV.18 : Variation de la masse volumique sèche en fonction de teneur en eau (4% du déchet de marbre).

IV.5.2.2. 6 % déchet de Marbre :

Tableau IV.26 : Résultat essai Proctor (6 % déchet de Marbre).

Echantillon n° :	Essai 1	Essai 2	Essai 3	Essai 4
Eau ajouté (%)	8%	10%	12%	14%
Poids total humide (g)	9572	9809	9948	9897
Poids moule vide (g)	5315	5318	5318	5315
Poids sol humide (g)	4257	4491	4630	4582
Poids sol sec (g)	3941,6	4082,7	4133,9	4019,2
Volume du moule (cm ³)	2108,5			
Teneur en eau (%)	8,23	10,08	11,78	14,07
D _{app} du sol (g)	1,86	1,93	1,96	1,90

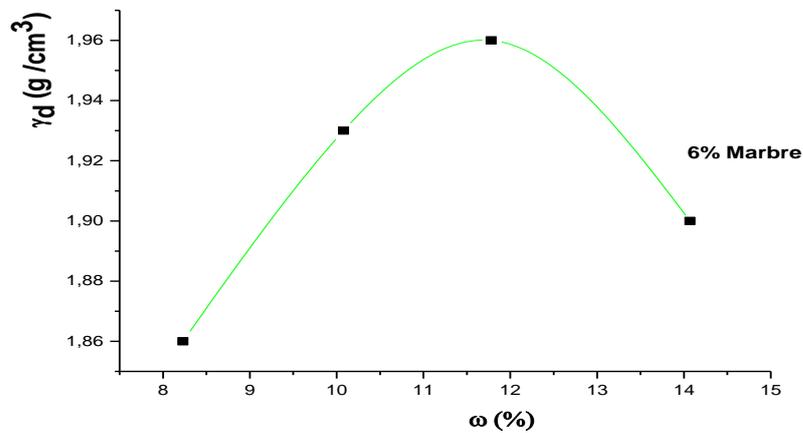


Figure IV.19 : Variation de la masse volumique sèche en fonction de teneur en eau (6 % du déchet de marbre).

IV.5.2.3. 8 % déchet de Marbre :

Tableau IV.27 : Résultat essai Proctor (8 % Marbre).

Echantillon n° :	Essai 1	Essai 2	Essai 3	Essai 4
Eau ajouté (%)	8%	10%	12%	14%
Poids total humide (g)	9546	9734	9963	9984
Poids moule vide (g)	5315	5318	5315	5318
Poids sol humide (g)	4231	4416	4648	4666
Poids sol sec (g)	3917,5	4014,5	4150	4092,9
Volume du moule (cm ³)	2108,5			
Teneur en eau (%)	7,93	9,64	11,56	13,62
D _{app} du sol (g/cm ³)	1,85	1,91	1,97	1,94

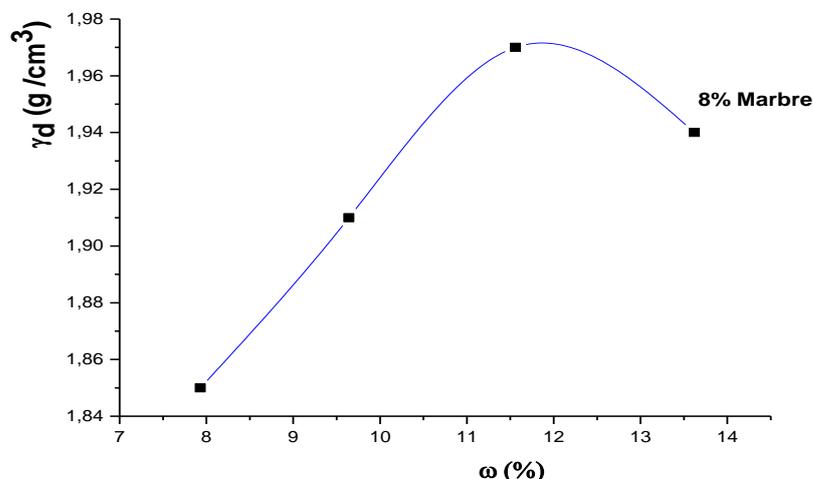


Figure IV.20 : Variation de la masse volumique sèche en fonction de teneur en eau (8 % du déchet de marbre).

IV.5.2.4.10 % déchet de Marbre :

Tableau IV.28 : Résultat essai Proctor (10 % déchet de Marbre).

Echantillon n° :	Essai 1	Essai 2	Essai 3	Essai 4
Eau ajouté (%)	8%	10%	12%	14%
Poids total humide (g)	9644	9961	9977	9894
Poids moule vide (g)	5318	5315	5318	5315
Poids sol humide (g)	4326	4601	4659	4579
Poids sol sec (g)	4005,5	4182,7	4159,8	4016,6
Volume du moule (cm ³)	2108,5			
Teneur en eau (%)	8,59	10,04	12,01	14,04
D _{app} du sol (g/cm ³)	1,88	1,98	1,97	1,90

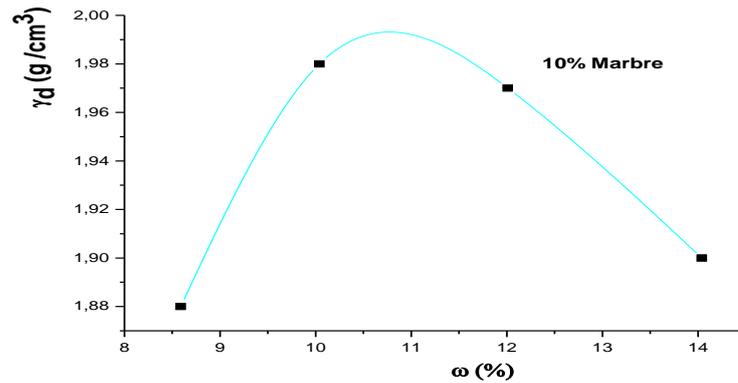


Figure IV.21 : Variation de la masse volumique sèche en fonction de teneur en eau (10 % du déchet de marbre).

IV.5.3. Présentation des résultats sol et ciment :

IV.5.3.1. Sol + 3 % Ciment :

Tableau IV.29 : Résultat essai Proctor (Sol + 3 % Ciment).

Echantillon n° :	Essai 1	Essai 2	Essai 3	Essai 4	Essai 5
Eau ajouté (%)	8%	10%	12%	14%	16%
Poids total humide (g)	9443	9709	9780	9982	9911
Poids moule vide (g)	5315	5318	5315	5318	5318
Poids sol humide (g)	4128	4391	4477	4664	4593
Poids sol sec (g)	3822,2	3991,8	3986,6	4091,2	3959,4
Volume du moule (cm ³)	2108,5				
Teneur en eau (%)	7,08	9,56	10,46	12,38	14,86
D _{app} du sol (g/cm ³)	1,82	1,90	1,92	1,96	1,89

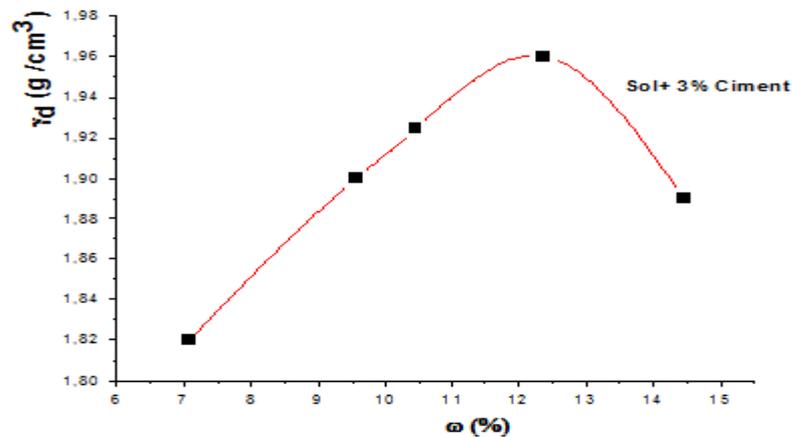


Figure IV.22 : Variation de la masse volumique sèche en fonction de teneur en eau (3% de liant hydraulique).

IV.5.3.2. Sol + 4 % Ciment :

Tableau IV.30 : Résultat essai Proctor (Sol + 4 % Ciment).

