

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur Et de La Recherche Scientifique



Université de Ghardaïa



Faculté des Sciences et Technologies
Département Génie civil

Mémoire présenté en vue de l'obtention du diplôme de MASTER

Sciences et Technologies Domaine:

Filière: Génie civil

Spécialité : structures

Par:

-OULED KOUIDER Rania

-LAOUAR Meriem

Thème :

**Influences de traitement à la chaux sur certaines caractéristiques d'une
Marne de la région de Ghardaïa**

Soutenu publiquement le 27/09/2020

Devant le jury :

ZERZOUR Ali	Professeur	Université de Ghardaïa	Président
AMIEUR Abed Naceur	Magistère	LTPS	Examineur
DAHEUR Elhadj Guesmia	Maître de conférences	Université de Ghardaïa	Encadreur

Année universitaire 2019/2020

REMERCIEMENT

Nous remercions Dieu tout puissant de nous avoir permis d'aller jusqu'à la fin de notre travail et de pouvoir le mettre en forme dans le présent manuscrit.

Nous tenons à exprimer tout d'abord nos remerciements aux membres du jury, qui ont accepté d'évaluer notre travail de fin d'étude.

La première personne que nous tenons à remercier est notre encadreur Dr DAHEUR Gesmia, qui a su nous laisser la liberté nécessaire à l'accomplissement de nos travaux, tout en y gardant un œil critique et avisé, aussi pour son dévouement au bon déroulement de notre travail notamment nos essais réalisés en laboratoire et aussi pour tous ses conseils avisés dans de nombreux domaines : scientifiques, techniques, rédactionnels.....

Nous remercions aussi Dr, AMIEUR Abed Naceur le directeur de laboratoire des travaux public du sud de nous avoir accueilli au sein Laboratoire.

Nous tenons à remercier tout l'équipe de LTPS, à l'aide sur le plan expérimental, notamment nos essais réalisés en laboratoire, qui ont nécessité beaucoup de rigueur, d'assiduité et de patience. Et aussi pour ils gentillesse et sa disponibilités qui ont permis de mener à bout ce projet fin d'étude.

Nous tenons à exprimer nos reconnaissances et nos gratitude à toutes celles et tous ceux qui nous ont aidés dans la Préparation de ce modeste travail.

DEDICACE

Je dédie ce mémoire de fin d'études

A Ma très chère mère

Tu représente pour moi la source de tendresse et l'exemple du dévouement qui n'a pas cessé de m'encourager et de prier pour moi

A Le meilleur papa

Aucune dédicace ne se saurait exprimer l'amour et le respect que j'ai toujours pour vous Rien au monde ne vaut les efforts fournis jour et nuit pour mon éducation et mon bien être

A mes très chères sœurs FATIMA et leur petite famille, SOURYA et mes frères MOHAMED FOUAD et OUSSAMA et NADIR Les mots ne suffisent guère pour exprimer l'attachement, l'amour et l'affection que je porte pour vous

A mes copines

LAOUAR MERIEM as toujours été présente dans le travail de ce mémoire malgré la distance je te souhaite un avenir plein de joie et de bonheur

A ma chère copine YAGOUB ZEINEB avec qui j'ai traversée toutes les épreuves de cette année inoubliable et as toujours été présente pour les bons conseils.

OULED KOUIDER Rania

DEDICACE

Je dédie ce mémoire de fin d'études

A Ma très chère mère

*Tu représentes pour moi la source de tendresse et l'exemple du dévouement qui
n'a pas cessé de m'encourager et de prier pour moi*

A Le meilleur papa

*Aucune dédicace ne se saurait exprimer l'amour et le respect que j'ai toujours
pour vous Rien au monde ne vaut les efforts fournis jour et nuit pour mon
éducation et mon bien être*

*A mon frère MOHAMED Les mots ne suffisent guère pour exprimer
l'attachement, l'amour et l'affection que je porte pour vous*

A mon copine

*OULED KOUIDER RANIA as toujours été présente dans le travail de ce mémoire
malgré la distance je te souhaite un avenir plein de joie et de bonheur*

LAOUAR Meriem

Résumé:

Devant les conditions économiques difficiles que travers l'Algérie, la valorisation des matériaux locaux en vue de répondre aux besoins des régions pauvres en matériaux nobles, semble la solution la plus adéquate pour faire face aux consommations abusives des matériaux noble.

L'objectif principal de ce travail est l'étude des potentialités de valorisation de la marne de la région Ghardaïa pour une utilisation dans la construction des chaussées sahariennes. Une première phase expérimentale consacrée à l'étude d'identification de notre matériau, puis le classer. La deuxième phase expérimentale consiste à étudier les effets de traitement par la chaux, l'objectif c'est d'améliorer les caractéristiques physico-mécaniques de notre matériau, en vue de répondre à certains critères géotechniques pour leur utilisation en corps de chaussées dans les zones Saharienne.

Enfin, Les résultats obtenus ne semblent pas être suffisants pour confirmer ou infirmer, d'une manière décisive et définitive, l'aptitude des marnes traités à être utilisés en assise de chaussées à moyen ou forte trafic.

Mots clés : Marne, matériaux locaux, technique routière saharienne, traitement à la chaux ; ...

Abstract:

Faced with the difficult economic conditions that throughout Algeria, the valorization of local materials to meet the needs of regions for in noble materials seems the most adequate solution to deal with the abusive consumption of noble materials.

The main objective of this work is the study of the potentialities of valorization of the marl of the Ghardaïa region for use in the construction of Saharan roads. First experimental phases devoted to the study of the identification of our material, and then classify it the second experimental phase consists in studying the effects of lime treatment; the objective is to improve the physico-mechanical characteristics of our material in order to meet certain geotechnical criteria for their use in pavement bodies in Saharan areas.

Finally, the results obtained do not seem to be sufficient to confirm or deny, decisively and definitively, the suitability of treated Marne for use on medium or heavy traffic pavements.

Keywords: Marne, local materials, Saharan road technique, and lime treatment; ...

الملخص:

في مواجهة الظروف الاقتصادية الصعبة التي تمر بها الجزائر، يبدو أن تحسين المواد المحلية من أجل تلبية احتياجات المناطق الفقيرة من المواد النبيلة هو الحل الأنسب للتعامل مع الاستهلاك المفرط للمواد النبيلة.

الهدف الرئيسي من هذا العمل هو دراسة إمكانية ترميم مارل منطقة غرداية لاستخدامها في بناء أرصفة الصحراء. مرحلة تجريبية أولى مخصصة لدراسة التعريف لموادنا ثم تصنيفها. تتكون المرحلة التجريبية الثانية من دراسة آثار المعالجة بالحجر، والهدف منها هو تحسين الخصائص الفيزيائية الميكانيكية لموادنا، من أجل تلبية معايير جيوتقنية معينة لاستخدامها في هياكل الرصف في المناطق الصحراوية.

أخيراً، لا يبدو أن النتائج التي تم الحصول عليها كافية لتأكيد أو نفي، بشكل حاسم ونهائي، ملاءمة المارل المعالج لاستخدامه في رصف الأرصفة في حركة المرور المتوسطة أو الكثيفة.

الكلمات المفتاحية: المارن، المواد المحلية، تقنية الطرق الصحراوية، معالجة الجير. ..

LISTE DES FIGURES

N°	Titre	Page
Figure I-1	Classification des sols fins selon abaque de casagrande.	6
Figure I-2	Classification routière selon le GTR	7
Figure I-3	Marne noire à Jurassique	10
Figure I-4	Marnes noires - l'Oxfordien	10
Figure I-5	Marne gris bleu Jurassique	11
Figure I-6	La marne bleue	11
Figure I-7	Marne gréseuse vin Trias – Neffies	11
Figure I-8	La marne de gréseuse	11
Figure I-9	Calcaire marneux –Hortus	11
Figure I-10	Calcaire marneux -carlencas	11
Figure I-11	Une marne carbonifère	11
Figure I-12	Altération de la surface et le profil	14
Figure I.13	Schéma de rupture du remblai par poinçonnement du sol de fondation	16
Figure I.14	Schémas de ruptures de type circulaire	16
Figure I-15	Schéma du tassement et du déplacement latéral du sol de fondation	17
Figure II-1	Schéma du mécanisme observé lors du traitement (Goual I. 2002).	25
Figure II-2	Influence de traitement à la chaux sur la consistance d'un sol.	26
Figure II-3	Influence du traitement sur les caractéristiques de portance	27
Figure II-4	Influence du traitement à la chaux sur les caractéristiques de compactage	27
Figure II-5	Comparaison de sol avant et après le traitement à la chaux	33
Figure III-1	Courbe analyse granulométrique de la marne d'Oued Nachou	41
Figure III-2	Abaque de Casagrande.	46
Figure III-3	Principe de l'essai équivalent de sable.	47
Figure III-4	Schéma de la méthode utilisée.	52
Figure III-5	Courbe Proctor modifié de la marne d'Oued Nachou	53
Figure III-6	Variation de la pression en fonction de l'enfoncement de la marne	57
Figure III-7	Variation de la résistance à la compression de la marne d'Oued Nachou en fonction de la compacité	62
Figure III-8	Principe de l'essai de cisaillement direct à la boîte.	63
Figure III-9	courbe de la contrainte de cisaillement en fonction de déplacement.	65
Figure III-10	Droite intrinsèque de la marne d'Oued Nachou	65
Figure III-11	Classification des sols fins selon GTR.	70
Figure IV-1	Organigramme de conduite d'une étude de formulation.	71
Figure IV-2	Variation des limites d'Atterberg en fonction de la teneur en chaux	74
Figure IV-3	Courbe Proctor modifié de la marne traitée à la chaux.	76
Figure IV-4	Variation de la teneur en eau optimale et de la densité sèche maximale en fonction du pourcentage de la chaux.	76
Figure VI-5	Variation de la pression du piston en fonction de son enfoncement (marne brute)	78
Figure VI-6	Variation de la pression du piston en fonction de son enfoncement (3% chaux)	79

Figure VI-7	Variation de la pression du piston en fonction de son enfoncement (6% chaux)	79
Figure VI-8	Variation de la pression du piston en fonction de son enfoncement (9% chaux)	80
Figure VI-9	Variation de la pression du piston en fonction de son enfoncement (12% chaux)	80
Figure IV-10	courbe de ICBR en fonction le pourcentage de la chaux.	81
Figure IV-11	Courbes contraintes-déplacements de la marne brute	83
Figure IV-12	Droite intrinsèque de la marne brute	83
Figure IV-13	Courbes contraintes-déplacements de la marne + 3% chaux.	84
Figure IV-14	Droite intrinsèque de la marne + 3% chaux	84
Figure IV-15	Courbes contraintes-déplacements de la marne + 6% chaux.	85
Figure IV-16	Droite intrinsèque de la marne + 6% chaux.	85
Figure IV-17	Courbes contraintes-déplacements de la marne + 9% chaux.	86
Figure IV-18	Droite intrinsèque de la marne + 9% chaux.	86
Figure IV-19	Courbes contraintes-déplacements de la marne + 12% chaux.	87
Figure IV-20	Droite intrinsèque de la marne + 12% chaux.	87
Figure IV-21	Variation de la cohésion et de l'angle de frottement en fonction du pourcentage de la chaux.	88

LISTE DES TABLEAUX

N°	Titre	Page
Tableau I-1	Dénomination des sols fins calcaires	6
Tableau I-2	Classification GTR (SETRA-LCPC 1980).	8
Tableau I-3	Représente le classement en Algérie	13
Tableau II-1	Avantages et Inconvénients des techniques de stabilisation utilisées	21
Tableau II-2	Classification des liants (Livet M. 1990).	22
Tableau II-3	Les spécifications des chaux à usage routier (Babouri R. 2008).	29
Tableau III-1	Valeurs climatiques moyennes et totales annuelles 2009 à 2019.	36
Tableau III-2	Les étapes de l'essai de l'Analyse granulométrique par tamisage.	39
Tableau III-3	Les étapes de l'essai de l'Analyse granulométrique par sédimentométrie	40
Tableau III-4	Résultats récapitulatif de l'analyse granulométrique	42
Tableau III-5	Classes de granulométrie de sols.	42
Tableau III-6	Les tapes les essaies limites de liquidité de la Marne.	44
Tableau III-7	Les étapes les essaies limites de plasticité de la Marne.	45
Tableau III-8	Valeur de limites d'Atterberg de la marne d'Oued Nachou.	46
Tableau III-9	Les étapes de l'essai Equivalent de sable ES.	48
Tableau III-10	Valeurs de l'Equivalent de sable ES de la marne d'Oued Nachou.	49
Tableau III-11	les étapes d'essai au bleu de méthylène.	50
Tableau III-12	Valeurs des coefficients VB de la marne d'Oued Nachou.	51
Tableau III-13	Classification des sols selon la valeur de V_B .	51
Tableau III-14	les étapes essai Proctor modifié.	52
Tableau III-15	Résultats récapitulatifs de l'essai de compactage.	54
Tableau III-16	Caractéristiques de compactage pour quelques matériaux routiers	54
Tableau III-17	les étapes d'essai CBR immédiate.	55
Tableau III-18	les étapes d'essai CBR imbibé.	56
Tableau III-19	Résultats récapitulatifs de compactage et de portance.	57
Tableau III-20	les étapes d'essai los Anglos.	58
Tableau III-21	Valeurs des coefficients de Los Angeles de la marne d'Oued Nachou. .	59
Tableau III-22	Spécification du coefficient LA pour couches d'assises de chaussées.	59
Tableau III-23	les étapes d'essai de compression simple.	60
Tableau III-24	les étapes essai cisaillement direct (uu)	64
Tableau III-25	Qualificatif du sol en fonction de la cohésion	66
Tableau III-26	Résultats analyses chimiques.	67
Tableau III-27	Classification du sol en fonction de la teneur en carbonate de calcium.	67
Tableau III-28	Caractéristiques géotechniques et mécaniques de la marne	68
Tableau III-29	Classification USCS des sols grenus (plus de 50 % d'éléments > 0,08 mm).	69
Tableau IV-1	Le cycle de la chaux	72
Tableau IV-2	classes de résistance de chaux hydraulique (Norme NF P 15 310)	73
Tableau IV-3	les caractéristiques chimiques de la chaux vive	74
Tableau IV-4	Degré de compactibilité et de traficabilité.	82

LISTE DES SYMBOLES

C : Terme de cohésion.

E : Module de Young.

ES: Equivalent de sable.

CBR: Californian Bearing Ratio Indice Portant Californien.

I CBR imb : Indice CBR imbibe.

ICBR imm :Indice CBR immédiat .

IP: Indice de plasticité.

LA: Coefficient Los Angeles.

LTPS: Laboratoire des travaux publics du sud.

OPM: Optimum Proctor modifié.

Rc: Résistance à la compression simple.

V_B: Valeur au bleu de méthylène.

ω: Teneur en eau exprimée en %.

ω_L: Limite de liquidité.

ω_{opm}: Teneur en eau optimale Proctor modifié.

ω_p: Limite de plasticité.

γ_{dmax}: Densité sèche optimale de l'essai Proctor modifié.

ε: Déformation (%).

σ: Contrainte normale.

τ: Contraintes de cisaillement.