Echantillon n° :	Essai 1	Essai 2	Essai 3	Essai 4	Essai 5
Eau ajouté (%)	8%	10%	12%	14%	16%
Poids total humide (g)	9415	9647	9800	9977	9677
Poids moule vide (g)	5318	5315	5318	5315	5318
Poids sol humide (g)	4097	4332	4482	4662	4359
Poids sol sec (g)	3793,5	3938,1	4001,1	4089,4	3757,7
Volume du moule (cm ³)	2108,5				
Teneur en eau (%)	7,75	9,24	10,43	12,04	16,04
D _{app} du sol (g/cm ³)	1,80	1,86	1,92	1,97	1,79

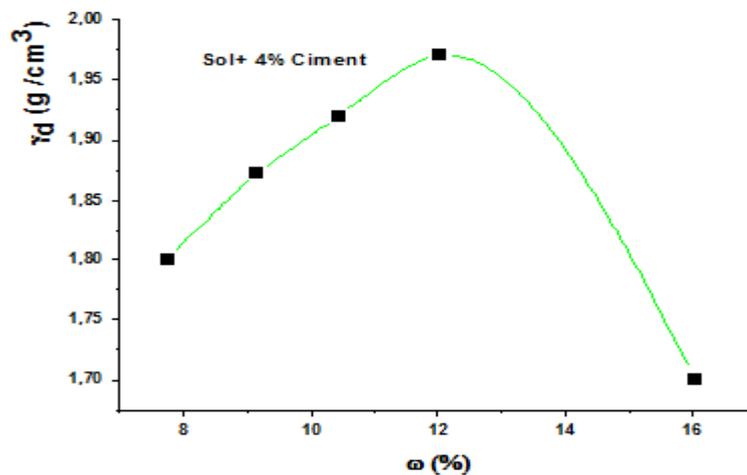


Figure IV.23 : Variation de la masse volumique sèche en fonction de teneur en eau (4% de liant hydraulique).

IV.5.4. Présentation des résultats céramique et ciment :

IV.5.4.1. 5% déchet de céramique + 3% ciment :

Tableau IV.31 : Essai Proctor (5% déchet de céramique + 3 % ciment).

Echantillon n° :	Essai 1	Essai 2	Essai 3	Essai 4
Eau ajouté (%)	8%	10%	12%	14%
Poids total humide (g)	9538	9725	9904	9925
Poids moule vide (g)	5315	5318	5315	5318
Poids sol humide (g)	4223	4407	4589	4607
Poids sol sec (g)	3910,1	4006,3	4097,3	4041,2
Volume du moule (cm ³)	2108,5			
Teneur en eau (%)	8,04	9,83	11,75	12,69
D _{app} du sol (g/cm ³)	1,85	1,90	1,94	1,93

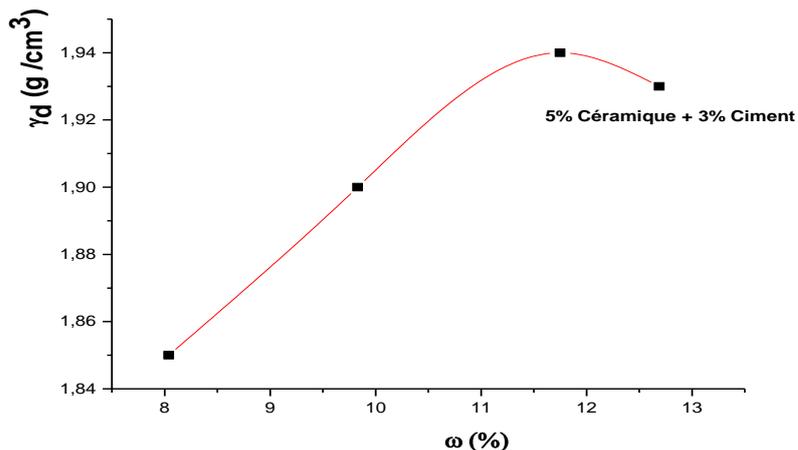


Figure IV.24 : Variation de la masse volumique sèche en fonction de teneur en eau (5% déchet de céramique +3% de liant hydraulique).

IV.5.4.2. 5% déchet de céramique + 4 % ciment :

Tableau IV.32 : Résultat essai Proctor (5% déchet de céramique + 4 % ciment).

Echantillon n° :	Essai 1	Essai 2	Essai 3	Essai 4	Essai 5
Eau ajouté (%)	8%	10%	12%	14%	16%
Poids total humide (g)	9354	9618	9796	9999	9870
Poids moule vide (g)	5315	5318	5315	5315	5318
Poids sol humide (g)	4039	4300	4481	4684	4552
Poids sol sec (g)	3739,8	3909	4000,8	4108,7	3924,1
Volume du moule (cm ³)	2108,5				
Teneur en eau (%)	6,30	8,58	10,22	12,24	15,83
D _{app} du sol (g/cm ³)	1,80	1,87	1,92	1,97	1,86

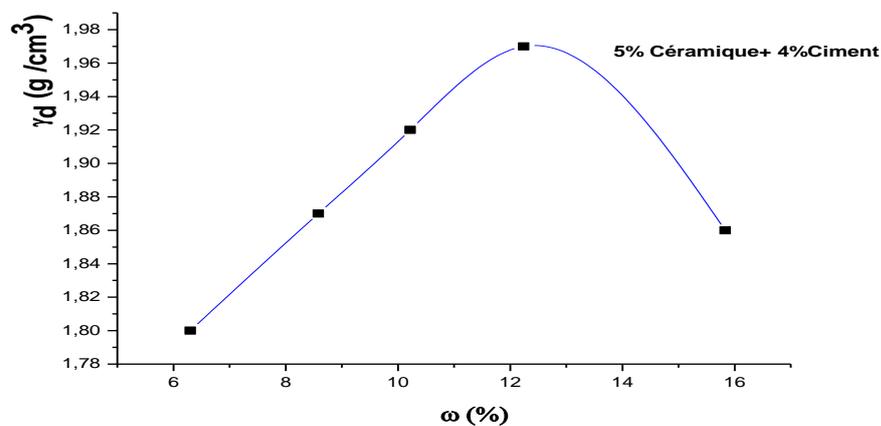


Figure IV.25 : Variation de la masse volumique sèche en fonction de teneur en eau (5% déchet de céramique + 4% de liant hydraulique).

IV.5.4.3. 10% déchet de céramique + 3 % ciment :

Tableau IV.33 : Essai Proctor (10% déchet de céramique + 3 % ciment).

Echantillon n° :	Essai 1	Essai 2	Essai 3	Essai 4	Essai 5
Eau ajouté (%)	8%	10%	12%	14%	16%
Poids total humide (g)	9460	9665	9811	9992	9794
Poids moule vide (g)	5318	5315	5318	5315	5315
Poids sol humide (g)	4142	4350	4493	4677	4479
Poids sol sec (g)	3835,1	3954,5	3984,8	4040,3	3861,2
Volume du moule (cm ³)	2108,5				
Teneur en eau (%)	7,13	9,22	10,62	12,54	15,25
D _{app} du sol (g/cm ³)	1,83	1,88	1,92	1,97	1,84

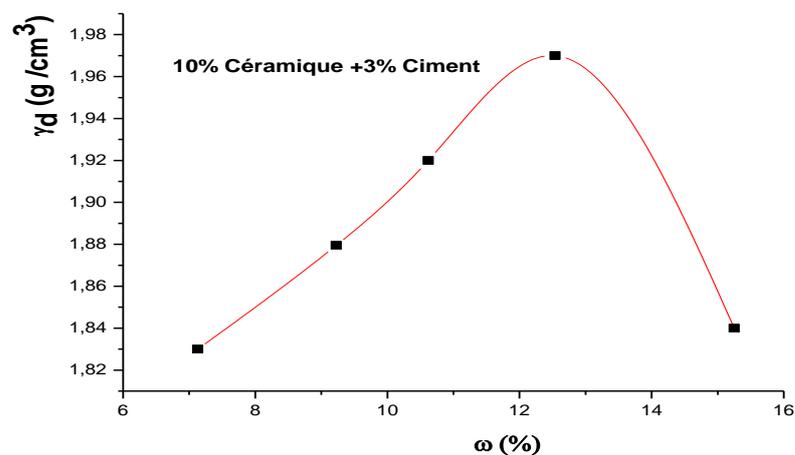


Figure IV.26 : Variation de la masse volumique sèche en fonction de teneur en eau (10% déchet de céramique +3% de liant hydraulique).