φ: Angle de frottement

SOMMAIRE

INTRODUCTION GENERALE

Partie bibliographique

CHAPITRE I : GENERALITE SUR LES MARNES

I-1 Introduction.....	4
I-2 Les sols fins et leurs classification.....	4
I-2-1 Synonyme des sols.....	4
I-2-2 Classifications des sols.....	5
I-2-2-1 Classification USCS/LCPC.....	5
I-2-2-2 Classification routière.....	7
I-3 Les marnes.....	8
I-3-1 Généralités sur les marnes.....	8
I-3-2 Les différents types des marnes.....	9
I-3-2-1 Selon la couleur.....	9
I-3-2-2 Les constituants remarquables.....	9
I-3-2-3 L'intérêt stratigraphique et paléontologique.....	10
I-3-3 Principaux types des marnes.....	10
I-3-3-1 Les marnes bleues.....	10
I-3-3-2 Les marnes nummulitiques ou grises souris.....	10
I-3-3-3 Les marnes gréseuses.....	10
I-3-3-4 Les marnes grises.....	10
I-3-4 Développement des marnes.....	12
I-3-5 Classement des marnes en Algérie.....	12
I-3-6 Genèse des marnes.....	13
I-3-7 L'altération des marnes.....	14
I-4 Problèmes liée aux sols marneux dans les projets routiers.....	15
I-4-1 Problèmes de la stabilité.....	15
I-4-1-1 Rupture par poinçonnement.....	16
I-4-1-2 Rupture de type circulaire.....	16
I-4-2 Problèmes de tassement.....	17
I-4-3 Problème de gonflement.....	18
I-4-4 Problème d'érosion.....	19
I-5 Conclusion.....	19
CHAPITRE II : TRAITEMENT DES SOLS	
II-1 Introduction.....	20
II-2 Techniques des stabilisations utilisées.....	20
II-2-1 Stabilisation chimique.....	21
II-2-1-1 les hydrophobes.....	22
II-2-1-2 Les liants.....	22
II-3 Traitement des sols aux liants hydrauliques.....	23
II-3-1 Avantages techniques.....	23
II-3-2 Avantages économiques.....	23

II-3-3 Avantages écologiques et environnementaux	24
II-4 Effets de la chaux sur les sols.....	24
II-4-1 Action de la chaux vive (CaO).....	25
II-4-1-1 Action immédiate d'abaissement de la teneur en eau.....	25
II-4-1-2 Action immédiate sur les caractéristiques géotechniques.....	25
II-4-2 La chaux éteinte (Ca(OH) ₂).....	28
II-4-2-1 Actions à long terme de la chaux.....	28
II-4-3 Les chaux hydrauliques.....	29
II-5 Les spécifications des chaux à usage routier.....	29
II-6 Technique de réalisation des traitements.....	29
II-6-1 Technique courante.....	29
II-6-2 Mélange par la technique dite du dépôt reprise.....	30
II-6-3 Traitement dans le déblai ou sur le remblai.....	30
II-7 Matériels de traitement.....	31
II-8 Principales opérations de traitement.....	31
II-8-1 Préparation du sol à traiter.....	31
II-8-2 Ajustement de l'état hydrique du sol.....	31
II-8-3 Épandage du liant.....	32
II-8-4 Malaxage.....	32
II-8-5 Compactage partiel.....	32
II-8-6 Réglage.....	32
II-8-7 Compactage final.....	32
II-8-8 Protection de surface.....	33
II-9 Exemples d'études de traitement à la chaux dans le monde.....	33
II-9-1 Exemple de l'avenue Stewart à Las Vegas, USA (Mitchell, 1986).....	33
II-9-2 Exemple du chantier de l'autoroute A28 (France).....	34
II-10 Conclusion.....	34

Partie expérimental

CHAPITRE III : ETUDE D'IDENTIFICATION

III-1 Introduction	36
III-2 Présentation la climatologie de la région de Ghardaïa.....	36
III-3 Présentation des matériaux d'étude	37
III-4 Etude d'identification géotechnique	38
III-4-1 Analyse granulométrique	38
III-4-1-1 Analyse granulométrique par tamisage	39
III-4-1-2 Analyse granulométrique par sédimentometrie	40
III-4-2 Qualité des fines	43
III-4-2-1 Les limites d'Atterberg	43

III-4-2-2 Essai d'équivalent de sable	47
III-4-2-3 Essai au bleu de méthylène	49
III-4-3 Essai de compactage et de portance	51
III-4-3-1 Essai proctor modifié	51
III-4-3-2 Essai CBR.....	54
III-4-4 Essai Los Anglos	57
III-4-5 Essai compression simple.....	59
III-4-6 Essai cisaillement direct (uu)	62
III-4-7 Analyse chimique sommaire	66
III-5 Récapitulatif des essais d'identification	67
III-6 Classification de la marne d'oued nachou.....	69
III-6-1 Classification USCS	69
III-6-2 Classification GTR (cas des sols fins)	69
III-7 Conclusion	70
CHAPITRE IV : ETUDE DE TRAITEMENT DE LA MARNE	
IV-1 Introduction	71
IV-2 Présentation du liant hydraulique utilisé	72
IV-2-1 Les caractéristique physique de la chaux.....	73
IV-2-1-1 La résistance	73
IV-2-1-2 La masse volumique apparente.....	73
IV-2-1-3 La masse volumique absolue.....	73
IV-2-1-4 la couleur.....	73
IV-2-1-5 La granulométrie.....	73
IV-2-1-6 La surface spécifique Blaine.....	73
IV-2-2 Les caractéristiques chimiques de la chaux.....	74
IV-3 Essai de consistance.....	74
IV-3-1 L'influence du traitement sur les caractéristiques des limites d'atterberg.....	74
IV-4 Stabilité immédiat	75
IV-4-1 Influence du traitement sur les caractéristiques de compactage (Proctor Modifié)	75
IV-4-2 Influence du traitement sur les caractéristiques de portance (Essai CBR).....	78
IV-5 performance mécanique.....	82
IV-5-1 Influence du traitement sur la résistance au cisaillement.....	82
IV-6 Conclusion	88
CONCLUSION GENERALE	

Introduction générale

INTRODUCTION GÉNÉRAL

Avec le développement socioéconomique et l'intensification de l'activité industrielle, est la conduit au développement des infrastructures routières à travers le monde, plus particulièrement en Algérie, a créé un besoin immense en matériaux de chaussées, qui doivent répondre rigoureusement à certains critères géotechniques tels que : la dureté, la propreté, la granulométrie, etc....

Les projets routiers deviennent, de plus en plus, contraignants et demandent des mouvements de terre importants dans des sols parfois difficilement réutilisables, et les gisements naturels de matériaux nobles, inégalement répartis, s'épuisent. Il convient donc d'épargner les ressources existantes, d'autant plus que le coût du transport devient élevé. Par conséquent, les ingénieurs et les techniciens ont été poussés à innover en mettant à profit les particularités qu'offre les zones Sahariennes (climat, matériaux locaux, faiblesse du trafic et portance du sol support qui est différent de celui des régions humides) ; pour ouvrir très largement l'éventail des matériaux utilisés en corps de chaussées, tels que les matériaux fins pour construire des routes à coût optimisé.

Actuellement, la valorisation des matériaux locaux dans la géotechnique reste d'actualité ; il s'agit de mieux maîtriser leur comportement dans diverses situations et leur mise en œuvre et d'arriver à une caractérisation qui facilitera leur classification et leur utilisation par des ingénieurs et techniciens routiers.

La marne par exemple fait partie des matériaux naturels les plus abondants en Algérie, elles sont des roches relativement tendres, qui subissent une géodynamique très active à leur surface ce qui les rend très vulnérables aux aléas de la nature et des hommes. Elles présentent certainement une résistance élevée à l'état sec, mais leur comportement peut être différent en contact avec l'eau, Il serait donc intéressant d'étudier le comportement de ce matériau ,ceci permettra d'évaluer avec plus de précision les différents désordres qui peuvent apparaître à court ou à long terme, à savoir les (tassements, gonflements, poinçonnements, cisaillements et glissements) dans le but de son utilisation dans d'éventuelles activités de génie civil, notamment lors de la réalisation des couches de chaussées, remblais, digues, support de fondations...

Le traitement à la chaux ainsi que aux liants hydrauliques routiers est une technique communément utilisée sur terrain permettant de pallier les faibles caractéristiques mécaniques

et la mauvaise maniabilité présentées par ce type de sols. Mais la production et l'utilisation de ces liants hydrauliques est responsables d'une part significative de l'impact environnemental, en terme de consommation de ressources énergétiques et de réchauffement climatique.

Notre travail de recherche, se propose de contribuer à l'étude de l'amélioration des performances mécaniques des marnes de la région de Ghardaïa Par leur stabilisation à la chaux. L'atteinte de ces objectifs a pour but de fabriquer un matériau pouvant être utilisé en couches de base et de fondation en assise des chaussées à moyen et fort trafic.

Les objectifs majeurs de notre travail se résument dans les axes suivants :

➤ **Valorisation :**

Valoriser les marnes qui sont initialement inadéquats à une utilisation routière pour des chaussées à trafic relativement élevé.

➤ **Economique :**

- Préservation des ressources en matériaux routiers de qualités.
- Eviter le recours à des transports onéreux et gênants pour le réseau routier local.
- Réduction des épaisseurs des couches de chaussée.
- Réduction du coût global du projet routier.

Ce mémoire présente deux parties :

➤ La première partie, consacrée essentiellement à une étude bibliographique :

Chapitre I : elle comporte des généralités sur les marnes ainsi que les problèmes liés aux sols marneux dans les projets routiers.

En suite, le chapitre II : présente les mécanismes de traitement des sols aux liants hydrauliques.

➤ La deuxième partie est expérimentale, comporte deux chapitres :

Chapitre III : l'étude identification. Il comporte une représentation générale de la marne étudiée (localisation et la climatologie de la région de Ghardaïa) et les différents essais d'identification réalisés au laboratoire des travaux public du sud (LTPS) pour déterminer leurs caractéristiques physiques, chimiques et minéralogiques.

Chapitre IV : Présente l'étude de l'effet de traitement à la chaux sur les caractéristiques immédiates et sur les performances mécaniques de notre échantillon.

Enfin, ce mémoire se termine par des conclusions permettant de synthétiser les principaux résultats obtenus et d'envisager quelques perspectives.

CHAPITRE I:

GENERALITE SUR LES MARNES

La marne fait partie des matériaux naturels les plus abondants en Algérie, elles sont des roches relativement tendres, qui subissent une géodynamique très active à leur surface ce qui les rend très vulnérables aux aléas de la nature et des hommes. Il serait donc intéressant d'étudier ce matériau, et utilisation en technique routière.

I-1 Introduction:

En mécanique des sols, on attache une grande importance à la rigueur dans la définition des caractéristiques des sols car elles serviront par la suite à d'écrire les propriétés mécaniques et hydrauliques ou expliquer certains de leurs comportements. Certains de ces caractéristiques se mesurent aisément sur le terrain ou en laboratoire, d'autres sont déduites des premières à l'aide de relations mathématiques.

Dans ce chapitre, après un aperçu sur les sols fins et leurs classifications, on donne des généralités sur les marnes, puis on présente les problèmes liés aux sols marneux dans les projets routiers. Enfin, on clôture par une conclusion.

I-2 Les sols fins et leurs classifications :

I-2-1 Synonyme des Sols :

Le sol est défini par opposition au mot roche, dans sa définition géotechnique. C'est un agrégat naturel des 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 des sols ou des roches et présentant un caractère meuble. Le terme de « sol » est général. Selon la norme NF P 94-010, un sol est défini comme étant un « agglomérat constitué » :

- De particules solides séparables par trituration sous l'eau provenant soit de la désagrégation des roches par altération mécanique ou chimique sous l'effet d'agents naturels, soit de la décomposition d'organismes vivants, végétaux ou animaux, soit d'une activité industrielle. Le terme de sol, selon cette définition, convient à des nombreux matériaux :
- Les formations géologiques superficielles comme les dépôts des sédiments quaternaires, les roches endogènes altérées (arènes de gneiss, altérites de schistes).

- Les formations géologiques sédimentaires anciennes constituées des roches « tendres » (marnes, argiles, sables ...).

Les roches sédimentaires se composent de :

- 82% de roches à grains fins (marnes, schistes, argiles).
- 12% de calcaires.

I-2-2 Classifications des sols :

Il existe trois principaux systèmes de classification des sols à savoir :

- *La classification USCS/LCPC,*
- *Les classifications routières,*
- *La classification triangulaire.*

Nous allons présenter dans ce qui suit uniquement les deux premiers systèmes de classification car le troisième est utilisé notamment par les pédologues.

I-2-2-1 Classification USCS/LCPC :

Cette classification est la plus utilisée en mécanique des sols. Elle a été développée aux Etats-Unis dans les années 1950 sous le nom *United Soil Classification System (USCS)* (Ch. Schon), puis francisée au début des années 1960 sous le nom *de Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (LCPC)*. La classification USCS/LCPC est basée sur les dimensions des particules (granulométrie) et leur comportement à l'eau (plasticité). Elle prend en compte également la teneur de la fraction organique dans le cas des sols fins en mesurant la teneur en matières organiques par la méthode de la perte au feu. D'après cette classification, on peut distinguer:

- *Les sols grenus* : plus de 50 % des éléments > 0,08 mm.
- *Les sols fins* : plus de 50 % des éléments < 0,08 mm.

Pour les sols fins, la méthode de classification est basée sur les limites d'Atterberg (**Figure I-1**).

Cette classification ne traite pas deux problèmes importants, qui sont celui des carbonates et celui des particules de nature argileuse, qui peuvent avoir une influence décisive dans certaines circonstances (géotechnique routière notamment).

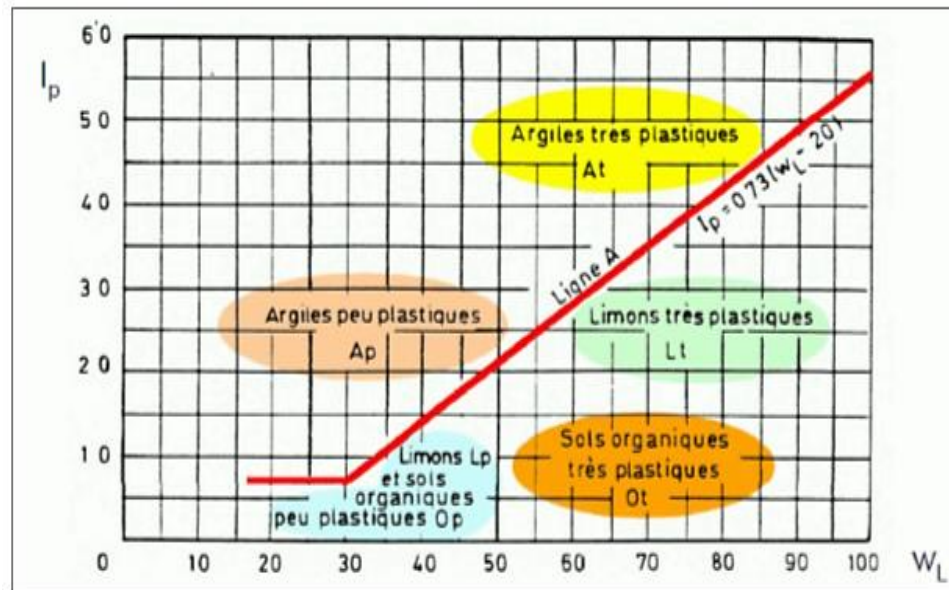


Figure I-1 : Classification des sols fins selon abaque de casagrande.

- **Pour les sols fins carbonatés** : on utilise en complément de la classification à base granulométrique, un vocabulaire exprimant la proportion des carbonates de calcium (Ca CO_3) dans le sol (ou la roche), défini dans le tableau suivant :

Tableau I-1 : Dénomination des sols fins calcaires

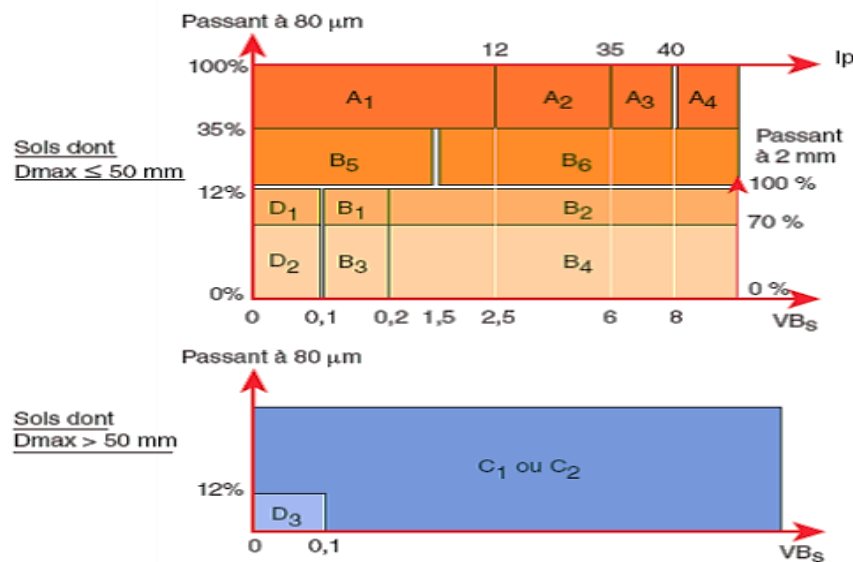
<i>Pourcentage de CaCO_3</i>	<i>Dénomination</i>
0 à 10	<i>Argile</i>
10 à 30	<i>Argile marneuse</i>
30 à 70	<i>Marnes</i>
70 à 90	<i>Calcaire marneuse</i>
90 à 100	<i>Calcaire</i>

- **Pour les particules argileuses** : qui n'est pas d'écrites quantitativement par les courbes granulométriques (poudre de roche par exemple), on peut utiliser la notion de sensibilité à l'eau selon l'essai bleu de méthylène pour préciser l'argilosité minéralogique du sol.

I-2-2-2 Classification routière :

Aux Etats-Unis, le système **AASHTO** développé par *American Association of State Highway and Transportation Official*, est utilisée pour classifier les sols et les mélanges sol-agrégat employés dans la construction des routes et des autoroutes.

En France, une classification particulière pour les sols à été établie afin de prendre en compte l'aptitude au compactage des matériaux en fonction des conditions de chantier et leur comportement mécanique ultérieur. Cette classification tient compte des mêmes caractéristiques de base de la classification USCS/LCPC, mais elle est beaucoup plus précise pour les particules argileuses et tient compte de l'altérabilité des matériaux au cours du temps (matériaux évolutifs). Cette classification est appelée **GTR** (Guide des Terrassement Routier) norme (NF P 11-300). Ce guide identifie les sols en 6 grandes classes : A, B, C, D, R et F. (Figure 2).



Matériaux rocheux	Roches sédimentaires	Roches carbonatées	Craies	R ₁
			Calcaires	R ₂
		Roches argileuses	Marnes, argillites, pélites...	R ₃
		Roches siliceuses	Grès, poudingues, brèches...	R ₄
		Roches salines	Sel gemme, gypse	R ₅
	Roches magmatiques et métamorphiques	Granites, basaltes, andésites, gneiss, schistes métamorphiques et ardoisiers...		R ₆
Matériaux particuliers	Sols organiques et sous-produits Industriels			F

Figure I-2 : Classification routière selon le GTR.

Tableau I-2: Classification GTR

<i>Classe</i>	<i>Définition</i>
A	Sols fins (limons, argile, ...)
B	Sols sableux ou graveleux avec fines (sables et graves argileuses,...)
C	Sols comportant des fines et des gros éléments (alluvions, grossières,..)
D	Sols insensibles à l'eau avec fines (sables et graves propres,...)

I-3 Les Marnes :

I-3-1 Généralités sur les marnes :

La marne c'est une roche sédimentaire contenant du carbonate de calcium (CaCO_3) et de l'argile. On la définit comme étant un matériau de transition entre le calcaire et l'argile; c'est une roche carbonatée contenant de 30 à 70% d'argile. Ainsi, elle tient de la fraction carbonatée une structure plus au moins résistante et de la fraction argileuse une possibilité d'évolution par destruction de la structure par suite de l'action de l'eau sur l'argile, conduisant à un matériau plastique (D. Delahaye et al). Cette définition purement pétrographique, a été sensiblement élargie sur le plan du pourcentage d'argile. En pratique, en génie civil, le nom marne peut être attribué pour toutes roches carbonatées contenant de 10 à 90 % d'argile.

Comme les argiles, les marnes sont tendre, finement poreuse, friable quand elles sont sèches, plastique lorsqu'elles sont mouillées. Mais à la différence des argiles, elles sont effervescentes avec les acides à cause de la présence du calcaire. La finesse des particules constitutives (minéraux argileux, carbonates et parfois, silice en faible quantité) place les marnes dans les groupes des lutites (ou pélites). En effet, comme le calcaire, la marne renferme de très nombreux éléments accessoires, visibles uniquement au microscope et dont le rôle peut être prépondérant, tels que : grains de quartz, paillettes de micas, cristaux de gypse, micro-organismes, etc. A côté de ces éléments, visibles uniquement au microscope, on peut trouver des éléments volumineux tels que : nodules de pyrite, quartz, gypse fer de lance ou encore en rose des sables, microfossiles, etc. Ces différents éléments responsables de la couleur et de l'aspect permettent de définir la marne rencontrée par une appellation. Les marnes apparaissent constituées de trois phases:

- Phase carbonatée.
- Phase sableuse.
- Phase argileuse.

Elles sont en effet réputées pour avoir souvent un comportement particulièrement gênant et dangereux parce qu'elles peuvent être à la fois très dures à l'extraction et très altérables, les blocs extraits perdant spontanément toute résistance au bout de quelque temps d'exposition aux intempéries. Les caractéristiques mécaniques sont liées à l'importance respective de chacune des phases, mais aussi à la nature minéralogique de la phase argileuse. La présence d'argile montmorillonitiques ou encore d'argiles fibreuses induit des caractéristiques mécaniques mauvaises. Cependant, cette influence particulière des argiles peut être tempérée ou au contraire exacerbée suivant les types de textures. Si les liaisons entre carbonates sont abondantes et fortes, le matériau aura un comportement de roche. Au contraire, si les carbonates sont noyés dans une matrice argileuse, le matériau aura un comportement de sol. Pour cela, il n'est pas nécessaire que le pourcentage d'argile soit différent ; des études sur les marnes du Tertiaire parisien montrent parfaitement ces différences de comportement entre deux matériaux minéralogiquement identiques, fraction carbonatée voisine et nature des argiles semblables. Un autre exemple est donné par l'étude des formations marneuses du secondaire du Vaucluse où le pourcentage de carbonate est sensiblement identique entre des matériaux non altérables d'aspect rocheux et des matériaux altérables. D'autres exemples étudiés antérieurement ont montré l'intérêt de l'étude des textures dans le cas de matériau à comportement évolutif, comme c'est le cas des marnes.

I-3-2 Les différents types des marnes :

I-3-2-1 Selon la couleur :

On parle ainsi si l'on s'intéresse à la couleur :

- Des marnes vertes.
- Des marnes bleues.
- Des marnes rouges.
- Des marnes bariolées.

I-3-2-2 Les constituants remarquables :

Si l'accent est porté sur un constituant remarquable, on parlera :

- Des marnes dolomitiques.
- Des marnes micacées.
- Des marnes sableuses.
- Des marnes glauconies usent.

- Des marnes bitumineuses.
- Des marnes gypseuses, etc.

I-3-2-3 L'intérêt stratigraphique et paléontologique :

Enfin, l'intérêt stratigraphique et paléontologique peut être dominant dans ce cas on aura :

- Des marnes à foraminifères,
- Des marnes à pholadomyies,
- Des marnes à spongiaires,
- Des marnes à radiolaires, etc.

I-3-3 Principaux types des marnes :

I-3-3-1 Les marnes bleues :

Elles sont reconnaissables à leur couleur bleu nuit. Ces marnes sont extrêmement fines et essentiellement composées d'argile, elles ne contiennent aucun élément détritique.

I-3-3-2 Les marnes nummulitiques ou grises souris :

Elles contiennent une fraction d'élément détritique fins, en particulier des sables dont leur présence rend ces marnes reconnaissables puisqu'elles croquent sous la dent.

I-3-3-3 Les marnes gréseuses :

Ces marnes ont une composante gréseuse importante, et même des niveaux de grés plus indurés interstratifiés dans les marnes.

I-3-3-4 Les marnes grises :

On les retrouve avec d'épaisseurs plus importantes et elles ne contiennent que de l'argile.



Figure I-3: les marnes noire à Jurassique



Figure I-4: Marnes noires - l'Oxfordien



Figure I-5: Marne gris bleu Jurassique



Figure I-6: La marne bleue



Figure I-7: Marne gréseuse vin Trias – Neffies



Figure I-8: La marne de gréseuse



Figure I-9: Calcaire marneux –Hortus



Figure I-10: Calcaire marneux -carlencas



Figure I-11: Une marne carbonifère

I-3-4 Développement des marnes :

La marne se développe suivant deux processus :

- ***Par l'action mécanique (écrasement, attribution) :***

Cela se produit durant l'exécution des travaux, sous l'effet des engins de chantier ou alors au sien d'un remblai, sous l'effet de charges statiques ou dynamiques.

- ***Par modification interne :***

Les liaisons sont détruites au sien du matériau par dissolution du ciment ou par des phénomènes physico-chimiques. L'évolution des marnes peut causer une modification des caractéristiques géotechniques du sol pouvant ne pas correspondre aux conditions dans les quelles, elle est réutilisée (sensible à l'eau, compactage, propriétés mécaniques que requière la stabilité des remblais.....). En autre, la destruction progressive de la structure naturelle des blocs présents dans les remblais peut engendrer un réarrangement du matériau et par conséquent des tassements. Ces derniers résultent du remplissage des vides entre bloc ou alors du fait que la densité du matériau produite par la destruction des blocs est supérieure à celle des blocs eux même.

I-3-5 Classement des marnes en Algérie :

Le tableau I-3 montre les différents types des marnes qui existent en Algérie par rapport à les caractéristiques minéralogiques, granulométriques et comportement des types des marnes.

Tableau I-3 : Représente le classement en Algérie

<i>ordre</i>	<i>Type de marne</i>	<i>Minéraux argileux dominantes</i>	<i>Texture</i>	<i>Sensibilité à la battance</i>	<i>Sensibilité à la fissuration</i>
1	Vert clair	Interstraliés (30% à 85%)	Limono-argileuse	limitée	Moyenne à excellent
	gris		Limono-argileuse	limitée	excellent
2	Vert clair armées	Interstraliés (30% à 85%)	Limono-argileuse	limitée	Moyenne à excellent
3	Brunes épaisses	Interstraliés (45% à 85%)	Argilo-limoneuse	limitée	Moyenne
4	Bleues compactes	Litte (35%)	Argileuse	Faible	Excellent
	brunes	Interstraliés (25%)	Argilo-limoneuse	limitée	Moyenne
	armées	Interstraliés (45 à 85 %)			

I-3-6 Genèse des marnes :

Dans les étapes proprement chimiques du cycle sédimentaire, les néoformations dominent (carbonates, silex, phosphate). Au cours du dépôt, et après celui-ci, interviennent les phénomènes de diagénèse (somme de processus de formation des roches à partir des boues).

a)- Diagénèse des carbonates :

D'après l'étude de la sédimentologie des carbonates, on a distingué deux types de phénomène dia génétique :

- Ceux qui affectent la composition minéralogique et chimique (remplacement, recristallisation, dissolution, cimentation, formation de nodules).
- Ceux qui altèrent la structure (fracturation, déformation, plastique, tassement par dessiccation).

b)- Diagénèse des minéraux argileux :

Les transformations dia génétiques affectent particulièrement les minéraux argileux en raison de leur taille, de leur surface spécifique élevée, de leur structure feuilletée facilitant les échanges d'ions entre le minéral et son entourage.

I-3-7 L'altération des marnes :

L'altération des marnes se traduit essentiellement par une dégradation de la structure de la roche en surface sous l'effet de divers mécanismes (Buffalo 1989). La couverture, le drainage, la morphologie, la stratification par rapport au pendage, le climat, agissent simultanément sur l'altération des marnes. Cependant, le facteur le plus affluant est le drainage des nappes. On citera, parmi les paramètres d'altération:

- La détérioration des propriétés mécaniques,
- La diminution du poids volumiques sec,
- La modification des caractéristiques chimiques,
- L'apparition des fissures,
- L'évolution de la marne (matériaux argileux),
- Le chargement de couleur de l'état naturel,
- L'augmentation de la teneur en eau de saturation.

Le processus d'altération s'effectue suivant les deux catégories complémentaires ci-après:

- *L'altération physique et mécanique :*

L'altération physique provoquée par la dessiccation et l'humidification a pour conséquence l'apparition de fissures pour laquelle la tension superficielle est rigoureusement exigible. De plus, elle détruit les liaisons entre les agrégats près de la surface est montrée sur (**figure I-12**).



Figure I-12: Altération de la surface et le profil

- ***L'altération chimique :***

L'écoulement de l'eau et l'oxydation entraînent une transformation des divers minéraux. (C. Le Bouteiller, 2011).

La présence de pyrite : Les pyrites sont des minéraux qui sont souvent rencontrés dans les roches sédimentaires, mais en général comme minéral accessoire. L'oxydation de la pyrite est alors donnée comme une cause de l'altération de ces roches par plusieurs auteurs. L'oxydation de la pyrite conduit à la formation d'acide sulfurique, qui peut déstabiliser les minéraux argileux comme le chlorite ou l'illite, ou réagir avec la calcite et donner naissance au gypse, par exemple.

I-4 Problèmes liées aux sols marneux dans les projets routiers:

La mise en dépôt de sols fins mous et compressibles (argiles, limons, marnes,) est fréquente dans les vallées et en bordure des côtes pour des raisons liées à leurs caractéristiques médiocres (faible portance, tassement et gonflement important, faible résistance au cisaillement, plasticité importante,...). Les désordres principaux constatés dans les corps de remblai sont les suivants :

- Formation des fissures longitudinales avec ou sans dénivellation et affaissement du profil en long.
- Glissement de talus, éventuellement superficiel.
- Rupture généralisée du remblai, avec rupture de la fondation.
- Interaction avec un ouvrage d'art.
- Rupture du remblai pendant la construction, par génération de pression interstitielle.
- Fissurations dues à des tassements différentiels.
- Tassements nuisibles pour l'exploitation.

I-4-1 Problèmes de la stabilité:

Les sols fins sont en général peu résistants. Lorsqu'ils sont rencontrés en surface, il peut se produire des ruptures, en général de type rotationnel (circulaire), lors de l'édification du remblai. Par contre, si l'on ne modifie pas ultérieurement la charge appliquée au sol par le remblai, il n'y a pas de risque de rupture différée. Les ruptures observées prennent généralement deux formes : par poinçonnement et par rotation.

I-4-1-1 Rupture par poinçonnement :

L'ensemble du remblai s'affaisse en pénétrant le sol support tandis que des bourrelets de terre se forment de part et d'autre des talus en raison de la réaction par soulèvement du terrain naturel (Figure 13).

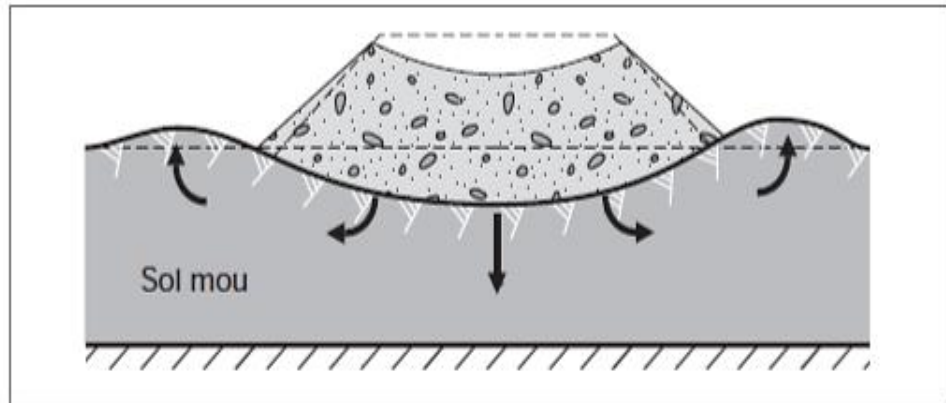


Figure I-13: Schéma de rupture du remblai par poinçonnement du sol de fondation

I-4-1-2 Rupture de type circulaire :

Il s'agit du type de rupture le plus couramment rencontré dans le domaine routier. Il se manifeste par un enfoncement localisé du remblai, par opposition à l'affaissement généralisé d'une rupture par poinçonnement. Cet enfoncement est la conséquence d'un déplacement d'une partie du remblai et du sol support le long d'une surface de rupture dont la forme est assimilable à une courbe circulaire et la cinétique à celle d'un mouvement rotationnel (Figure 14). Les désordres provoquent, en tête du remblai, une ou plusieurs dénivelées abruptes ou escarpements, dont l'amplitude peut atteindre plusieurs mètres.

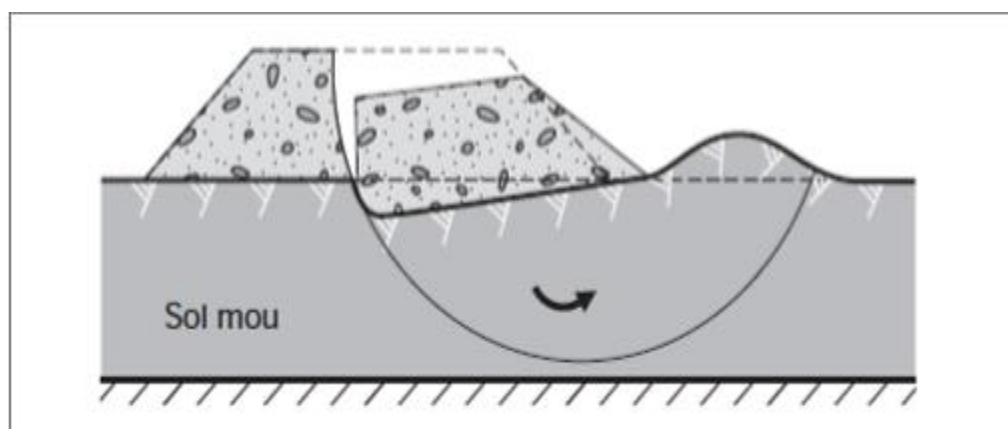


Figure I-14: Schémas de ruptures de type circulaire

I-4-2 Problèmes de tassement :

Les sols fins se déforment verticalement (tassement) et horizontalement sous les remblais. Ces déformations ne sont pas instantanées. Elles commencent pendant la construction et peuvent durer pendant des mois, voire des années ou des dizaines d'années suivant les propriétés des sols et l'épaisseur des couches. Les tassements ne sont pas uniformes à cause de la section trapézoïdale des remblais, de leur épaisseur variable et de l'hétérogénéité des sols supports. Le tassement d'un sol est une déformation généralement lente de ce dernier sous le poids du remblai qui se traduit :

- Au centre du remblai par un enfoncement vertical,
- Sous l'emprise du remblai, par un enfoncement vertical combiné à un déplacement latéral du sol de fondation,
- Hors de l'emprise du remblai, par un déplacement latéral de sol de fondation jusqu'à une distance directement liée aux épaisseurs du remblai et du sol compressible.