IV.5.4.4. 10% déchet de céramique + 4 % ciment :

Tableau IV.34 : Résultat essai Proctor (10 % déchet de céramique + 4 % ciment).

Echantillon n° :	Essai 1	Essai 2	Essai 3	Essai 4
Eau ajouté (%)	8%	10%	12%	14%
Poids total humide (g)	9424	9676	9985	9934
Poids moule vide (g)	5315	5318	5315	5318
Poids sol humide (g)	4109	4358	4670	4616
Poids sol sec (g)	3804,6	3961,8	4169,6	4049,1
Volume du moule (cm ³)	2108,5			
Teneur en eau (%)	7.43	9,40	11,36	12,46
D _{app} du sol (g/cm ³)	1,81	1,88	1,98	1,94

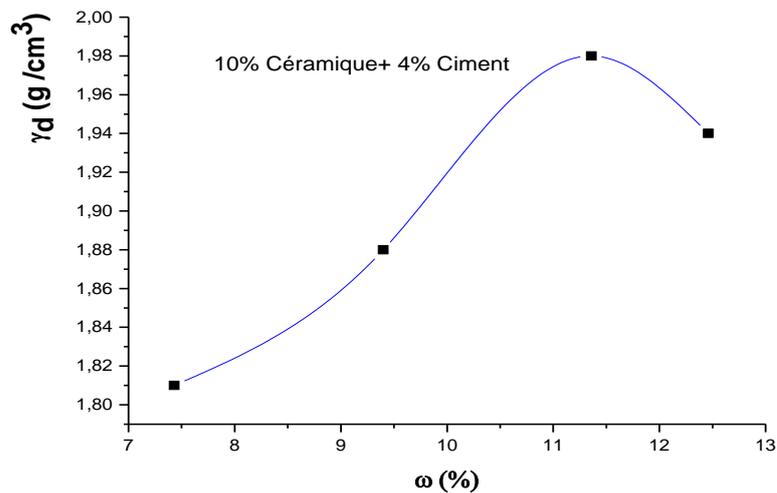


Figure IV.27 : Variation de la masse volumique sèche en fonction de teneur en eau (10% déchet de céramique + 4% de liant hydraulique).

IV.5.4.5. 15% déchet de céramique + 3 % ciment :

Tableau IV.35 : Résultat essai Proctor (15 % déchet de céramique + 3 % ciment).

Echantillon n° :	Essai 1	Essai 2	Essai 3	Essai 4
Eau ajouté (%)	8%	10%	12%	14%
Poids total humide (g)	9303	9688	9912	9953
Poids moule vide (g)	5318	5318	5315	5318
Poids sol humide (g)	3985	4370	4597	4635
Poids sol sec (g)	3689,8	3972,7	4052,6	4065,7
Volume du moule (cm ³)	2108,5			
Teneur en eau (%)	6,70	9,29	11,08	13,12
D _{app} du sol (g/cm ³)	1,77	1,89	1,96	1,94

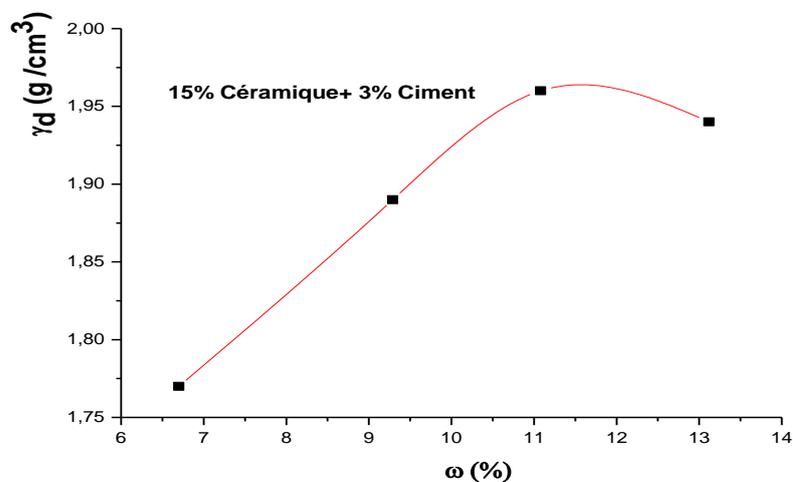


Figure IV.28 : Variation de la masse volumique sèche en fonction de teneur en eau (15% déchet de céramique + 3% de liant hydraulique).

IV.5.4.6. 15% déchet de céramique + 4 % ciment :

Tableau IV.36 : Résultat essai Proctor (15 % déchet de céramique + 4 % ciment).

Echantillon n° :	Essai 1	Essai 2	Essai 3	Essai 4
Eau ajouté (%)	8%	10%	12%	14%
Poids total humide (g)	9519	9712	9927	9923
Poids moule vide (g)	5315	5318	5315	5318
Poids sol humide (g)	4204	4394	4612	4605
Poids sol sec (g)	3892,5	3994,5	4060,7	4039,4
Volume du moule (cm ³)	2108,5			
Teneur en eau (%)	7,65	9,42	11,25	13,95
D _{app} du sol (g/cm ³)	1,85	1,90	1,96	1,91

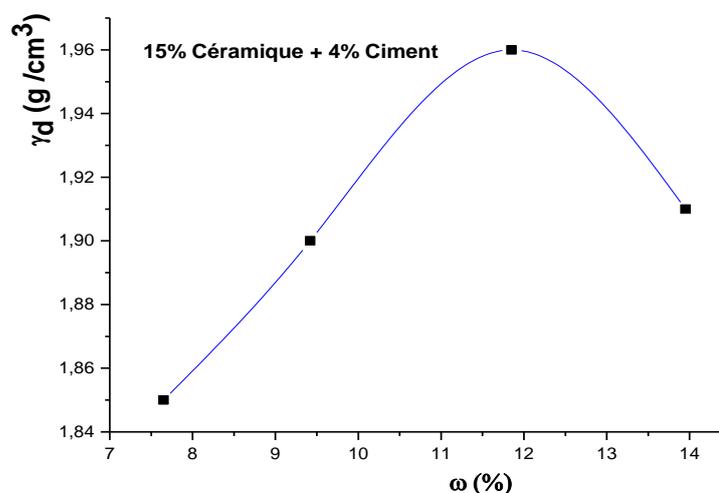


Figure IV.29 : Variation de la masse volumique sèche en fonction de teneur en eau (15% déchet de céramique+4% de liant hydraulique).

La compactibilité d'un matériau est défini par son aptitude au compactage, celui-ci peut être considéré comme un effet statique ou dynamique qui s'exerce sur un sol pour réduire son volume des vides en réarrangement les éléments d'une façon optimale en faisant intervenir le pouvoir lubrificateur de l'eau et de l'argile. Le tableau suivant résumé tous les résultats obtenu au niveau de laboratoire.

Tableau IV.37 : Synthèse des résultats d'essais Proctor

Déchet	$\gamma_{d\ max}$ (g /cm ³)	ω_{OPM} (%)	Gain en $\gamma_{d\ max}$ (%)
0 %	1.94	12.96	0
5 % céramique	1.95	11.15	1
10 % céramique	1.99	9.94	5
15 % céramique	1.95	11.49	1
20 % céramique	1.94	11.94	0
4 % Marbre	1.96	12.02	2
6 % Marbre	1.96	11.72	2
8 % Marbre	1.97	11.87	3
10 % Marbre	1.99	10.78	5
Sol + 3 % Ciment	1.96	12.25	2
Sol + 4 % Ciment	1.96	12.22	2
5 % céramique + 3 % Ciment	1.94	11.76	0
5 % céramique + 4 % Ciment	1.97	12.49	3
10 % céramique + 3 % Ciment	1.97	12.54	3
10 % céramique + 4 % Ciment	1.98	11.35	4
15 % céramique + 3 % Ciment	1.96	11.48	2
15 % céramique + 4 % Ciment	1.96	11.85	2