Les déplacements verticaux peuvent être d'épaisseur métrique si les sols mous sont très épais, alors que les déplacements horizontaux sont généralement plus faibles et de l'ordre de dizaines de centimètres dans les cas les plus importants. La vitesse des tassements est très variable et fonction du degré de consolidation des sols d'assise, degré de consolidation évalué à l'aide de l'essai œdométrique. Il n'est pas rare de mesurer des tassements résiduels de plusieurs centimètres sur des périodes de plusieurs années (Figure 15).

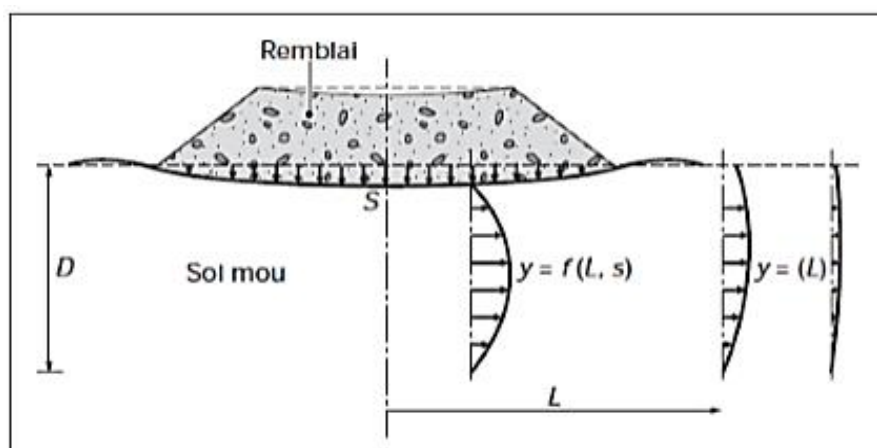


Figure I-15: Schéma du tassement et du déplacement latéral du sol de fondation

Les phénomènes de rupture ou de tassement des sols mous en assise de remblais peuvent avoir des développements plus ou moins importants et rapides qu'il convient de redouter et

d'anticiper au mieux, notamment lorsque ces remblais sont à proximité d'autres ouvrages. Ces derniers peuvent être:

- Des éléments externes au remblai comme des remblais contigus, mur de soutènement, bâtiments, culées d'ouvrages et différentes fondations.
- Des éléments internes au remblai comme des buses, cadres fermés, canalisations, etc. Les exemples les plus courants des conséquences des ruptures des sols sur des ouvrages avoisinants sont des ruptures de pieux de fondations des ouvrages d'art, des déversements de culées ou de murs de soutènement, des dégradations d'ouvrages enterrés, etc.

Les conséquences des effets dus aux tassements sont surtout sensibles aux abords des ouvrages d'art, notamment dans le cas de remblais d'accès après la réalisation de pieux de fondations des appuis, surtout s'il y a des chargements successifs. Les surcharges verticales proches de zones de pieux peuvent entraîner le phénomène bien connu de frottement négatif opéré par le sol qui se tasse le long du pieu en l'entraînant vers le bas. Les mouvements horizontaux induisent des phénomènes de flexion des pieux qui peuvent provoquer leur rupture ou le déplacement progressif des appuis susceptibles de créer des phénomènes des butées (blocage des dilatations, fissurations, joints inopérants, etc.).

I-4-3 Problème de gonflement :

Le phénomène de gonflement affecte chaque année diverse types des constructions à fondations superficielles (bâtiments et infrastructures routières,...) causant des désordres considérables qui imposent des reprises en sous œuvre très coûteuses et dont la réalisation n'est souvent pas maîtrisée. Par leur structure particulière, certaines argiles gonflent lorsque leur teneur en eau augmente et se rétractent en période de sécheresse. Ces variations de volume, rarement uniformes, se traduisent par des tassements différentiels entre les secteurs qui sont soumis à l'évaporation et à la succion des racines d'arbres et ceux qui en sont protégés. Ces mouvements de terrain peuvent avoir un impact sur les constructions. Les matériaux susceptibles de gonfler sous l'action de l'eau sont les sols argileux naturels, les marnes, les roches argileuses et les roches composées d'anhydrite.

Des essais de gonflement-retrait peuvent apporter une idée de ce risque dans les remblais routiers. Les essais de gonflement CBR sont réalisés pour les matériaux susceptibles de développer un gonflement après leur mise en œuvre. Les mesures de gonflement sont

effectués après une immersion de plusieurs jours voir plusieurs semaines d'éprouvettes de sols.

I-4-4 Problème d'érosion :

L'érosion est un domaine important en génie civil qui prend en compte l'érosion des remblais d'infrastructures linéaires de transport comme les routes et les chemins de fer. Ce phénomène de dégradation et de transport des matériaux solides sont causés par l'eau. L'érosion se définit comme un déplacement de sol attribuable à l'action érosive de l'eau, qui entraîne un apport récurrent de sédiments, même en faible quantité, dans le réseau hydrographique situé sur ou en bordure immédiate des parterres de coupe ou du tronçon de route faisant l'objet de l'évaluation. Il doit être récurrent, c'est-à-dire qu'il doit se répéter dans le temps lors des averses de pluie ou de la fonte des neiges. En contrepartie, une langue de sédiments stable, c'est-à-dire qui n'est plus alimentée par l'eau de ruissellement, ne doit pas être associée à un cas d'érosion, même si elle a atteint le réseau hydrographique, car elle ne constitue pas un apport récurrent. Généralement, un tel dépôt de sédiments non récurrent se forme pendant la construction des infrastructures routières avant que les travaux de stabilisation ou le gravelage de la surface de roulement ne corrigent la situation. Les causes de l'érosion sont:

- Mise à nu des sols pendant les travaux.
- Exposition du sol dénudé aux précipitations et aux vents.
- Entreposage de sol excavé à haut potentiel érosif au bord des routes, des fossés et des cours d'eau, sans protection adéquate.
- Modification du relief (profil et du niveau du sol).
- Modification du patron naturel de drainage des terrains.
- Absence de stabilisation des sites durant les périodes d'arrêt des travaux.

I-5 Conclusion :

Ce chapitre à été consacré à la description des sols fins en général et les marnes en particulier. Nous avons utilisé pour cela différentes échelles d'étude, permettant de montrer les différents minéraux constitutifs et les différents essais les caractérisant. Le sol comme matériau hétérogène, présente lors de son étude un comportement complexe, cette complexité s'accroît d'avantage dans le cas savoir les comportements mécaniques et physiques de sol. Notre but est d'étudier expérimentalement le matériau marne de notre région (Ghardaïa).

CHAPITRE II:
TRAITEMENT DES SOLS

Le traitement est un procédé qui vise à améliorer les caractéristiques d'un sol, en particulier sa résistance mécanique et sa durabilité. Dans ce chapitre, on va donner les objectifs de traitements aux liants hydrauliques et

II-1 Introduction:

L'étude fine des constituants des sols intéresse plusieurs domaines dont la géologie et la pédologie. La géotechnique routière valorise le sol comme matériau de construction et s'intéresse au sol dans ses interactions avec les agents chimiques de traitement. L'étude géotechnique comporte une identification du sol naturel et une détermination fine des caractéristiques mécaniques du sol traité. Ce chapitre est destiné à décrire la complexité du sol et de ses constituants et à faire le point sur les connaissances relatives aux mécanismes de stabilisation des sols à l'aide de traitements chimiques. Nous nous attacherons à présenter les actions des agents stabilisants avec les sols conduisant à un traitement réussi. Il existe plusieurs techniques de construction, de stabilisation et de confortement, ils ont été utilisés dans le domaine de génie civil afin de résoudre les problèmes vécus. Les solutions salines, l'ajout de la chaux, et les techniques préventives sont les techniques les plus utilisées. Avec un liant hydraulique pour but d'améliorer ses propriétés afin de lui conférer des caractéristiques à court terme (modification des teneurs en eau) et à long terme (amélioration des caractéristiques géotechniques) :

1. Réduire le volume des vides entre les particules solides (augmenter la compacité).
2. Colmater les vides que l'on peut supprimer.
3. Créer des liens et améliorer les liaisons existantes entre particules (résistance mécanique).

II-2 Techniques des stabilisations utilisées :

Parmi les techniques de stabilisation les plus couramment utilisées, on distingue (Babouri R. 2008).

- Stabilisation mécanique
- Stabilisation thermique
- Stabilisation chimique

Les principaux avantages et inconvénients de chaque technique sont résumés dans le tableau II-1.

Tableau II-1 : Avantages et Inconvénients des techniques de stabilisation couramment utilisées (Babouri R. 2008).

<i>Technique</i>	<i>Procédés</i>	<i>Avantages</i>	<i>Inconvénient</i>
<i>Stabilisation mécanique</i>	Compactage	-Le compactage est le plus économique. -Réduire le potentiel expansif.	-Il faut une grande quantité d'eau. (compacteur au-dessus de l'optimum avec une ω_n élevée).
	Substitution	-	-L'épaisseur de la couche -La disponibilité du matériau.
	Préhumidification	-	-Le temps de l'opération. -La distribution uniforme de ω_n .
<i>Stabilisation thermique</i>	Augmenter la température	-Réduire la répulsion électrique entre les particules.	-Très coûteuse.
<i>Stabilisation chimique (par ajout des matériaux)</i>	Les sels	-Augmenter la concentration ionique de l'eau libre. -Réduire le phénomène d'échange.	-Le choix de type de dosage et de la méthode d'addition d'un produit.
	Le ciment	-Augmenter la résistance. -Diminuer la plasticité. -Réduire le potentiel de variation de volume. -Augmenter la limite de retrait.	-Utilisation d'un dosage important.
	La chaux	-Diminuer la plasticité, la densité sèche et la pression du gonflement. -Augmenter la résistance et ω_{opt} . -Utilisation d'un faible dosage.	-Carbonation de la chaux.

II-2-1 Stabilisation chimique :

Les propriétés d'un sol peuvent être modifiées par l'ajout de certains additifs. Ces derniers sont classés en deux grandes familles (Aissa M. et al 2002) :

- 1) Les hydrophobes ;
- 2) Les liants.

II-2-1-1 les hydrophobes :

Les hydrophobes sont des produits dérivés amines des composés cationiques (par exemple : les amines aromatiques, les amines aliphatiques, ...). Les caractéristiques des hydrophobes permettent les variations de la teneur en eau en rendant le sol insensible à l'eau quelles que soient les conditions extérieures. L'absorption d'un produit hydrophobe se traduit par deux effets:

- 1) Diminution momentanée ou définitive de l'affinité du sol pour l'eau. Ce qui a pour conséquence d'accroître la résistance mécanique du sol et la réduction du gonflement ;
- 2) Diminution de la structure microscopique du sol.

II-2-1-2 Les liants :

Les liants se divisent en deux grandes familles qui sont les liants hydrauliques et les liants organiques. Le tableau suivant donne les principaux liants existants dans l'industrie.

Tableau II-2 : Classification des liants (Livet M. 1990).

<i>Hydraulique</i>	<i>Organiques</i>
Ciment	Goudrons
Chaux	Bitumes
Cendres volantes	Résines naturelles
Laitier	Polymères
pouzzolane	lignosulfite

 **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 chaux qui réagit avec l'argile par :

- Echange cationique,
- Flocculation et agglomération,
- Carbonations,
- 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.
- Une réaction lente produisant les matériaux cimentant. C'est la réaction pouzzolanique.

II-3 Traitement des sols aux liants hydrauliques :

Le traitement des sols aux liants hydrauliques est apparu dès le début des années 1950, dans plusieurs pays tropicaux, comme technique économique pour constituer des assises de chaussée dans des zones dépourvues de granulats (et de moyens financiers).

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 et environnementaux.

II-3-1 Avantages techniques :

Le traitement des sols permet la réalisation en remblais et en couches de forme présentant des caractéristiques mécaniques comparables à celles d'une grave-ciment ou grave hydraulique. Cette technique assure une bonne répartition des charges sur le support, grâce à la rigidité de la nouvelle structure ainsi qu'un bon comportement vis-à-vis des cycles de gel-dégel.

À partir de l'étude effectuée au laboratoire et selon les critères exigés par le guide du traitement des sols Selon le GTR 92 (Guide des Terrassements Routiers), Réalisation des remblais et des couches de forme, LCPC, SETRA, 1992), on a constaté qu'un pourcentage en chaux de 2% additionné est suffisant pour sa valorisation dans un remblai routier.

II-3-2 Avantages économiques :

Un faible pourcentage en chaux (1 à 3 %) est généralement suffisant pour l'amélioration du comportement des sols fins. Le traitement à la chaux sert à limiter les besoins en matériaux d'emprunt et a diminué les coûts liés à leur transport et à l'impact des mouvements de camions sur le chantier et sur ses voies d'accès puis faire améliorer la productivité : la circulation des engins est facilitée et les temps d'arrêt aux intempéries sont réduits, ce qui permet d'abaisser sensiblement les coûts de chantier et de diminuer les délais d'exécution et

augmenter essentiellement la durée de vie des structures (remblais, couches de forme) et diminution de leur coût d'entretien.

II-3-3 Avantages écologiques et environnementaux :

En plus de l'aspect économique, le traitement a un intérêt écologique, puisque la valorisation des ressources locales en matériaux, limite l'ouverture des carrières et des dépôts, atténuant ainsi l'impact du projet sur le milieu naturel. Le traitement participe, en l'optimisation des mouvements des terres, à la réduction des nuisances causées aux riverains et à la faune et la flore en diminuant les transports à l'extérieur du chantier.

Le traitement des sols en place à la chaux et/ou au liant hydraulique est une technique de traitement à froid. Le travail à froid réduit sensiblement la pollution et le rejet de vapeurs nocives dans l'atmosphère. En outre, cette technique permet une importante économie d'énergie globale, par la réduction des matériaux à transporter, des matériaux à mettre en décharge et donc une diminution des impacts indirects, des gênes à l'utilisateur et aux riverains et une réduction de la fatigue du réseau routier adjacent au chantier.

La réutilisation des matériaux en place limite l'exploitation des gisements de granulats, ressources naturelles non renouvelables. Ce qui contribue à préserver l'environnement.

II-4 Effets de la chaux sur les sols :

On distingue plusieurs natures de la chaux, selon la composition chimique de la roche d'origine (calcique et/ou dolomitique) et sa teneur en argile. On parle de chaux aérienne si la roche de base est un carbonate quasiment pur et de chaux hydraulique si elle contient de l'argile (jusqu'à 20 %). Les chaux résultant directement de la calcination d'un carbonate sont des chaux vives, celles ayant ensuite subi une hydratation sont des chaux éteintes.

Le traitement à la chaux a pour but essentiel de diminuer à court terme la teneur en eau des sols plastiques, de neutraliser et flocculer les argiles. Il s'ensuit une diminution de l'indice de plasticité (IP), une augmentation de l'indice Portant immédiat (cas des sols trop humide) et un aplatissement de la courbe Proctor (CIM béton).

L'action de la chaux dépend :

- De la finesse qui augmente la surface de contact.
- De la teneur en chaux libre (élément actif).

- De la durée du traitement.
- Du compactage qui doit suivre rapidement le malaxage (dans la journée).
- De la teneur en eau.

II-4-1 Action de la chaux vive (CaO) :

Ce type de chaux est le premier liant à avoir été utilisé en traitement de sols. Il s'agissait essentiellement de rendre possibles les terrassements de grands chantiers dans des limons argileux très humides.

II-4-1-1 Action immédiate d'abaissement de la teneur en eau :

L'extinction de la chaux vive au contact d'un sol très humide provoque un abaissement de la teneur en eau. Trois phénomènes concourent à cette modification de l'état hydrique :

- Absorption d'eau par hydratation de la chaux vive, selon la réaction suivante :



- Vaporisation d'une partie de l'eau sous l'effet de la chaleur dégagée par la réaction ci-dessus.
- Apport de matière sèche, diminuant arithmétiquement la teneur en eau du mélange Sol + chaux.

En moyenne, la diminution de la teneur en eau d'un sol traité est de l'ordre de 1 à 1,5% pour 1% de chaux (Akacem M. 2008).

II-4-1-2 Action immédiate sur les caractéristiques géotechniques :

L'adjonction de la chaux au sol provoque une modification de la qualité des argiles par échange des cations alcalins (Na⁺, K⁺...) par des cations Ca⁺⁺ apportés par la chaux; ceci développe des forces électriques conduisant à une agglomération des fines particules argileuses en particules grossières et friables (**figure II-1**).

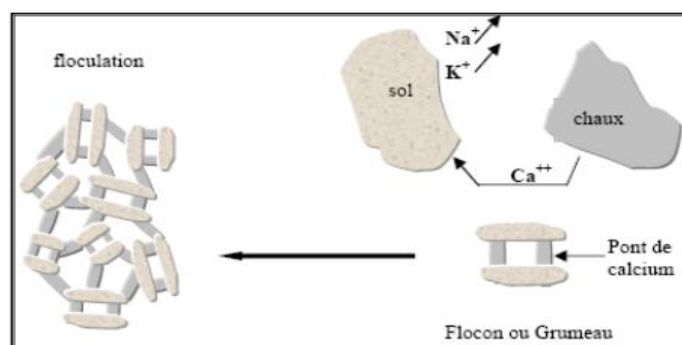


Figure II-1: Schéma du mécanisme observé lors du traitement (Goual I. 2002).

Cette action entraîne une amélioration de la consistance qui se traduit par une augmentation de la limite de plasticité s'accompagnant ou non d'une augmentation de la limite de liquidité, l'indice de plasticité est donc nettement diminué (**Figure II-2**).

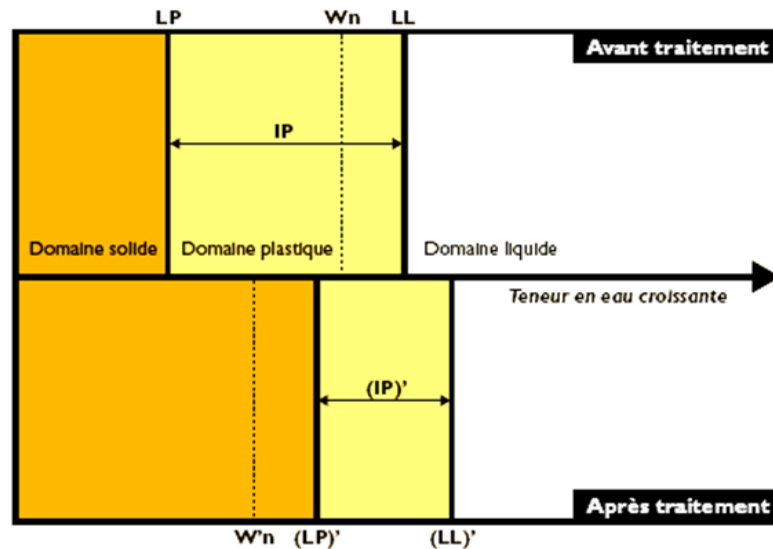


Figure II-2: Influence de traitement à la chaux sur la consistance d'un sol.

Cette évolution provoque un déplacement du domaine de plasticité vers des teneurs en eau plus importantes, ce qui peut faire passer d'un sol plastique, déformable, collant, à un mélange solide, apte aux opérations de terrassements.

L'évolution de la consistance débute dès l'épandage de la chaux avec la fragmentation due au retrait de déshydratation. Le malaxage amplifie ensuite le phénomène. Le réarrangement des particules et la consommation de l'eau interstitielle favorisent la contraction des agrégats de sol qui se traduit par la disparition des pores dont le diamètre est compris entre 10 et 100 μm (Nicolas C. 2004).

La portance des sols est améliorée. Ainsi l'indice CBR est de 4 à 10 fois plus élevé que pour un sol non traité (Nicolas C. 2004) (**figure II-3**), ce qui le rend circulaire par les engins de chantier et facilite le compactage des couches sus-jacentes.

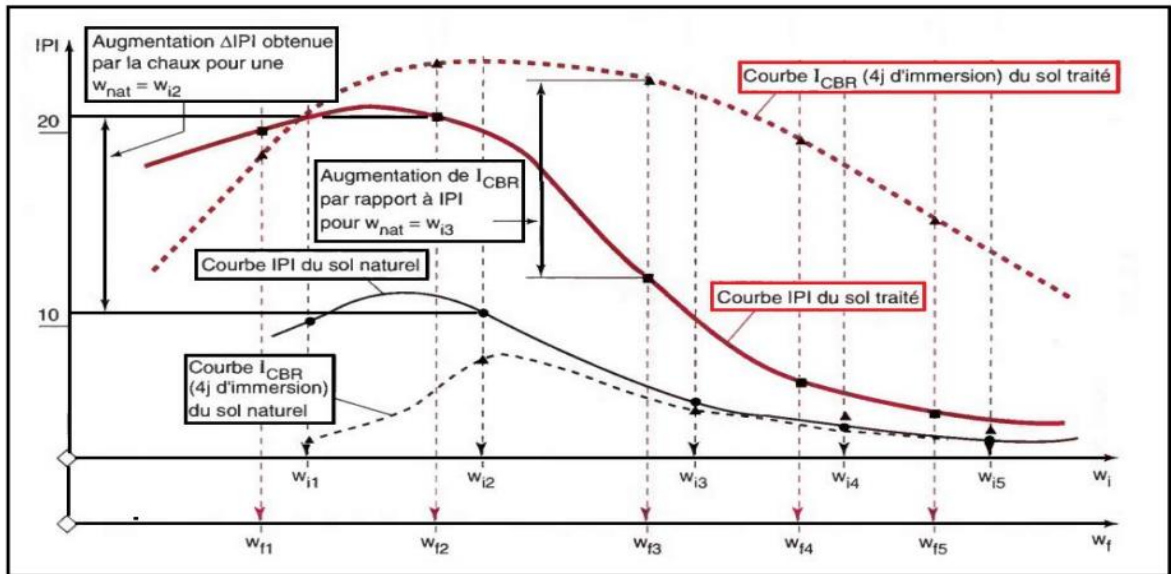


Figure II-3: Influence du traitement sur la portance du sol (GTS 2000)

Les caractéristiques de compactage sont modifiées, l'optimum de compactage est décalé vers des teneurs en eau plus importantes et la densité de compactage est plus faible. Dans le cas des sols argileux, l'allure générale de la courbe est aplatie traduisant une certaine insensibilité à l'eau du matériau. La modification du sol est importante dès un ajout de chaux en faible quantité. L'augmentation de la teneur en eau optimale et l'aplatissement de la courbe Proctor indiquent que le matériau traité sera plus facile à compacter efficacement, car acceptant plus d'humidité et rendu moins sensible aux variations de teneur en eau. La Figure II-3 illustre ces effets.

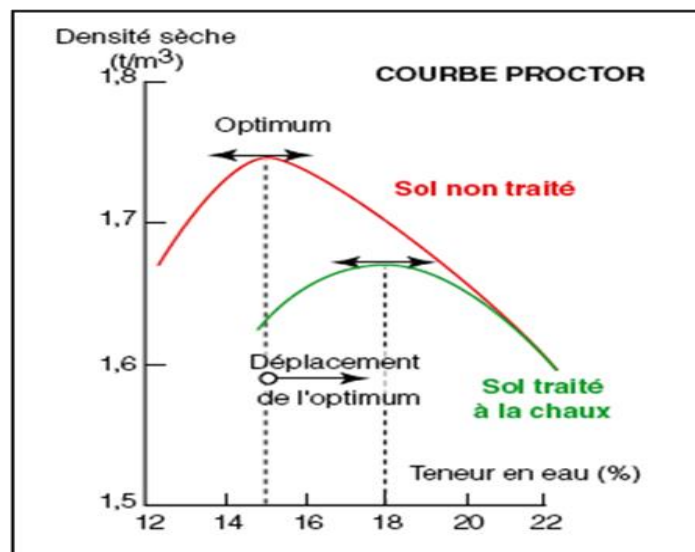


Figure II-4: Influence du traitement à la chaux sur les caractéristiques de compactage (Daheur 2011)

II-4-2 La chaux éteinte (Ca(OH)_2) :

La chaux éteinte est moins utilisée que la chaux vive. Sa densité foisonnée est sensiblement inférieure à celle de la chaux vive, ce qui rend son transport et sa manutention plus coûteux. De plus, son seul effet d'assèchement est son apport en tant que matière sèche, il est donc très limité.

Les actions immédiates de la chaux éteinte sur les caractéristiques géotechniques sont semblables à celles de la chaux vive. Elles sont simplement moins marquées, car la chaux éteinte n'est pas utilisée avec des sols très humides.

II-4-2-1 Actions à long terme de la chaux :

Une fois mise en présence de l'eau, la chaux vive se transforme en chaux éteinte. Les effets à long terme sont donc identiques pour les deux types de chaux.

En présence de particules d'argiles, se développe une action pouzzolanique qui aboutit à la formation de silico-aluminates de calciums insolubles, qui cristallisent en créant des liaisons analogues à celles obtenues avec un liant hydraulique. Toutefois, ces réactions sont lentes. Leur vitesse dépend, en outre, de la température. Ceci a d'importantes conséquences.

Dans les pays tempérés, et a fortiori dans les pays froids, la prise due à la chaux prend de nombreux mois pour aboutir à un niveau suffisant de résistances mécaniques et de tenue au gel-dégel (elle s'arrête quand la température du matériau descend aux alentours de 5 °C). C'est pourquoi il faut, en règle générale, éviter le traitement à la seule chaux pour des couches pouvant être exposées directement à du gel sévère (couches de forme en particulier). Le double traitement chaux +liant hydraulique est nécessaire dans de tels cas. Par ailleurs, quel que soit le climat, la présence d'une quantité suffisante de particules argileuses est nécessaire pour alimenter les réactions de prise. Avec des sols non ou peu argileux, la chaux aérienne ne conduit à un durcissement que par carbonatation sous l'effet du gaz carbonique de l'air, phénomène extrêmement lent et n'aboutissant qu'à un niveau modeste de résistances mécaniques. De tels sols ne se prêtent donc pas au traitement à la chaux.

Il convient aussi de signaler que les argiles à forte teneur en mica ne réagissent que faiblement, voire pas du tout, avec la chaux aérienne.

II-4-3 Les chaux hydrauliques :

N'y a pas, a priori, de contre-indication d'ordre technique à l'utilisation de chaux hydraulique pour le traitement de sols. En pratique, les chaux hydrauliques sont destinées essentiellement au bâtiment et les quantités fabriquées ne sont pas à la hauteur des besoins en matière de traitement de sol.

II-5 Les spécifications des chaux à usage routier :

Les spécifications relatives à la chaux que l'on peut trouver dans les diverses recommandations et directives officielles publiées par le SETRA et le LCPC, peuvent se résumer dans le tableau II-3 (NF P 98-101).

Tableau II-3 : Les spécifications des chaux à usage routier (Babouri R. 2008).

<i>Chaux Vive</i>	<i>Chaux Eteinte (Hydratée)</i>
<i>Critères granulométriques</i>	
1-Classe granulométrique 0/2 mm 2- Passant au tamis de 200 μm > 90 % 3- Passant au tamis de 80 μm \geq 50 %.	Passant au tamis de 80 μm \geq 90 %
<i>Critères chimiques et de réactivité</i>	
1-Teneur en chaux libre > 80 % 2- Teneur en MgO < 8% 3- Test de réactivité à l'eau : température finale > 60 °C en moins de 25mn	1-Teneur en chaux libre > 50 % 2- Teneur en MgO < 6% 3- Teneur en eau libre < 2 %.

II-6 Technique de réalisation des traitements :

II-6-1 Technique courante :

Le traitement appliqué à la réutilisation des sols sensibles à l'eau trop humides est quasiment toujours réalisé par traitement « en place ». La technique courante consiste à épandre la masse de produit de traitement, calculée pour l'épaisseur de sol malaxée prévue, à la mélanger avec le sol, le plus souvent à l'aide de charrues (à disques ou à socs), jusqu'à obtention d'une mouture présentant de visu un aspect homogène. Ensuite, suivant les cas, soit on charge et transporte le mélange à son lieu de mise en œuvre (traitement au déblai), soit on le compacte directement après malaxage (traitement au remblai). Des modalités

différentes, décrites ci-après, peuvent parfois s'imposer pour s'adapter aux particularités de certains chantiers.

II-6-2 Mélange par la technique dite du dépôt reprise :

Cette technique permet de mélanger des sols comportant des éléments blocailleux de $D_{\max} > 250$ à 350 mm (valeur considérée comme limite pratique pour le malaxage avec des charrues). Elle est réservée toutefois quasi exclusivement au traitement à la chaux car incompatible en principe avec le phénomène de prise hydraulique. La quantité de produit de traitement correspondant au dosage choisi, calculée pour l'épaisseur de la couche qu'il est prévu d'extraire, est épandue sur le sol. L'ensemble constitué par le matériau de cette couche et le produit de traitement épandu est chargé, transporté puis mis en dépôt provisoire. Celui-ci est profilé et légèrement compacté pour minimiser les entrées d'eaux pluviales. Au moment voulu (qui peut être plusieurs jours, semaines, voire plusieurs mois plus tard), le dépôt est repris, en extraction frontale, pour réaliser le remblai. Cette technique améliore l'homogénéité du sol du déblai (en nature et en état) en même temps qu'elle réalise un mélange de qualité généralement suffisante pour une mise en remblai, et ceci, sans utiliser de matériel de malaxage spécifique. Elle est cependant propice aux émissions de poussières de produit de traitement, notamment durant les séquences d'épandage et de chargement.

II-6-3 Traitement dans le déblai ou sur le remblai :

L'intérêt de traiter dans le déblai est de tirer profit des manipulations que l'on fait subir au sol au cours des phases successives de chargement, déchargement, régalaage, etc., pour améliorer l'homogénéité du mélange sol-chaux et pour produire l'assèchement maximal en conditions météorologiques évaporantes. En procédant ainsi, on améliore également la traficabilité des engins dans le déblai. Un autre Intérêt est de limiter, le cas échéant, la diffusion des poussières de produit de traitement en confinant le chantier de traitement à l'intérieur des talus du déblai. L'intérêt d'exécuter le traitement sur le remblai est de pouvoir minimiser les quantités de matériaux à traiter. En effet, en opérant au stade ultime de la mise en œuvre, il est possible de sélectionner les zones exigeant réellement un traitement à partir de l'observation du comportement du sol (ornières de plus de 10 à 15 cm sous les roues des engins de transport) ou à partir de mesures (portance à la plaque ou à la dynaplaque, IPI ou teneur en eau du sol).

II-7 Matériels de traitement:

Suivant les chantiers, les travaux de traitement des sols peuvent nécessiter des ateliers comprenant tout ou une partie des matériels suivants :

- Matériels de stockage des produits de traitement,
- Matériels d'épandage,
- Matériels de préparation des sols,
- Matériels de malaxage des sols en place,
- Matériels d'arrosage,
- Centrales de fabrication,
- Matériels de compactage,
- Matériels de réglage et de protection superficielle.

II-8 Principales opérations de traitement :

La réalisation des travaux de traitement d'un sol en place suit en générale les opérations élémentaires suivantes :

II-8-1 Préparation du sol à traiter :

Cette opération consiste à procéder à l'ouverture du sol au scarificateur ou au ripper pour faciliter le malaxage ultérieur



II-8-2 Ajustement de l'état hydrique du sol :

Une teneur en eau optimale est indispensable pour obtenir de bons résultats. 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.



II-8-3 Épandage du liant :

Il est préférable d'utiliser un épandeur à dosage pondérale, asservi à la vitesse d'avancement.



II-8-4 Malaxage:

Pour assurer une bonne homogénéité du matériau et une profondeur importante du malaxage, il est préférable d'utiliser un malaxeur ou un pulvimixer à rotor horizontal. De plus, il faut veiller à mordre suffisamment (20 cm) dans la partie déjà foisonnée pour ne pas laisser de matériau non malaxé en bordure de bandes.



II-8-5 Compactage partiel :

La qualité du compactage est, en général, déterminée par un objectif de densification. L'atelier de compactage, ainsi que le nombre de passes nécessaires, seront définis sur une planche d'essai de compactage.



II-8-6 Réglage :

Le réglage définitif doit se faire par rabotage sur toute la largeur à régler et non par comblement des points bas par les matériaux provenant de l'écraissage des bosses. Il faudra tenir compte de cette épaisseur de rabotage à raison de 3 cm environ. Les matériaux provenant du rabotage seront évacués.



II-8-7 Compactage final :

Il doit être réalisé immédiatement après le réglage final pour apporter le complément de l'énergie de compactage exigée suivant la couche considérée.



II-8-8 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 et du trafic. Elle doit être réalisée dans les plus brefs délais après le compactage final.



Sol avant traitement



Sol après traitement



Figure II-5: comparaison de sol avant et après le traitement à la chaux

II-9 Exemples d'études de traitement à la chaux dans le monde :

L'objectif de cette partie est de présenter quelques études de cas où de grandes différences sont apparues entre les résultats des études menées selon les procédures et les performances effectivement obtenues sur chantier.

II-9-1 Exemple de l'avenue Stewart à Las Vegas, USA (Mitchell, 1986) :

La construction d'une sous-couche d'une importante artère de Las Vegas (5 km) a nécessité un traitement à la chaux du matériau du projet. Les résultats des études de laboratoire ont montré qu'un traitement de 4 % de chaux permettait d'obtenir les performances mécaniques désirées. L'étude de traitement pour ce projet a consisté à réaliser des essais de compactage et de mesurer les résistances « R-Value » du sol traité. Le chantier s'est déroulé sans difficulté au printemps 1975. Malgré la bonne qualité de la route après le chantier, deux ans plus tard, des fissures dues au gonflement des couches inférieures sont apparues en surface de la route. Durant le printemps 1978, les désordres sont devenus importants dans certaines zones, alors que dans d'autres zones, la route est restée de bonne qualité.