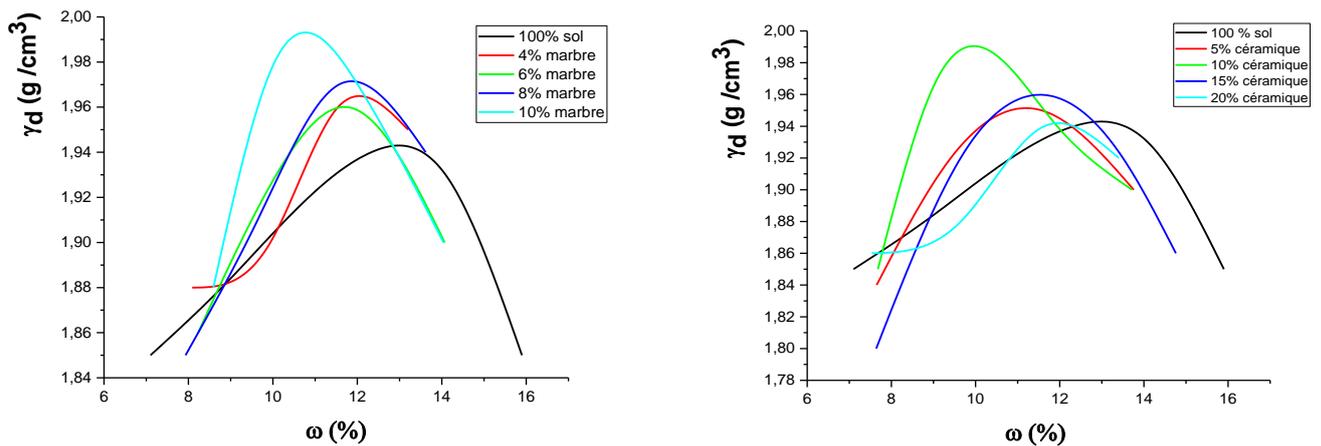


Figure IV.30 : Variation de la masse volumique de sol sec en fonction de teneur en eau pour l'ensemble des pourcentages (déchet de marbre, déchet de céramique).

Les résultats obtenus par l'essai Proctor (Figure IV.30), indiquent que les caractéristiques de l'optimum Proctor modifié des échantillons du sol traité sont fiables.

La courbe Proctor d'un sol traité (déchet marbre/céramique) est déplacée vers la gauche indiquant une réduction de la teneur en eau initial avec une augmentation de la densité sèche donc l'augmentation de l'ajout provoque l'augmentation de la densité spécifique sèche.

La réduction de la teneur en eau initial prouve que le réarrangement inter granulaire radical de la nature du sol c'est-à-dire un comblement des pores de sol par les particules du produit stabilisant.

D'après la Figure IV.30 On constate que l'accroissement du pourcentage de céramique de 5 à 10% conduit à une augmentation de l'optimum de Proctor modifié respectivement de 1.95 à 1.99 (g/cm³). Mais conduit à une diminution de la teneur en eau optimale respectivement de 12,96 à 11,15. Au de la de 20% le déchet de céramique va chuter de les caractéristiques de l'optimum Proctor modifié des échantillons.

Par ailleurs celle du marbre (Figure IV.30) l'augmentation du taux de 4 à 10% provoque une augmentation de l'optimum de Proctor respectivement de 1.96 à 1.97 et jusqu'à 1.99 (g/cm³). Mais fait diminuer la teneur en eau optimale de 12.96 jusqu' à 10.78.

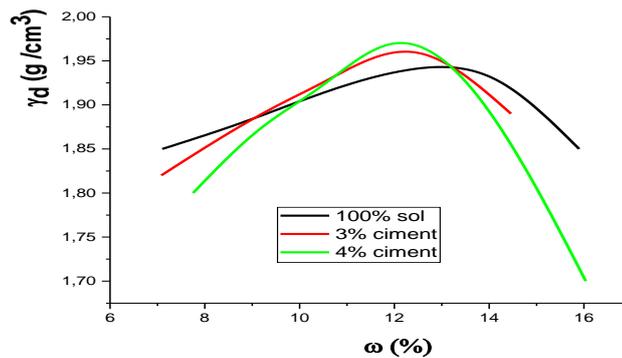


Figure IV.31 : Variation de la masse volumique de sol sec en fonction de teneur en eau pour l'ensemble des pourcentages en liants hydrauliques.

Le résultat obtenu de l'essai Proctor de l'échantillon traité par le ciment montrent que l'augmentation du dosage de traitement augmente la densité spécifique sèche ce qui induit un déplacement de l'optimum de Proctor vers la gauche indiquant son réduction ce qui prouve que le traitement est fiables.

La réduction de la teneur en eau peut être influée par l'effet chimique ou physique de l'ajout de ciment ajouté, ou la porosité dans le sol diminue à cause de l'hydratation du liant ce qui engendre un échantillon de sol plus dense.

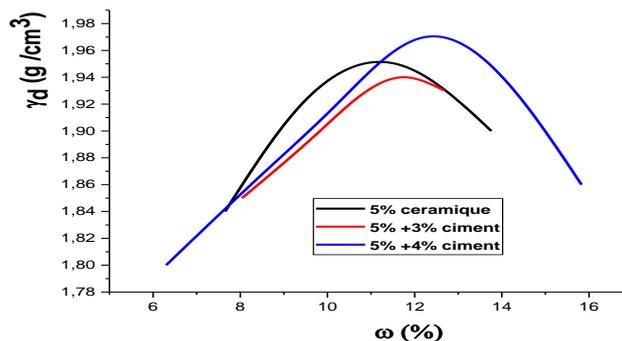


Figure IV.32 : Variation de la masse volumique de sol sec en fonction de teneur en eau pour l'ensemble des pourcentages de déchet céramique (5%) et liants hydrauliques.

L'ajout du ciment au de la de 4% provoque l'augmentation la densité spécifique sèche de Proctor modifier et la teneur en eau au même temps cela peut être due à l'effet du céramique qui réduit la transpiration du sol.

Certain chercheur [Li Chen et Deng 2009] ont montré la densité sèche 1.67 g/cm³ pour stabilisation d'une route avec sewage sludge ash et ciment, mais nos recherches trouvons la densité sèche 1.97 g/cm³, cette résultats confort pour la portance des route.

[58]

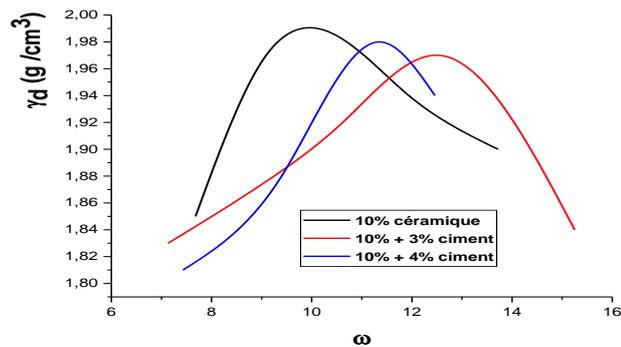


Figure IV.33 : Variation de la masse volumique de sol sec en fonction de teneur en eau pour l'ensemble des pourcentages de déchet céramique (10%) et liants hydrauliques.

Dans ce cas on a remarqué que les résultats de la densité spécifique sèche du sol traité sont très proche et presque stable au temps que la teneur en eau augmente en augmentent la teneur en ciment, ce qui indiquant un déplacement de la teneur en eau vers la droite.

Cette figure montre que la stabilisation du sol avec le ciment et le déchet de céramique augmente la densité spécifique sèche du Proctor modifie jusqu'à 1.98 g/cm^3 . Li Chen et all ont prouvé qu'un sol stabiliser par les ciments et Cendres de boues d'épuration sa densité spécifique sèche égale à 1.68 g/cm^3 . [59]

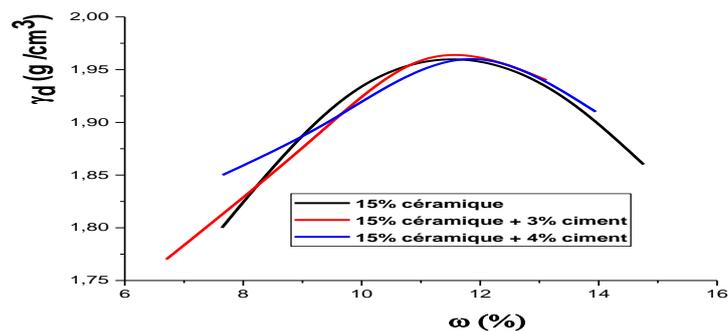


Figure IV.34 : Variation de la masse volumique de sol sec en fonction de teneur en eau pour l'ensemble des pourcentages de déchet céramique (15%) et liants hydrauliques.