Les causes de cet échec du traitement ont ensuite été recherchées. Il a été mis en évidence que les phénomènes observés n'étaient pas dus à un mauvais dimensionnement des couches concernées, ou au non respect des spécifications de chantier. De plus, les matériaux compactés dans les zones où les désordres ont été observés possédaient une densité plus faible et une teneur en eau plus forte que celles spécifiées pour le chantier.

En conclusion, l'auteur explique que la présence de chaux dans le matériau va améliorer ses caractéristiques mécaniques et donc les valeurs du « R-value » test. C'est l'apport d'eau en excès qui va entraîner le gonflement observé. Enfin, le « R-value » mesure une résistance sur des éprouvettes confinées, le confinement réduit peut-être le gonflement volumique dû à la formation d'ettringite.

II-9-2 Exemple du chantier de l'autoroute A28 (France) :

Baryla et al. (2000) décrivent le chantier de l'autoroute A28 reliant Alençon à Tours par Le Mans. Les matériaux utilisés pour réaliser la couche de forme sont les matériaux naturels du site. Sur une des sections, une marne provenant d'un déblai voisin a été utilisée. L'étude du traitement de cette marne a été conduite de façon classique en laboratoire selon les préconisations françaises du GTR, avec un dosage de 1 % de chaux vive et 8 % de liant hydraulique routier. Des mesures de résistances à la compression simple avec ou sans immersion (respectivement R_{ci} et R_c) et de résistances à la traction indirecte, par essai brésilien (R_{tb}) ont été réalisées à différents temps de cure. Les essais réalisés montrent un bon comportement mécanique du matériau.

II-10 Conclusion:

Dans ce chapitre, nous avons présenté le traitement des sols fins, son objectif, le produit de traitement, leur fabrication, domaines d'emploi, les principes d'action de ce produit, les performances à attendre d'un sol traité, les techniques de réalisation des traitements et les matériels utilisés pour le traitement des sols.

La technique du traitement des sols à la chaux présente d'énormes avantages : techniques, économiques, écologiques et environnementaux. Elle permet ainsi d'utiliser des matériaux non valorisables autrement. L'encadrement réglementaire prescrit des études permettant d'évaluer l'aptitude du sol lors des chantiers. Cet encadrement repose sur une bonne connaissance des mécanismes mis en jeu lors du traitement à la chaux. Pour le traitement aux liants hydrauliques, la compréhension des mécanismes est moins précise.

Bien que l'étude géotechnique permette de déclarer les sols aptes au traitement, il arrive que certains sols se révèlent inadaptés sur les chantiers. Diverses perturbations peuvent intervenir dans la stabilisation.

Enfin, les avantages écologiques et environnementaux peuvent se résumer dans la réduction de la pollution et le rejet de vapeurs nocives dans l'atmosphère, la diminution des impacts indirects comme par exemple les gênes à l'usager et aux riverains au chantier et limitation l'exploitation des gisements de granulats des carrières qui sont des ressources naturelles non renouvelables ce qui contribue à préserver l'environnement.

CHAPITRE III :

ETUDE D'IDENTIFICATION

Pour classer les sols et prévoir leur comportement, des essais au laboratoire selon des modes opératoire en rigueurs doivent être réalisés.

Dans ce chapitre, on va présenter les modes opératoires de quelques essais réalisés sur notre matériau.

III-1 Introduction :

Pour bien comprendre et analyser le comportement des sols utilisés en assise de chaussée, il faut les identifier à l'aide des essais géotechniques conventionnels de laboratoire.

L'identification géotechnique telle qu'elle est pratiquée actuellement dans les laboratoires routiers algériens s'effectue selon des modes opératoires établis par la norme française (NFP 94-056, NFP 94-057, NFP 94-051, NFP 18-598, NFP 94-068, NF P 94-093, NFP 94-078, NFP 18-573, NFP 98- 230-2) avec néanmoins certaines modifications.

III-2 Présentation la climatologie de la région de Ghardaïa :

Tableau III-1 : Valeurs climatiques moyennes et totales annuelles 2009 à 2019

<i>Année</i>	<i>T</i>	<i>TM</i>	<i>Tm</i>	<i>PP</i>	<i>V</i>	<i>RA</i>	<i>SN</i>	<i>TS</i>	<i>FG</i>	<i>TN</i>	<i>GR</i>
2009	22.4	28.3	16.4	130.06	11.8	31	0	9	0	0	0
2010	23.3	29.3	17.1	42.41	10.9	29	0	14	0	0	1
2011	22.2	28.0	16.4	153.94	11.8	22	0	16	0	0	0
2012	22.9	29.0	16.8	39.89	-	31	1	5	0	0	0
2013	22.6	28.7	16.6	62.21	14.7	28	0	10	0	0	0
2014	23.3	29.5	17.3	35.29	14.6	24	0	10	0	0	0
2015	22.5	28.6	16.4	47.49	13.9	31	0	19	0	0	0
2016	23.2	29.3	17.1	17.51	14.2	21	0	12	0	0	0
2017	22.5	28.1	16.5	-	13.5	22	0	10	0	0	0
2018	22.5	28.0	16.6	51.31	14.1	25	1	23	0	0	0
2019	22.8	28.5	16.5	70.60	11.4	26	0	15	0	0	0

T : Température moyenne annuelle ; **TM** : Température maximale moyenne annuelle ; **Tm** : Température minimale moyenne annuelle ; **Pp** : Précipitation totale annuelle de pluie et/ou neige fondue (mm) ; **V** : Vitesse moyenne annuelle du vent (Km/h) ; **RA** : Total jours de pluie durant l'année ; **SN** : Total jours de neige durant l'année ; **TS** : Total jours de tempête durant l'année ; **FG** : Total jours de brouillard durant l'année ; **TN** : Total jours de tornades ou nuages en entonnoir durant l'année ; **GR** : Total jours de grêle durant l'année. Si le tableau affiche des champs sans valeurs avec le symbole (-), cela veut dire que la moyenne n'a pas été effectuée, ce qui est le cas lorsqu'il manque des données pour la calculer. Dans la précipitation totale, une valeur 0 (zéro) peut indiquer que cette mesure n'a pas été réalisée.

III-3 Présentation de matériau d'étudié :

Le matériau utilisé dans ce mémoire provient de la carrière(Marne) d'Oued Nachaou de la couleur jeune située à 20 km au Nord -est de la ville de Ghardaïa, ce gisement se trouve à 100 m de la RN°1, Voir Photo II -1.

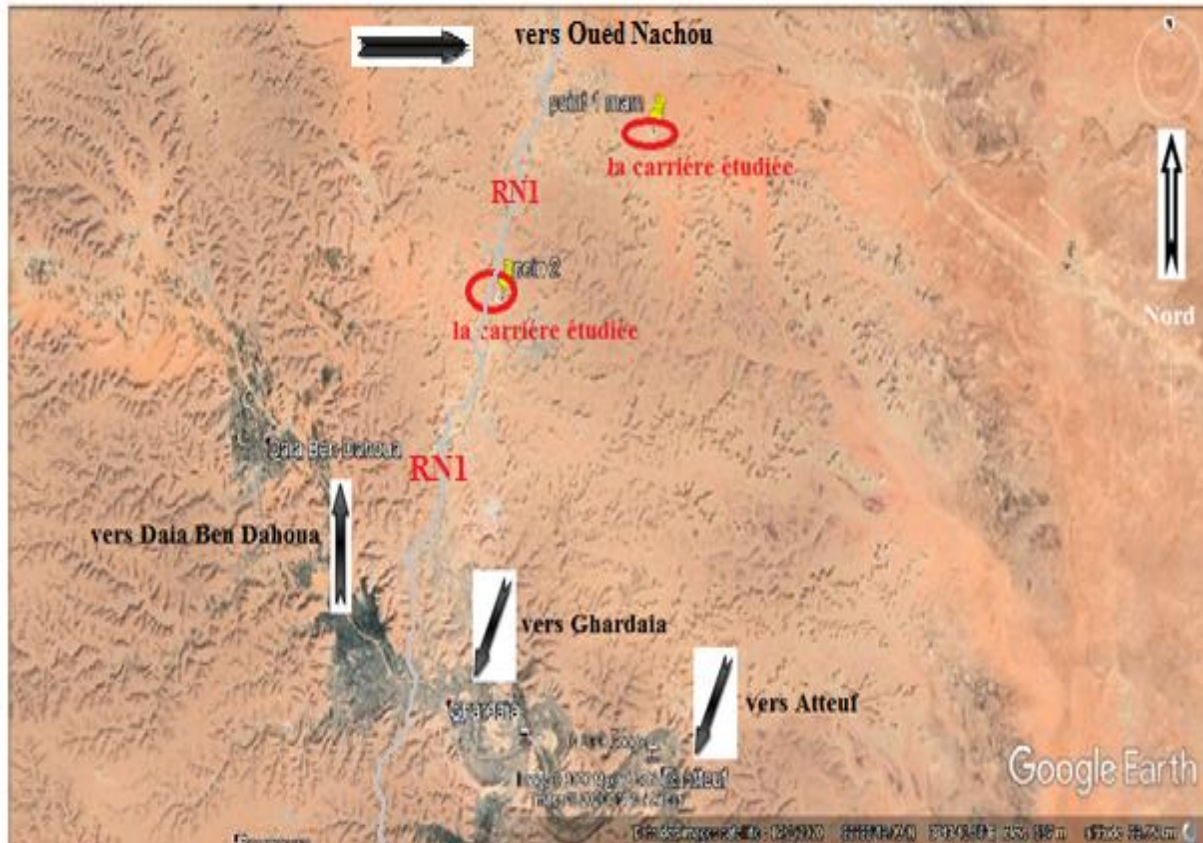


Photo III-1 : Photo Google Earth localisation de la carrière étudiée



Photo III-2 : Photo de la carrière étudiée

III-4 Etude d'identification géotechnique :

Les essais géotechniques réalisés sur notre matériau sont :

- Analyse granulométrique :
 - Par tamisage (voie humide).
 - Par sédimentométrique.
- Essai de pollution des fines argileuse :
 - Limites d'atterberg.
 - Essai Equivalent de sable.
 - Essai au bleu de méthylène.
- Essai de compactage et de portance :
 - Proctor modifié.
 - Essai C.B.R.
- Essai Los Anglos.
- Essai compression simple.
- Essai cisaillement.
- Analyse chimique.

Avant de réaliser chaque essai, nous avons désagrégé le matériau dans le désagrégateur, cela, pour casser les gros grains, puis, le mettre dans l'étuve 24heurs à 50°C ($w = 0$).

III-4-1 Analyse granulométrique :

L'analyse granulométrique a pour but de déterminer les proportions pondérales des grains de différentes tailles dans le sol. Elle s'effectue:




- Par tamisage (tamis à maille carrée) pour les grains de diamètre supérieur à 80 μ m.
- Par sédimentométrique pour les grains de diamètre plus fins inférieurs à 80 μ m.

III-4-1-1 Analyse granulométrique par tamisage :

L'essai de granulométrie par tamisage se fait suivant la norme **NFP 94-056**. Il consiste à déterminer les proportions des éléments de différents diamètres pour un matériau en le criblant sur une série des tamis standard.

Nous avons effectué cette analyse par voie humide. Etant donné la sensibilité de la marne à l'eau, nous avons imbibé notre échantillon pendant 24h avant l'essai. Cette opération permet aux mottes de se désagréger afin d'arriver aux conditions les plus défavorables de friabilité. Le tableau III-2 résume les étapes de cet essai :

Tableau III-2 : les étapes d'essai analyse granulométrique par tamisage.

<p>1. Imbiber l'échantillon dans un récipient, après 24h Eliminer les fines par lavage continu utilisant le tamis 0.08 mm.</p>	
<p>2. Recueillir le refus de tamis 0.08mm, puis les sécher dans une étuve à 50 c°. Tamiser l'échantillon en versant ce dernier au sommet d'une série de tamis et en les agitant à la main.</p>	
<p>3. Peser le refus de chaque tamis dans une balance de portée pesant au g près et compatible avec les masses à peser.</p>	

III-4-1-2 Analyse granulométrique par sédimentométrie :

L'analyse granulométriques des éléments de diamètre plus fins inférieurs à 80 µm est effectuée par sédimentation Selon la norme **NFP 94-057**, qui complète l'analyse granulométrique par tamisage ou il n'est pas possible d'utiliser des tamis. Le principe de cet essai est basée sur la loi de stockes qui exprime la vitesse de décantation d'une particule sphérique dans un liquide visqueux en fonction du diamètre de la particule, selon la relation :

$$V = (2gr^2) (D_1 - D_2)/9\mu$$

V : Vitesse de chute (cm sec⁻¹).

g : Accélération due à la gravité (cm sec⁻²).

r : Rayon équivalent de la particule (cm).



D₁ : Densité de la particule (g cm⁻³).


D₂ : Densité du fluide (g cm⁻³).

μ : Viscosité du fluide (Pa. S).

Les étapes de cet essai sont résumées dans le tableau III-3.

Tableau III-3 : les étapes d'essai analyse granulométrique par sédimentométrie

<p>1. Tamiser l'échantillon de sol par lavage (passant au tamis 0.08 mm), et récupérer le tamisât et sécher l'échantillon dans une étuve jusqu' au poids constant et Préparer la prise d'essai de 80 g + 10g de tamisât sec.</p>	
<p>2. Imbiber la prise d'essai dans une éprouvette cylindrique en verre de 2 litre contenant un mélangeur d'eau distillée ou déminéralisée et une solution 5% d'hexamétophosphate de sodium (Na₆(PO₃)₆, 10H₂O) et laisser imbiber pendant au moins 15 heures à température ambiante.</p>	

<p>3. Agiter vigoureusement la suspension au moyen d'un agitateur manuel et retirer l'agitateur manuel et déclencher au même instant le chronomètre (début de l'essai).</p>	
<p>4. Plonger le thermomètre et le densimètre avec précaution dans la suspension immédiatement après le déclenchement du chronomètre et procéder à la prise des lecteurs du densimètre et de la température aux temps suivant (en minutes) : 0.5-1-2-5-10-20-80-240-1440.</p>	

La courbe granulométrique de notre échantillon est présentée dans la figure III-1. Les paramètres les plus significatifs tirés de cette courbe sont résumés dans le tableau III-4.

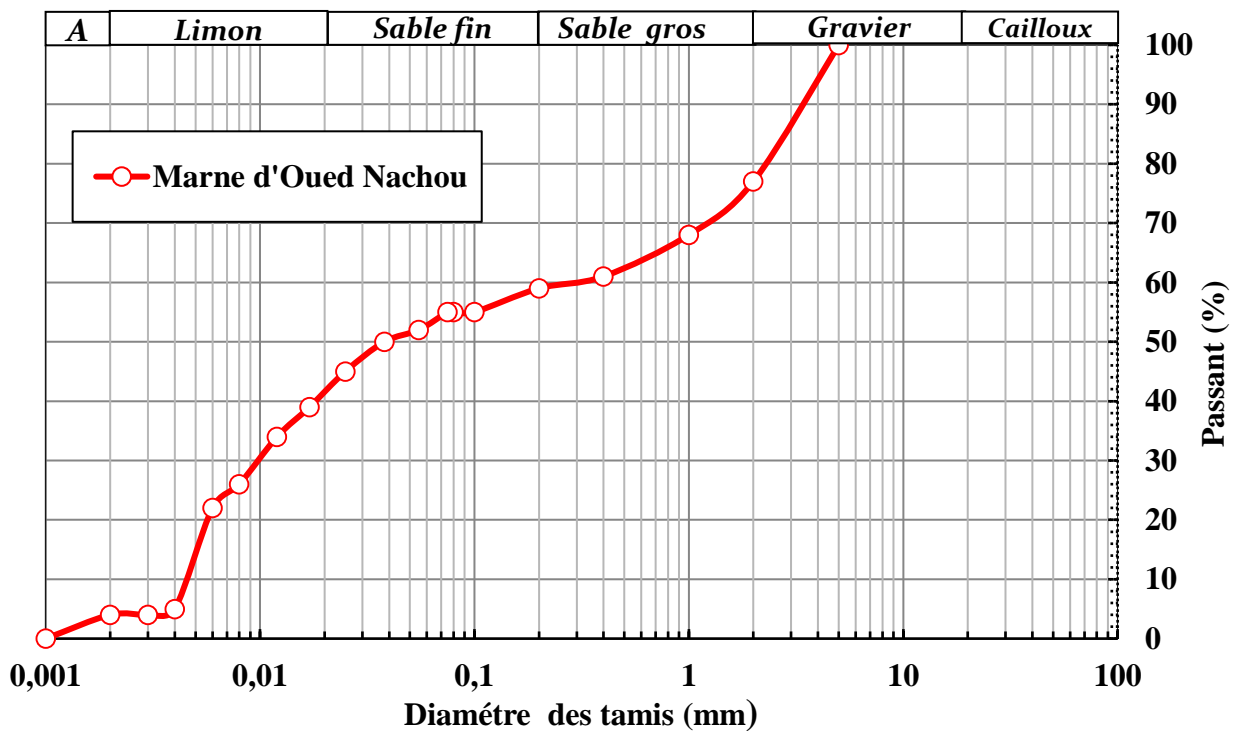


Figure III-1 : courbe analyse granulométrique de la marne d'Oued Nachou

Tableau III-4 : Résultats récapitulatif de l'analyse granulométrique de la marne d'Oued Nachou

	<i>Marne d'Oued Nachou</i>
<i>Argile (%)</i>	04
<i>Limon (%)</i>	38
<i>Sable fin (%)</i>	17
<i>Sable gros (%)</i>	18
<i>Gravier (%)</i>	23
<i>Cailloux (%)</i>	0
<i>% < 80µm</i>	55
<i>D₁₀</i>	0.0046
<i>D₃₀</i>	0.01
<i>D₆₀</i>	0.3
<i>C_u = D₆₀/D₁₀</i>	65.22
<i>C_c = (D₃₀)² / D₁₀D₆₀</i>	0.072

D'après ces résultats, on constate que notre matériau présente une courbe : granulométrique étalée ($C_u > 20$), avec un taux important des fines (éléments inférieurs à 80 µm est de l'ordre de 55 %). Lorsque certaines conditions C_u sont satisfaites, la granulométrie est étalée, c'est-à-dire que le C_c est gradué sans prédominance d'une fraction particulière. Tableau III-5 représente la classes de granulométrie en fonction de la valeur du coefficient d'uniformité, on reconnait cinq classes de granulométrie.

Tableau III-5 : Classes de granulométrie des sols.

<i>Coefficient d'uniformité</i>	<i>Classes de granulométrie</i>
$C_u \leq 2$	Granulométrie très serrée.
$2 < C_u \leq 5$	Granulométrie serrée.
$5 < C_u \leq 20$	Granulométrie semi-étalée.
$20 < C_u \leq 200$	Granulométrie étalée.
$200 < C_u$	Granulométrie très étalée.

III-4-2 Qualité des fines:

Ce sont surtout les fines argileuses qui posent des problèmes aux ingénieurs. Elles peuvent être caractérisées moyennant les essais de laboratoire suivants :

- Les limites d'Atterberg.
- L'équivalent de sable.
- L'essai du bleu de méthylène.

III-4-2-1 Les limites d'Atterberg :

L'essai est réalisé selon la norme **NFP 94-051**, sur la fraction inférieure à 0.4 mm.

- **Les limites d'Atterberg** (limite de liquidité et limite de plasticité) : est la teneur en eau pondérales correspondant à des états particulières d'un sol.
- **Limite de liquidité (w_L)** : est teneur en eau d'un sol remanié au point de transition entre les états liquide et plastique.
- **Limite de plasticité (w_P)** : est teneur en eau d'un sol remanié au point de transition entre les états plastique et solide.
- **Indice de plasticité (IP)** : est la différence entre les limites de liquidité et de plasticité. Cet indice définit l'étendue du domaine plastique ($IP = w_L - w_P$)



Photo III-3 : Les outils des essais des limites d'atterberg

Les étapes de cet essai sont résumées dans les tableaux III-6 et III-7. Les résultats de ces essais sont résumés dans le tableau III-8

Tableau III-6 : les étapes essai limite de liquidité








<p>1. Après imbibition de 800 g de l'échantillon, Tamiser l'échantillon au tamis de 0.40 mm et récupérer le tamisât et sécher le matériau dans une étuve réglée à 50c°.</p>	
<p>2. L'échantillon est mélangé à une quantité d'eau pour obtenue une pâte.</p>	
<p>3. Placer l'échantillon dans la coupelle et tracer un sillon avec l'outil à rainurer. La coupelle fixée à l'appareil est soumise à une série de chocs réguliers jusqu'à ce que les deux lèvres se ferment (le nombre de coups de fermeture doit être compris entre 15 et 35)</p>	
<p>4. Prélever l'aide d'une spatule deux échantillons des levers de la rainure puis le porter à étuve.</p>	

Tableau III-7 : les étapes d'essai Limite de plasticité

<p>1. A partir d'une boulette qu'on roule, sur un marbre, à la main, en forme un rouleau aminci jusqu' à 3 mm de diamètre sur une longueur de 10 à 15 cm.</p>	
<p>2. La limite de plasticité est atteinte lorsque le rouleau soulevé par le milieu de 1 à 2 cm se fissure.</p>	
<p>3. Prélever les échantillons qu'on pèse puis on les porte dans l'étuve et après Peser l'échantillon après séchage.</p>	

<i>Matériaux</i>	w_L (%)	w_P (%)	I_P (%)
------------------	-----------	-----------	-----------

<i>Marne d'Oued Nachou</i>	44.22	23.46	20.76
----------------------------	-------	-------	-------

Tableau III-8 : Valeur de limites d'Atterberg de la marne d'Oued Nachou

Le résultat de cet essai ceci peut donner une indication intéressante sur la nature argileuse de ces fines. Selon l'abaque de Casagrande (figure III-2), la marne se classe comme : **Moyennement Argileux plastiques**.

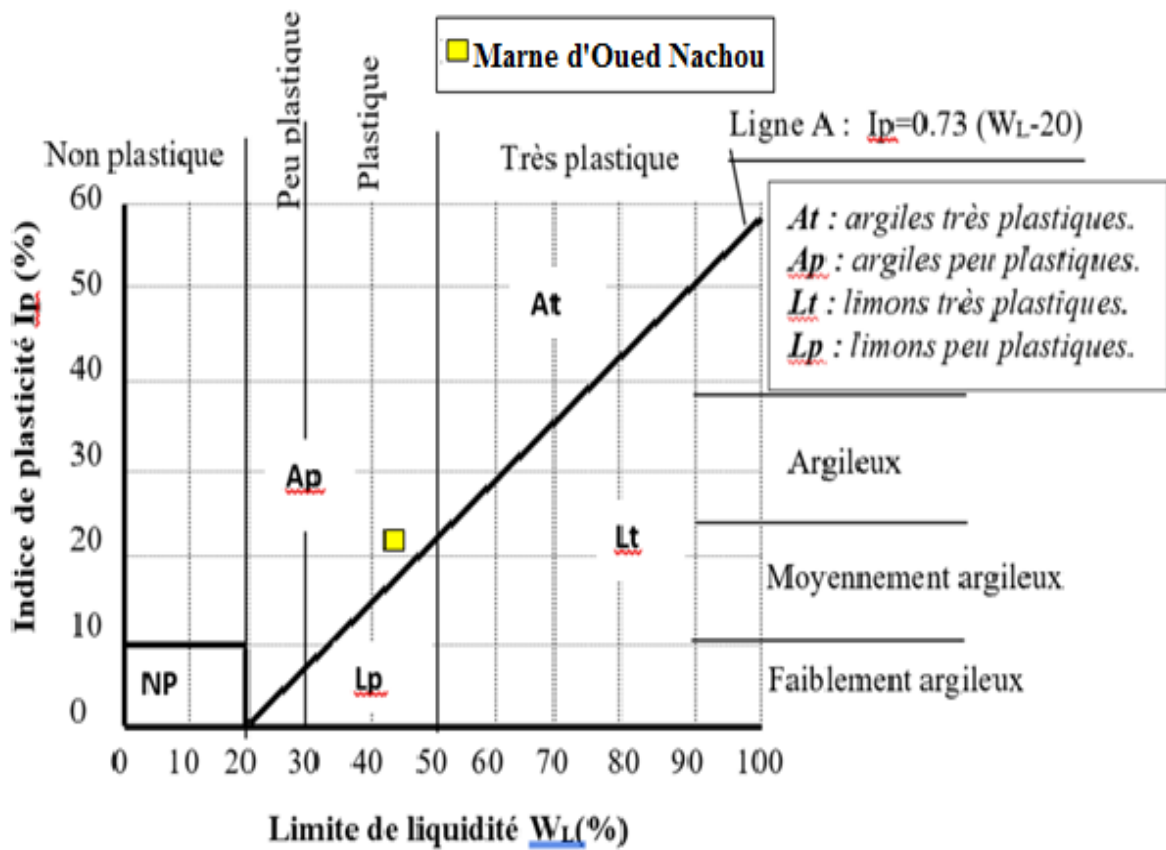


Figure III-2 : Abaque de Casagrande.

II-4-2-2 Essai d'équivalent de sable :

L'essai est réalisé selon la norme **NFP 18-598**. Il est effectué sur 120g de sol, son domaine d'application s'étend aux sols faiblement plastiques pour lesquels l'indice de plasticité est trop faible pour être significatif ($IP < 7$).

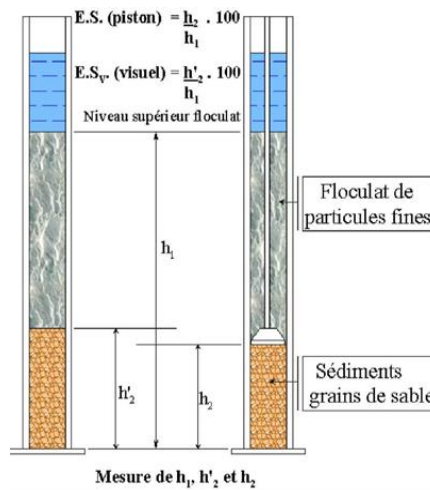


Figure III-3 : Principe de l'essai équivalent de sable.

Le tableau III-9 résume les étapes de cet essai.

Le tableau III-10 donne la valeur de ES pour nos échantillons.

Tableau III- 9 : Les étapes d'essai équivalent de sable

<p>1. Amorcer le siphon puis siphonner la solution lavant dans l'éprouvette cylindrique jusqu'à la hauteur du trait de repère inférieur, c'est à dire $h = 10$ cm. mesure de l'échantillon (environ 120g) de sol, verser ce quantité dans l'éprouvette et laisser au reposé 10mn.</p>	
<p>2. Les 10 mn passées reposée, on ferme l'éprouvette à l'aide du bouchon à liège on met cette dernière sur la machine d'agitation pour le faire subir 90 cycles en 30 secondes.</p>	
<p>3. Laver bien la marne en effectuant des montées et des descentes. Dès que le niveau du liquide atteint le trait de repère supérieur ($h=40$cm), on ressort lentement le tube sans arrêt de l'écoulement.</p>	
<p>4. Au bout de 20 minutes, mesurer à l'aide de la règle graduée le niveau en haut de la suspension hauteur H1. Puis procéder à la mesure de la hauteur du niveau H2.</p>	

Tableau III-10 : Valeurs de ES de la marne d'Oued Nachou

<i>Matériaux</i>	<i>ES (%)</i>
<i>Marne d'Oued Nachou</i>	10.27

Ce résultat coïncide bien avec les résultats des limites d'Atterberg et l'analyse granulométrique. Cette valeur montre bien la pollution argileuse de notre échantillon. Ce sont peut-être les fines calcaires qui ont causé la faiblesse de la valeur de ES. Donc il faut compléter cette analyse par l'essai au bleu de méthylène pour étudier la qualité des fines.

II-4-2-3 Essai au bleu de méthylène :

L'essai est fait selon la norme **NFP 94-068**. Le principe de cet essai consiste à contrôler l'absorption du bleu de méthylène injecté dans un bain aqueux contenant les fines de la prise d'essai, en observant une goutte de suspension déposée sur une feuille de papier filtre.

La tache formée se compose d'un dépôt central du matériau, coloré d'un bleu soutenu, entouré d'une zone humide incolore. La saturation des fines en bleu de méthylène se traduit par la formation d'une auréole bleu clair persistante autour de dépôt central. On appelle valeur de bleu de méthylène V_B , la quantité exprimée en gramme de bleu de méthylène absorbée par 60 g de fines.

$$V_B = \frac{\text{Quantité du bleu absorbé(cm}^2\text{)}}{\text{Poids sec de la prise}}$$

Connaissant la valeur du bleu déterminée sur l'une des fractions les plus fines 0/d, on peut calculer celle de la fraction globale 0/D à partir de la courbe granulométrique du sol.

$$V_B = V_B (0/d) \times \frac{Cd}{100}$$

Les étapes de cet essai sont résumées dans le tableau II-11.

Le tableau III-12 donne la valeur de V_B pour nos échantillons.

Tableau III- 11: Les étapes d'essai au bleu de méthylène




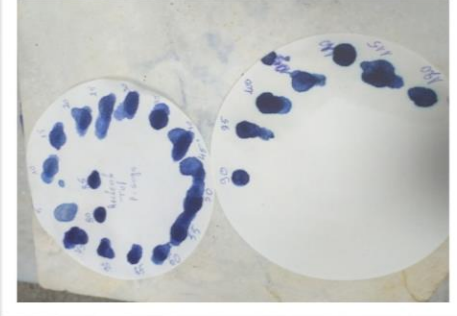
<p>1. Prélever une masse de 60 gr.</p>	
<p>2. Verser un échantillon de sol sec dans le Bécher et ajouter avec de l'eau distillée jusqu'au trait de jauge. Agiter sans arrêt le mélange à l'aide de l'agitateur à ailettes. Enfin Ajouter 5 cm³ de bleu de méthylène dans le Bécher.</p>	
<p>3. Prélever une goutte de mélange et la placer sur papier filtre. Si la tache est entourée d'une auréole humide incolore, le test est négatif. Dans ce cas, on ajoute du bleu de méthylène par prises de 5cm³ jusqu'à ce que le teste soit positif.</p>	
<p>4. Si la tache centrale est entourée d'une auréole bleu turquoise, le test est positif. Dans ce cas l'essai est terminé, les particules argileuses sont alors saturées en Bleu de Méthylène.</p>	

Tableau III-12 : Valeurs des coefficients VB de la marne d'Oued Nachou

<i>Matériaux</i>	<i>Marne d'Oued Nachou</i>
Valeur de VB	1.27

D'après ce résultat, si nous adoptons la classification du tableau III-13, on trouve que notre matériau est : *très pollué*.

Tableau III-13 : Classification des sols selon la valeur de V_B .

<i>Valeur de V_B</i>	
$V_B < 0,2$	<i>Matériau propre</i>
$0,2 < V_B < 0,5$	<i>Matériau légèrement pollué</i>
$0,5 < V_B < 1$	<i>Matériau pollué</i>
$V_B > 1$	<i>Matériau très pollué</i>

III-4-3 Essai de compactage et de portance :

III-4-3-1 Essai Proctor Modifié :

L'essai a été réalisé selon les prescriptions de la norme **NF P 94-093**. Il a pour but de déterminer les conditions optimums de compactage des sols, pour obtenir la meilleure compacité, la meilleure cohésion et la meilleure stabilité avec une énergie d'intensité normalisée. L'essai consiste à compacter un certain nombre d'échantillons à différentes teneurs en eau et à même niveau d'énergie de compactage (2472 kJ/m^3). Cette énergie est appliquée au sol en 5 couches de 25 coups de dames dans le moule Proctor de 2500g. A chaque teneur en eau on utilise un nouvel échantillon de matériau pour déterminer la densité sèche maximale.

Nous avons utilisé la méthode de Proctor modifié dans le moule de Proctor normale au déterminent la norme qui indiqué dans la (figure III-4).

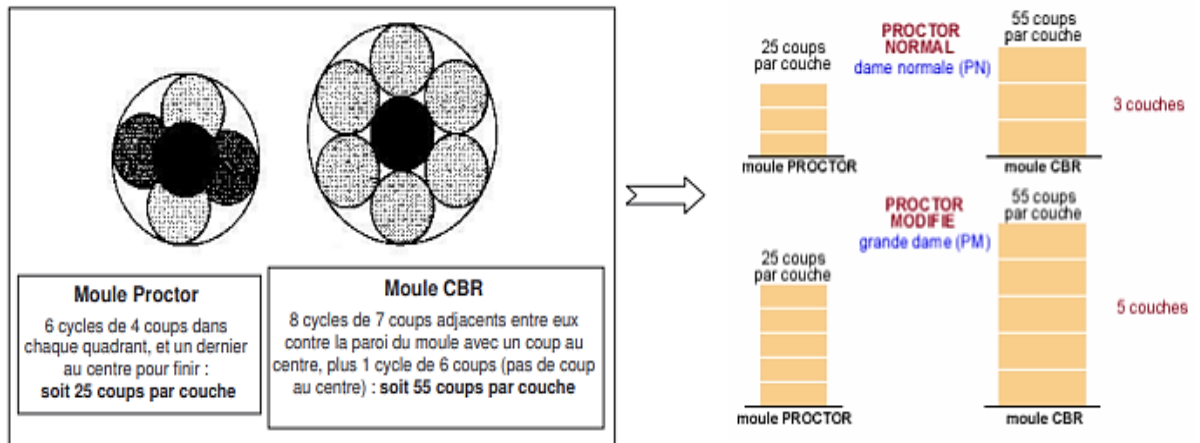




Figure III-4 : Schéma de la méthode utilisée.



Les étapes de cet essai sont résumées dans le tableau III-14.

La figure III-5 présente les résultats de cet essai.

Les caractéristiques optimales déduites de cette courbe sont résumées dans le tableau III-15.