D'après la Figure IV.34 on observant qu'il y a une superposition des trois courbes lorsque le pourcentage de la céramique atteint 15% quel que soit le taux de ciment ajouté.

Par comparaison Shahram Pourakbar et all ont trouvé que la densité spécifique sèche égale à 1.5 g/cm^3 pour un Stabilisation du sol argileux stabilisé à l'aide de cendres de palme oil ash ultrafin (POFA) et du ciment. [60] En tant que nous aller trouver 1.96 g/cm^3 .

IV.6.Essais CBR (California Bearing Ratio) :

IV.6.1.Résultat CBR :

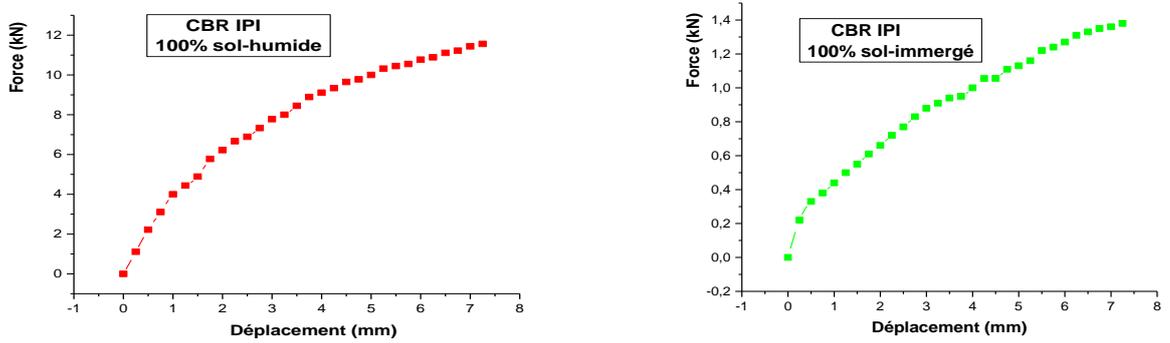


Figure IV.35 : La courbe CBR (100% sol).

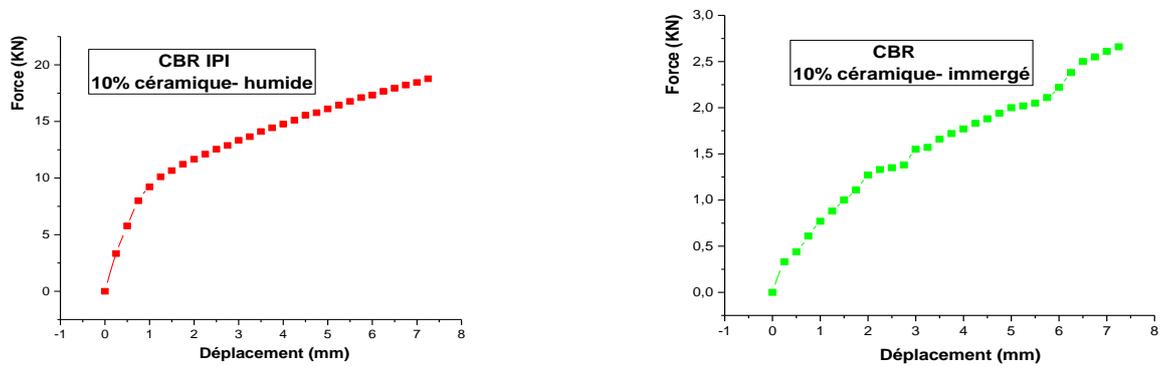


Figure IV.36 : La courbe CBR (10% déchet de céramique).

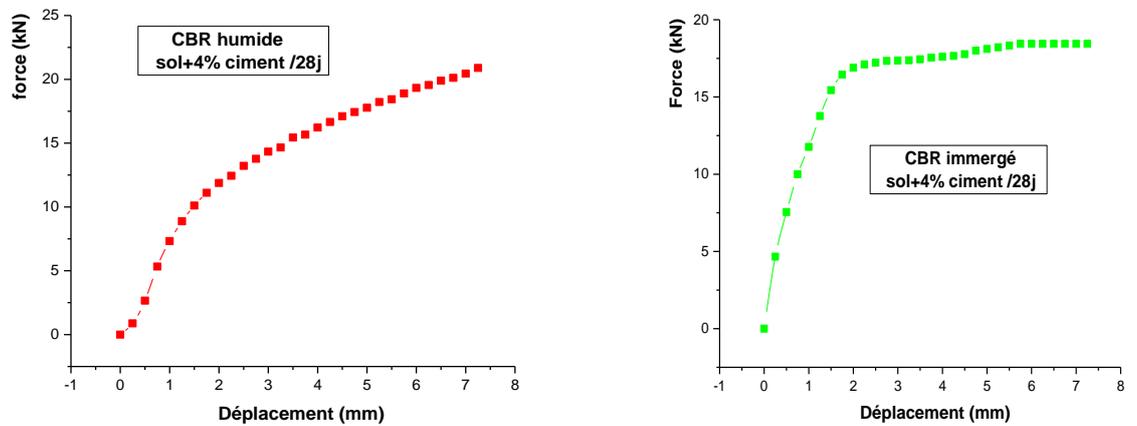


Figure IV.37 : La courbe CBR (4% ciment).

Tableau IV.38 : Résultat essai CBR (différents pourcentages de déchets de céramique et de marbre).

Déchet (%)	CBR (%) - humide	CBR (%) - Immergé
0%	51.64	5.82
5% Céramique	75.26	11.42
10% Céramique	94.05	10.15
15% Céramique	73.24	10.40
8% Marbre	81.57	12.26
10% Marbre	91.55	13.99

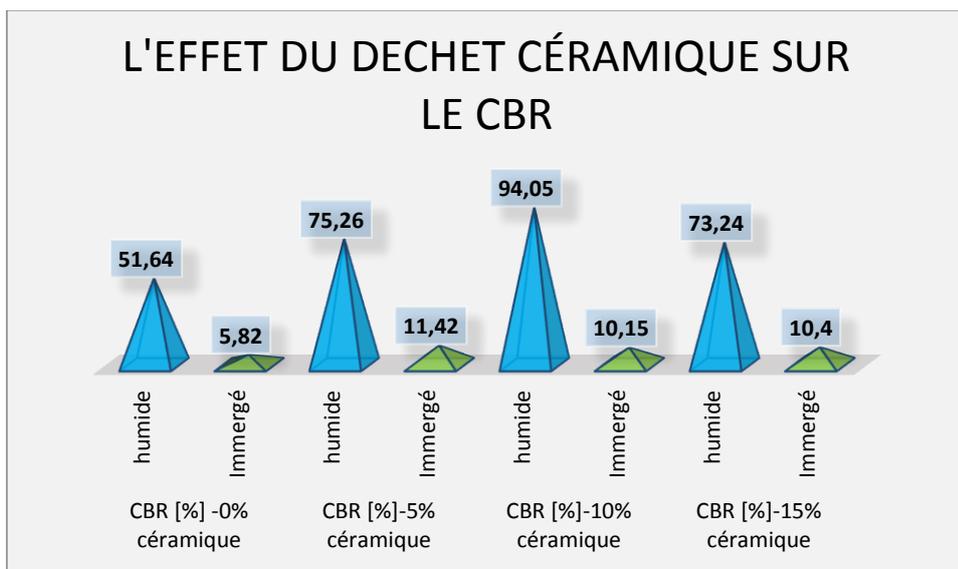


Figure IV.38 : Résultat essai CBR (Sol+ déchet de céramique).

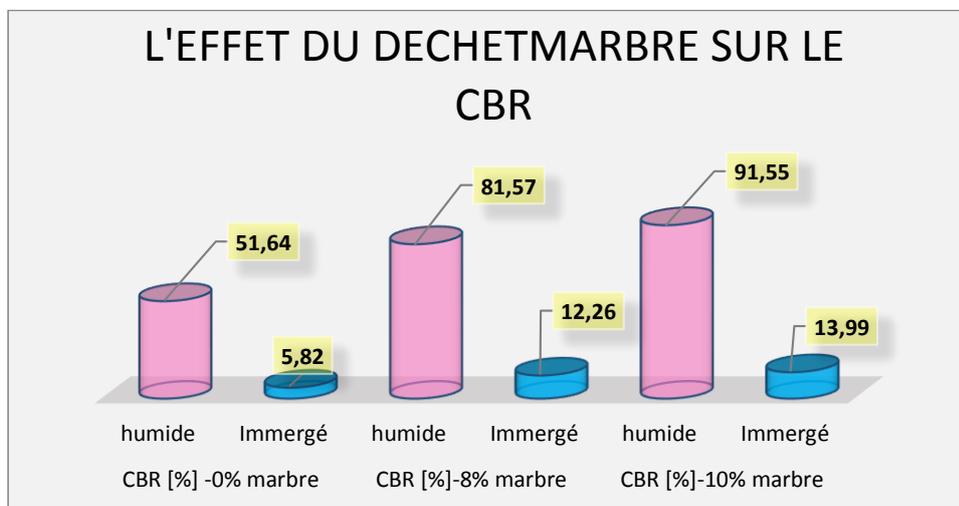


Figure IV.39 : Résultat essai CBR (Sol+ déchet de marbre).

Le déchet (marbre/céramique) influé positivement sur le résultat CBR, On montre qu'il y a une tendance générale d'augmenter des valeurs de CBR et IPI avec l'augmentation du taux de déchet, un pourcentage de 10% de ce dernier augmente entre 39,91% à 42.41% CBR (état humide).

L'amélioration de la portance du sol traitée (augmentation de CBR et IPI) est justifiée par la diminution du volume des vides dans le sol qui est due à la bonne distribution des particules du sol avec les particules fine de Traitement.

Tableau IV.39 : Résultat essai CBR (Sol+3% ciment).

Sol+3% ciment	CBR [%]-7j		CBR [%]-14j		CBR [%]-28j	
	humide	Immergé	humide	Immergé	humide	Immergé
	60,76	41,61	63,25	45,71	88,23	68,02

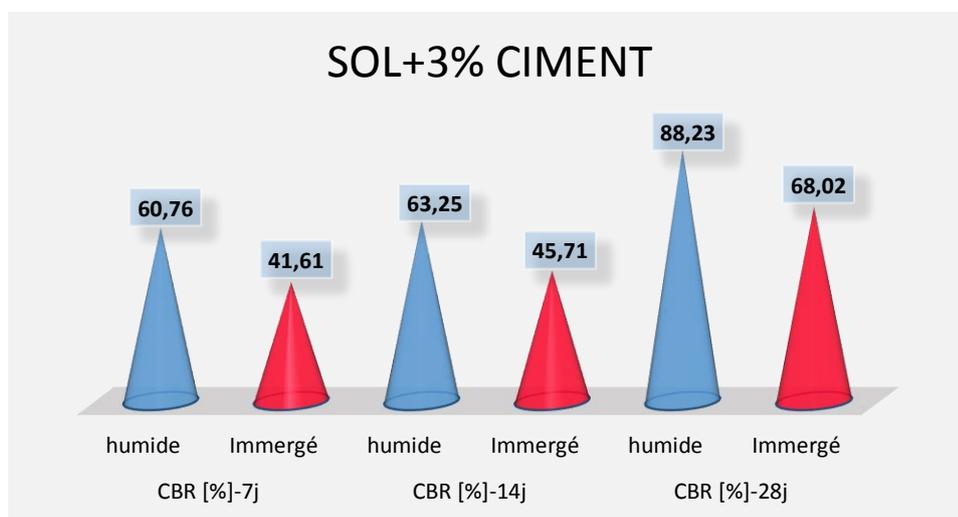


Figure IV.40 : Résultat essai CBR (Sol+ 3% ciment).

Tableau IV.40 : Résultat essai CBR (Sol+4% ciment).

Sol+4% ciment	CBR [%]-7j		CBR [%]-14j		CBR [%]-28j	
	humide	Immergé	humide	Immergé	humide	Immergé
	75,26	40.14	79,17	69,08	99.05	129.01

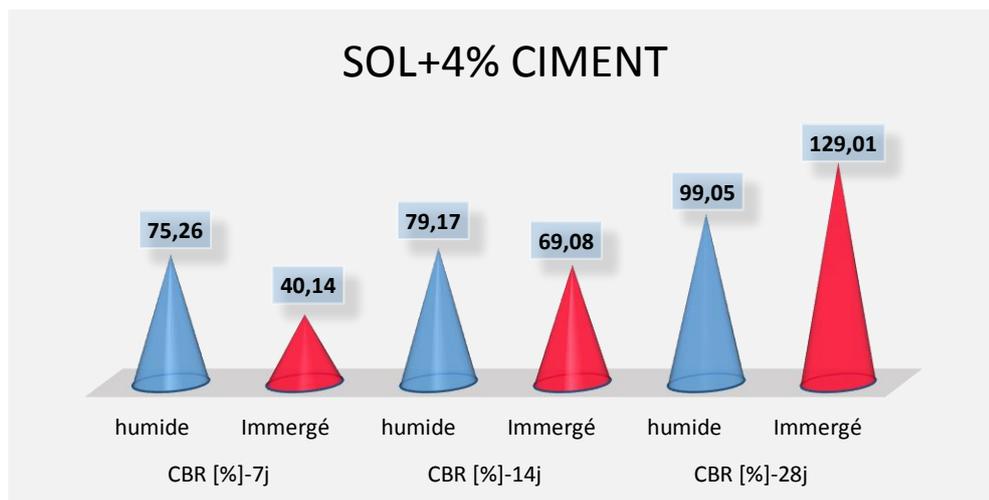


Figure IV.41 : Résultat essai CBR (Sol+4% ciment).

Le dosage du ciment augmente aussi le pourcentage de CBR aux cours du temps, ou l'indice CBR augmente avec l'augmentation du taux de ciment (Figure IV.40/IV.41).

Cette variation peut être due à l'effet chimique du liant hydraulique (réaction chimique entre ciment et l'eau), les fortes interactions se développent entre les particules de sol. Le squelette continu des formes matérielles dure (les hydrate) et fortes et enferme une matrice de sol inchangé, renforçant le matériel traité et en remplir des vides.

Compare notre travail pour certain chercheur [Deboucha et Hashim, 2008] ont constaté CBR entre 12% et 25% pour l'état émergé et humide pour peat sol avec ciment and sable [61], mais nos étude nous trouvons CBR entre 94 % et 129 % pour stabiliser sol avec déches de céramique et ciment, cette résultats efficace pour les route.

IV.7.Essais de Tassement :

A partir du déplacement mesuré pendant l'immersion des éprouvettes dans l'eau pour l'essai CBR on a calculé le tassement du sol étudié par les comparateurs (fig.IV.42).On appliquer une masse de 3.363 kg, ou la force appliquer sur la surface du sol égale à 33.63 N.



Figure IV.42 : Essai de tassement par le comparateur.

Tableau IV.41 : Résultat essai de tassement (sol + 4 % liant hydraulique).

H _{initial} (mm)	Lecture du comparateur		ΔH (mm)	H _{final} (mm)	Tassement (%)	
116.2	Sol non traité	24 h	24	0.24	115.96	0.20
		7j	21	0.21	115.99	0.18
	Sol traité (4% ciment)	14j	17	0.17	116.03	0.14
		28j	7	0.07	116.13	0.06

Avec :

$$\Delta H \text{ (mm)} = \frac{\text{Lecture du comparateur}}{100} .$$

$$H_{\text{final}} \text{ (mm)} = H_{\text{initial}} \text{ (mm)} - \Delta H \text{ (mm)}.$$

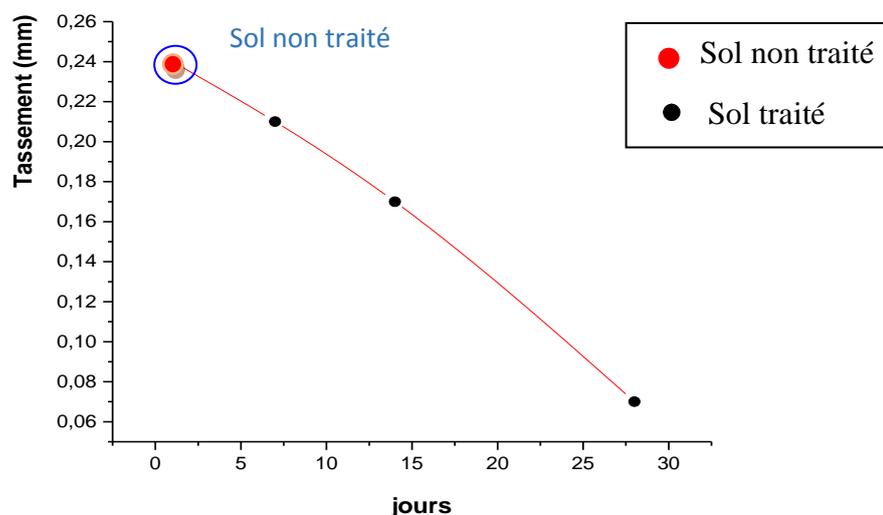


Figure IV.43 : Tassement du sol traité à 4% du ciment

Le potentiel de Tassement varie inversement proportionnel avec l'augmentation du pourcentage du ciment. Par ailleurs cette augmentation induit une diminution remarquable du taux de tassement pour le sol traité à 4% de ciment.

On remarque qu'un dosage du 4% de liant hydraulique diminuer le risque de tassement et presque il le négligé (Figure IV.43).

IV.8.Conclusion :

La stabilisation du sol avec déchet de céramique ou de marbre ne change pas son état, selon l'essai de limite d'Atterberg. Mais il influe sur les paramètres de la compacité de Proctor où L'utilisation de ces produits dans la masse du sol augmente la densité spécifique sèche maximale et réduit la valeur de la teneur en eau optimale. Il influe aussi sur la portance du sol ou ce déchet augmente la valeur du pourcentage du CBR dans les deux cas humide et immergé.

Le liant hydraulique (ciment), améliore et renforce le sol, il remplit les vides entre les particules avec un échange du squelette granulaire du sol traité.

Chapitre V :
Conclusion générale

La couche de forme d'une route peut jouer un rôle structurel, on a donc intérêt à privilégier ses performances par la technique de traitement des sols, Les travaux des couches de formes représentent une part importante du coût global de réalisation des projets routiers. Cette importance justifie une recherche d'optimisation globale, visant à minimiser les coûts, et protégé l'environnement.

Notre étude expérimentale a été consacrée à l'effet du déchet de céramique, marbre et liant hydraulique sur le comportement mécanique de la couche de forme d'une route de TIXTER. Au moyen des essais réalisés au niveau du laboratoire de l'université. Les paramètres qui interviennent dans cette étude sont les teneurs en ajout (déchet de céramique, déchet marbre et ciment) au sol pour voir leur effet sur la stabilité de la couche de forme. L'étude nous permet de tirer les principaux résultats et caractéristiques initiaux du sol utilisé :

- La teneur en eau 6,38%.
- La masse volumique sec 1,94 g/cm³.
- La masse volumique humide 2,20g/cm³.
- L'indice de plasticité 6,32.
- CBR : état humide (51.64%), état Immergé (5.82%)

Ainsi le traitement du sol avec 10% de déchet de céramique ou bien en poudre de marbre permet la meilleure amélioration des la caractéristique du sol ou nous avons constaté que L'ajout de la déchet de céramique dans le sol a un effet considérable sur le comportement physique du sol traité.

L'addition de la déchet de céramique et du marbre conjointement au sol influé sur les caractéristiques de compactage. Il augmente de la densité sèche avec une réduction de la teneur en eau initial. Ainsi il apporte des modifications des caractéristiques mécaniques que l'optimum de compactage et de la portance du CBR. Où 10% du déchet de céramique provoque amélioration entre 39,91% à 42.41% CBR a l'état humide, Le dosage du ciment augmente aussi la portance du sol aux cours du temps.

Par conséquent les caractéristiques du sol traité à 10% de déchet de céramique sont

- La masse volumique sec 1.99 g/cm³
- L'indice de plasticité 14.28
- CBR 94,05%

Grâce au traitement du sol avec les déchets de céramique, il devient apte à la réalisation de couches de forme d'une route, il a permis d'éviter la déformation et tassements de ce dernier. Le traitement de sol avec les différents ajouts utilisés dans cette étude (déchets de céramique, marbre et ciment) est une technique qui offre trois types d'avantages : techniques, économiques, écologiques et environnementaux

- Avantages techniques : performante, durable, sûre et codifiée ;
- Avantages économiques : le plus souvent moins chère que les techniques traditionnelles ;
- Avantages environnementaux : limiter les quantités de déchet de la céramique, marbre ajoutés chaque année, et protéger l'espace de la pollution qui influence sur la santé de habitants.

Le traitement des sols en construction routière est une technique parfaitement au point, qui répond aux besoins actuels et futurs et qui respecte les principes du développement durable, elle est donc appelée à se développer en travaux de terrassements et en assises de chaussées

Perspectives

- Utilisation d'autre pourcentage de ces déchets et déchets avec ciment pour faire comparer les résultats ;
- Réalisation de l'essai d'oedométrie ;
- Étude de la durabilité de sol étudié ;
- Étude de la réalisation de technique sur site ;
- Comparaison des résultats trouvés avec d'autres additifs.

Références Bibliographiques

Références Bibliographiques

- [1]. Organisation des nations unies pour l'éducation, la science et la culture, Routes dans les pays en voie de développement. <http://unesdoc.unesco.org/images/0018/001856/>.
- [2]. Bensmaine dalila, (2011) « Le comportement élasto-plastique des interfaces cas des chaussées Modélisation d'un essai de double cisaillement ». Mémoire magister, Université El Hedj Lakhdar Batna.
- [3]. Faiz Z., Fakhi S., Bouih A., Idrissi A., Mouldouira M., J. Mater. Environ. Sci. 3 (6) (2012) 1129-1136.
- [4]. Kherbache S., Bouzidi N., Bouzidi M. A., Moussaceb K., Tahakourt A.K., J. Mater. Environ. Sci. 7 (1) (2016)18-29.
- [5]. Handel N., Hafsi B., Touati A., Djabbar Y., J. Mater. Environ. Sci. 2 (S1) (2011) 520-525.
- [6]. Chaid R., Jauberthie R., Zeghiche J., Kherchi F., Eur. J. Environ. Civil Eng. 15(3) (2011) 427-445.
- [7]. Hebhoub H., Belachia M., Revue Nature et Technologie. 4 (1) (2011) 41-46.
- [8]. Senhadji Y., Escadeillas G., Mouli M., Khelafi H., Benosman S., Powder Technology. 254 (2014) 314–323.
- [9]. Aide-mémoire de mécanique de sol-Gérard Degoutte (CGAAER) et Paul Royet (Cemagref)-Réédition 2009.
- [10]. Maîtrise d'ouvrage : UNIT - Maîtrise d'œuvre et Production : ENTE 36 établissement d'Aix et Ecole des Mines de Douai- 18 juillet 2011.
- [11]. <http://recyclage.centerblog.net/3.html>.
- [12]. <http://www.jardinsdefrance.org/reussir-son-analyse-de-sol>
- [13]. Institut national des sciences appliquées de Toulouse – Jacques lerau-2007.
- [14]. Mellal Fatima, (2008/2009), « Etude du comportement physicochimique et mécanique d'un remblai routier marneux amélioré par la chaux éteinte Cas de l'autoroute Est-Ouest tronçon Oued Fodda /Khemis Miliana ». Mémoire de Magister. Université Hassiba Ben-Bouali –Chlef.
- [15]. Sadiki, A., Faleh, A., Navas, A. & Bouhlassa, S., 2006.Estimation De L'état De Dégradation Des Sols Sur Marnes Du Prérif (Maroc) Par La Susceptibilité Magnétique : Exemple Du Bassin Versant De L'oued ", Papeles De Geografia.Vol. 44, Pp. 119.
- [16]. <http://www.marbrerie.com/Sff-marb.htm>.
- [17]. <http://www.dpi-france.com/produit/rmb-13-roche-de-marbre-blanc-miami/>

- [18]. <http://www.larousse.fr/encyclopedie/divers/marbre/68153>.
- [19]. http://www.univ-setif.dz/facultes/ft/externe/departements/gc/Chapitre-II-Produits_ceramiques.pdf.
- [20]. <http://www.devis-pose-carrelage.com/etapes-pour-poser-un-carrelage-au-sol/>
- [21]. <http://paysdefayence.free.fr/ordures-menageres/bagnols112009/main1.htm>.
- [22]. <http://www.ottrecycling.de/index.php?RID=2&URID=18&LG=FR&P=D%E9chets%20de%20c%E9ramique>.
- [23]. <http://www.stbmateriaux.fr/nos-implantations/reprises-d-inertes.html>.
- [24]. Bulletin Febelcem ; (2003).Fédération De L'industrie Cimentière Belge. Le Retraitement En Place Des Chaussées Au Moyen De Ciment.
- [25]. Jay Ameratunga, Cynthia De Bok, Peter Boyle, Bill Tranberg (2007). "Planning for the Future – Ground Improvement Trials at the Port of Brisbane", Terra et Aqua, Numéro 108, Septembre.
- [26]. J. Ameratunga, P. Shaw et P. Boyle. (2003). Challenging Geotechnical Conditions at the Seawall Project in Brisbane, Coasts and Ports Conference (PIANC), Auckland, NZ.
- [27]. M. Andrews, P. Boyle, J. Ameratunga et K. Jordan (2005). Sophisticated and Interactive Design Process Delivers Success for Brisbane's Seawall Project, Coasts and Ports Conference, Adelaide, Australia.
- [28]. Sina Avsar, Mark Bakker, Gert Bartholomeeussen et Jan VanMechelen (2006). "Six Sigma Quality Improvement of Compaction at the New Doha International Airport Project", Terra et Aqua, Numéro 103 Juin.
- [29]. Frederic Gladstone Bell (1993). Engineering Treatment of Soils. Taylor & Francis Publishers, UK.
- [30]. C.J. Dykstra et A.H. Nooy van der Kolf (2003). "Recent Innovations in the Design and Construction of Railway Embankments", Terra et Aqua, Numéro 93, Décembre.
- [31]. H.A. de Leeuw, E.P.T. Smits, F.A.J.M. Mathijssen et A.L.Ph. Estourgie (2002). "Reclamation on Soft Subsoil by Spraying Thin Layers of Sand : The "IJburg" Project near Amsterdam". Terra et Aqua, Numéro 89, Décembre, pp. 9-30.
- [32]. J. Van Miegheem, F. Aerts, G. J.L. Thues, H. De Vlioger et S. Vandycke (1999). "Building on Soft Soils", Terra et Aqua, n° 75, Juin.
- [33]. Raj Purushothama (2005). Ground Improvement Techniques. Firewall Media Publishing.
- [34]. J. Spelt (2007). "TechNote: Vertical drainage installed from pontoons in Bremerhaven storage depot", Terra et Aqua, n° 106, Mars, pp. 26-28.
- [35]. D'autres liens relatifs la littérature appropriée sur le dragage sont disponibles sur www.iadc-dredging.com, cliquez sur IADC Activities.

- [36]. Guide de la définition et des bons usages des matériaux de revêtement et du petit mobilier urbain relatifs A L'espace Public-Les Matériaux De Revêtement Les Sols Stabilisés(2011)-Courriel:Pays-De-Gatine@Gatine.Org-Site-Internet: Wwww.Gatine.Org.
- [37]. Bensalem Ahmed, (2010) « Caractérisation Et Exploitation De L'argile De BENAZZOUZ Dans La Construction Routière ». Mémoire Magister, Université Badji Mokhtar-Annaba.
- [38]. Jean-Pierre Magnan-1 Avril 2010.École Nationale Des Ponts Et Chaussées L'amélioration Et Le Renforcement Des Sols
- [39]. Vessely, M.J. & Wu, J.T.H., 2002.Feasibility Of Geosynthetic Inclusions For Reducing Swelling Of Expansive Soils.Transportation Research Record, Pp.42–51.
- [40]. Ikizler, S.B., Aytakin, M. & Nas, E., 2008. Laboratory Study Of Expanded Polystyrene (Eps) Geofoam Used With Expansive Soils. Geotextiles And Geomembranes, Vol. 26, Pp, 189–195.
- [41]. Tang, C., Shi, B., Gao, W., Chen, F. & Cai, F. ,2007. Strength And Mechanical Behaviour Of Short Polypropylene Fiber Reinforced And Cement Stabilized Clayey Soil. Geotextiles And Geomembranes,Vol. 25, Pp.194–202.
- [42]. Cai, Y., Shi, B., Ng, C.W.W. & Tang, C., 2006. Effect Of Polypropylene Fibre And Lime Admixture On Engineering Properties Of Clayey Soil. Engineering Geology, Vol 87, Pp 230–240.
- [43]. Viswanadham, B.V.S., Phanikumar, B.R. & Rahul, V. M., 2006. Swelling Behaviour Of A Geofiber-Reinforced Expansive Soil. Geotextiles And Geomembranes,Vol. 27, Pp.73–76.
- [44]. Mateo, M., 1964. Recherches Sur La Stabilisation Des Sols Par La Chaux En Les Cendres Volantes. Publié Dans Les Comptes-Rendus Du Congrès, Madrid, Espagne.
- [45]. Robert L. Parsons, Justin P. Milburn, (2003). Engineering Behavior Of Stabilized Soils, Trb,
- [46]. Nalbantoglu, Z. & Gucbilmez, E., 2002.Utilization Of An Industrial Waste In Calcareous Expansive Clay Stabilization. Geotechnical Testing Journal, Vol. 25, Pp. 78–84.
- [47]. Bulletin Cfr-Info., 2002. Le Traitement Des Sols.
- [48]. Raymond, N., Yong, & Vahid, O. 2007.Experimental Study On Instability Of Bases On Natural And Lime/Cement-Stabilized Clayey Soils. Applied Clay Science, Vol.35, Pp. 238–249.
- [49]. Khelifa, T., 1994. Etude De La Stabilisation Des Sols Gonflants Par Ajout De Sable. Thèse De Magister, Université Houari Boumedienne, Alger.

- [50]. Thomas, M., Petry, P.E., Fasce, Dallas, N. & Little, P.E., 2002. Review Of Stabilization Of Clays And Expansive Soils In Pavements And Lightly Loaded Structures— History, Practice, And Future. *Journal Of Materials In Civil Engineering*, Pp.447.460.
- [51]. Haofeng, X., Xiaoming, Y., Chao, X. & Guanbao, Y., 2009. Strength Characteristics And Mechanisms Of Salt-Rich Soil–Cement. *Engineering Geology*, Vol 103, Pp.33–38.
- [52]. 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. Centre d'information sur le ciment et ces applications.
- [53]. document : traitement de sols et recyclage de terres à la chaux-www.chauxflash.be
- [54]. Code de bonne pratique pour le traitement des sols à la chaux et/ou aux liants hydrauliques centre de recherche routières-R 81 / 10.
- [55]. A. Hafdallah, (2007). "Étude du Dopage des Couches Minces de ZnO Élaborées par Spray Ultrasonique", Thèse de magister, université Constantine,
- [56]. E. Defaÿ, (1999). Thèse De Doctorat ; Institut National Des Sciences Appliquées De Lyon.
- [57]. F. Ng-Cheng-Chin, M. Roslin, Z. H. Gu. T. Z. Fahidy, *J.Phys.D Appl.Phy.* 31, (1998).
- [58]. Yuksel Yilmaz ^{a *}, Vehbi Ozaydin ^b. (2013), Compaction and shear strength characteristics of colemanite ore waste modified active belite cement stabilized high plasticity soils. *Engineering Geology* 155 (2013) 45–53
- [59]. Li Chen ^{a,*}, Deng-Fong Lin ^b. (2009) , Stabilization treatment of soft subgrade soil by sewage sludge ash and cement. *Journal of Hazardous Materials* 162 (2009) 321–327.
- [60]. Shahram Pourakbar^{a,*}, Afshin Asadi^b, Bujang B.K. Huat^a, Mohammad Hamed Fasihnikoutalab ^{a,b}. (2015) Stabilization of clayey soil using ultrafine palm oil fuel ash (POFA) and cement. *Transportation Geotechnics* 3 (2015) 24–35.
- [61]. Deboucha (2008). Engineering properties of stabilized tropical peat soils. Magister memoire, Universite Malaya, Malaysia