Tableau III-14 : les étapes essai Proctor modifié

<p>1. Malaxer bien le mélange de 2.5g de notre et matériau et une quantité d'eau pour avoir la teneur en eau souhaitée à la main pour insérer les grains d'eau avec la marne.</p>	
<p>2. Compacter le matériau en 05 couches avec 25 coups pour chaque couche de manière à avoir la dernière débordant légèrement le haut de moule.</p>	

<p>3. Enlever la hausse et araser soigneusement le haut du moule. et Peser le moule avec le sol.</p>	
<p>4. On prend de chaque cotés (au-dessus et au-dessous) de ce moule une quantité pour la détermination de la teneur en eau. et Mettre les tares dans l'étuve de 50°C pendant 48heures.</p>	

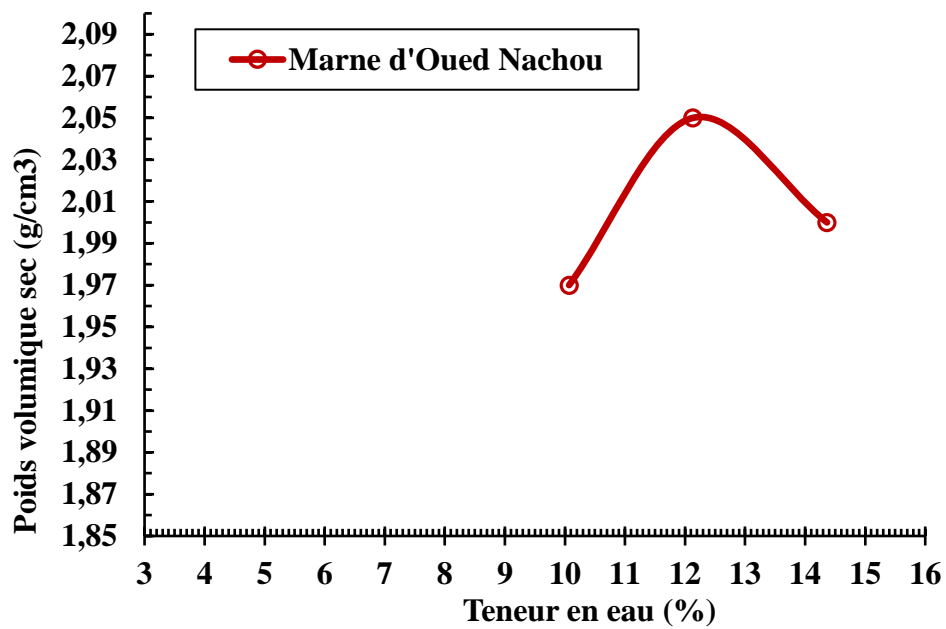


Figure III-5 : Courbe Proctor modifié de la marne d'Oued Nachou

Tableau III-15 : Résultats récapitulatifs de l'essai de compactage.

<i>Matériau</i>	γ_{dmax} (t/m ³)	ω_{opm} (%)
<i>Marne d'Oued Nachou</i>	2.05	12.5

D'après ces résultats on constate que la courbe de l'échantillon représente à une grande pente, ceci explique la sensibilité de la densité sèche de notre échantillon à la teneur en eau lorsque celle-ci varie jusqu'à l'optimum de Proctor. Ce qui veut dire que les fines existantes est sensible à l'eau.

L'effondrement de la courbe s'explique par la présence des fines argileuses qui rendent le matériau imperméable à forte teneur en eau, il s'agit d'un matériau sensible à l'eau.

La teneur en eau optimale ($w_{opm} = 12.5\%$) est assez élevée par rapport à celle des matériaux routiers habituels cités dans le tableau III-16

Tableau III-16:Caractéristiques de compactage pour quelques matériaux routiers(GandilP.1988)

<i>Nature de matériaux</i>	γ_{dmax} (t/m ³)	ω_{opm} (%)
Grave non traité	2,2	6
Grave ciment	2,25	6
Grave laitier	2,15	5
Sable ciment	1,9	6
Sable laitier	1,9	6

III-4-3-2 Essai CBR :

L'essai est réalisé selon la norme **NFP 94-078** soit :

- Immédiatement après le compactage.
- Après quatre heures d'immersion.

L'essai consiste à poinçonner dans le moule CBR, des éprouvettes réalisées à des teneurs en eau égale à l'optimum de l'essai Proctor modifié.

D'abord on trace les courbes qui représentent la pression du piston en fonction de son enfoncement, puis on détermine l'indice CBR ($CBR = \text{Sup} \{P(2,5) / 0,68 ; P(5) / 1,02\}$).

Les étapes des essais CBR immédiat et imbibé sont résumés dans les tableaux III-17 et III-18 respectivement.

La variation de la pression du piston en fonction de son enfoncement, pour les deux essais CBR immédiat et imbibé est représenté sur la figure III-6a et III-6b respectivement.

Tableau III-17 : les étapes d'essai CBR immédiate

<p>1. Mélanger 5,5 Kg de matériau (passant de 20 mm) avec l'eau de tel sort que $w = w_{opm}$. Compacter le matériau dans le moule CBR en 5 couches avec 55 coups pour chacune.</p>	
<p>2. Placer immédiatement après compactage l'ensemble (plaque de base, moule, éprouvette, les surcharges) sur la presse en position centrée par rapport au piston de poinçonnement.</p>	
<p>3. Approcher, la surface supérieure de l'éprouvette vers le piston, jusqu'à ce que le piston vienne affleurer le matériau et régler la mise à zéro du dispositif dynamométrique mesurent l'enfoncement du poinçon. Exécuter le poinçonnement en maintenant la vitesse à 1.27mm/min. Enregistrer les lecteurs obtenus du poinçonnement.</p>	

Tableau III-18 : les étapes d'essai CBR imbibé

<p>1. Après le compactage de matériau comme l'essai CBR immédiat, placer un papier -filtre à la surface puis disposer au- dessus le disque de gonflement et les surcharges. Fixer le trépied support de comparateur sur le bord supérieur du moule et positionner le comparateur au centre du trépied a la mis a zéro.</p>	
<p>2. Placer ensemble dans le bac d'immersion de telle sorte que l'eau recouvre de 1à 2 cm l'éprouvette.</p>	
<p>3. Après 4 heures d'immersion, mesurer la hauteur de gonflement H indiquée par le comparateur. Laisser égoutter quelques minutes et déposer le trépied, le comparateur, les surcharges et le disque de gonflement mesurent l'enfoncement du poinçon même méthode avec CBR immédiate si dessus.</p>	

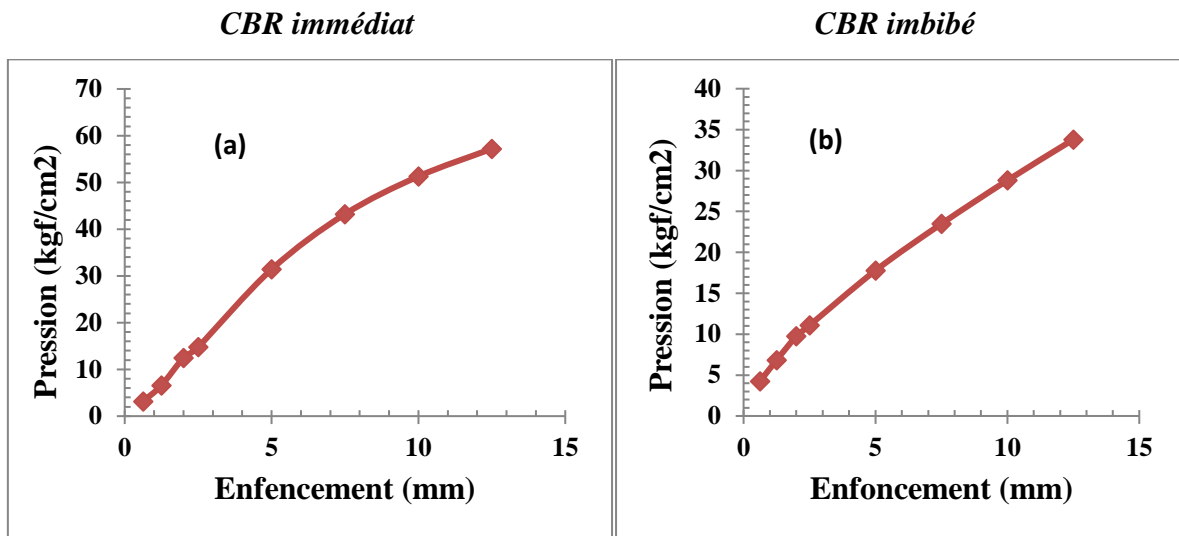


Figure III-6 : variation de la pression en fonction de son enfoncement de la marne d'Oued Nachou

Le tableau III-19 représente les différentes caractéristiques de compactage et de portance de notre échantillon.

Tableau III-19 : Résultats récapitulatifs de compactage et de portance.

<i>Essais</i>	<i>Proctor Modifie</i>		<i>Portance</i>		
	w_{opt} (%)	γ_{dmax} (t/m ³)	<i>I CBR</i> <i>Immédiat</i>	<i>4heures d'immersion</i>	
<i>Matériaux</i>				γ_d (t/m ³)	<i>I CBR</i>
<i>Marned'Oued Nachou</i>	12.5	2.05	29.91	2.05	16.23

D'après ces résultats on constate que, l'indice CBR immédiat est plus grand que l'indice CBR après 4 heures d'immersion. En effet, On constate, une diminution de 45 %. Ce fort pourcentage veut dire que notre échantillon est sensible à l'eau.

III-4-4 Essai Los Angeles :

L'essai est fait selon la norme **NFP 18-573**. Il consiste à mesurer la masse m d'éléments inférieurs à 1,6 mm, produits par la fragmentation du matériau testé. Pour rappel, le matériau est soumis aux chocs de boulets normalisés, dans le cylindre de la machine Los Angeles en 500 rotations. Le coefficient LA_i est exprimé selon la formule:

$$LA = \frac{m}{M} \times 100$$

M : La masse du matériau soumis à l'essai.

m : La masse des éléments inférieurs à 1,6 mm.

La fraction granulométrique choisie dans notre cas est 16-31.5 mm échantillon

Les étapes de cet essai sont résumées dans le tableau III-20.

Les résultats de cet essai sont représentés dans le tableau III-21.

Tableau III-20 : les étapes d'essai los Anglos




<p>1. Un échantillon de fraction 31.5-16 mm et de masse sèche à 5000 g est placé dans un tambour contenant 11 boulets d'acier normalisés. Au cours de l'essai, le tambour effectue 500 tours à une vitesse de rotation comprise entre 31 et 33 tours/min.</p>	
<p>2. La friction des granulats entre eux et des granulats contre les boulets et les parois du tambour provoque leur dégradation plus ou moins accrue. Ensuite, l'échantillon est prélevé.</p>	
<p>3. Après avoir l'échantillon retiré est lavé au-dessus d'un tamis 1.6 mm. On pèse le refus après séchage (M1).</p>	

Tableau III-21 : Valeurs des coefficients de Los Angeles de la marne d'Oued Nachou.

<i>Classe granulaire (mm)</i>	<i>Nombre de boulettes</i>	<i>Masse total de la charge (g)</i>	<i>L_A (%)</i>
16-31.5	12	5280	57.58

D'après ce résultat on constate que le coefficient LA dépasse les 40 % fixés par les spécifications pour couches d'assises de chaussées (voir le tableau III-22).

Tableau III-22: Spécification du coefficient LA pour couches d'assises de chaussées

<i>Valeurs de LA pour couches d'assises de chaussées</i>		
<i>Trafic PL (13 t/j)</i>	<i>Fondation</i>	<i>Base</i>
< 25	≤ 40	≤ 40
25 à 150	≤ 40	≤ 30
150 à 300	≤ 40	≤ 30
> 300	≤ 40	≤ 30

III-4-5 Essai de compression simple :

Cet essai est empirique, introduit pour les matériaux locaux pour la première fois par FENZY (1957), il est réalisé sur tous les matériaux sahariens sur la fraction < 5mm. Cet essai sert à évaluer la cohésion du matériau.

Dans notre cas, nous avons effectué cet essai sur une série d'éprouvettes cylindriques de dimensions ($\varnothing = 5\text{cm}, H = 10\text{cm}$), confectionnées à la teneur en eau optimale du Proctor modifié et à différentes compacités théoriques.

Le compactage est réalisé selon la norme **NFP 98- 230-2**, sur la fraction 0/5, à l'aide d'une presse hydraulique et des moules à double piston (Photo III-3). Le matériau est compacté en une seule fois dans le moule. Le séchage des éprouvettes démoulées se fait à l'étuve à 55°C pendant 48h.

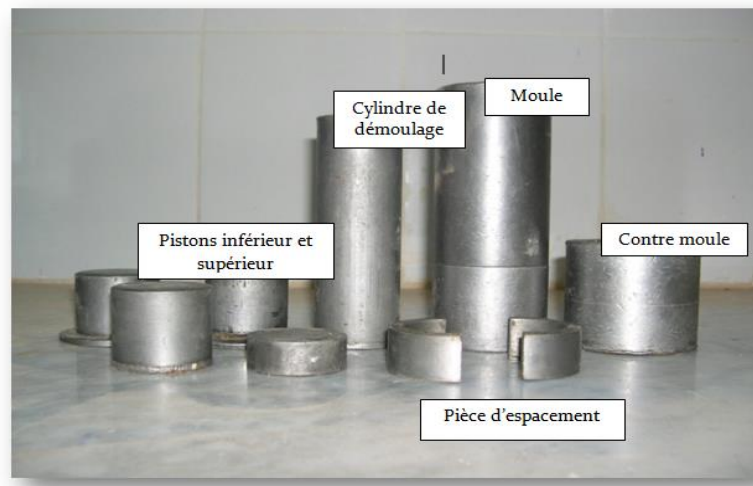




Photo III-3 : Moules de confection.

Une fois le temps de conservation est atteint, les éprouvettes sont soumises à un effort de compression appliqué parallèlement à l'axe du cylindre à l'aide d'une presse CBR à une vitesse constante de 1,27 mm/mn jusqu'à la rupture, et on prend les lectures.

Le tableau III-23 résume les étapes de cet essai. La figure III-7 présente la variation de la résistance à la compression en fonction de la compacité

Tableau III-23 : les étapes d'essai de compression simple

<p>1. Malaxage d'échantillon confectionné à la teneur en eau optimale du Proctor modifié.</p>	
<p>2. Pesé deux échantillons pour chaque compacité théorique (100% ,98%, 95%).</p>	

<p>3. Confection et démoulages des éprouvettes dans un moule cylindrique à double piston et de dimensions normalisées.</p>	
<p>4. Conservation des éprouvettes dans l'étuve à 50°C pendant 72 heures.</p>	
<p>5. Ecrasement des éprouvettes dans la presse CBR.</p>	

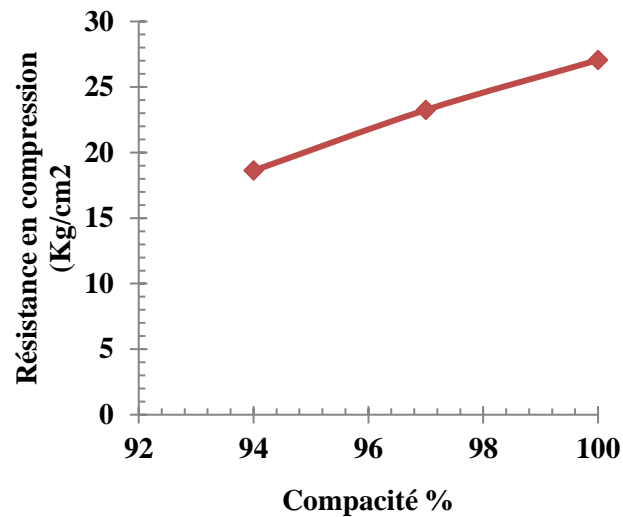


Figure III-7 : Variation de la résistance à la compression de la marne d'Oued Nachou en fonction de la compacité

La figure III-7 montre que la résistance augmente d'une manière plus au moins linéaire avec l'augmentation de la compacité.

La résistance à la compression correspondante à 97% de compacité, est de l'ordre de 23.25 kg/cm². Tandis que la résistance à la compression correspondante à 94% de compacité, est de l'ordre de 18.62 bars. Donc, la chute est de 25%, lorsque la compacité passe de 97% à 94%.

III-4-6 Essai cisaillement direct (UU) :

L'essai est réalisé selon la norme **NF P94-071-1** sur des échantillons confectionnés à la teneur en eau optimale de Proctor modifié.

Lorsqu'un système de forces est appliqué à un volume déterminé d'un sol, il se développe en général des contraintes de cisaillement. Ces contraintes de cisaillement entraînent des déformations du sol. Ces déformations peuvent être importantes le long de certaines surfaces que l'on appelle « surfaces de glissement » ou « surfaces de la rupture ». La résistance au cisaillement d'un sol est définie comme étant la contrainte de cisaillement dans le plan de la rupture, au moment de la rupture. Cependant, cette notion de résistance au cisaillement n'est pas toujours facile à définir, que ce soit dans un essai de laboratoire, ou dans le sol sur lequel est construit l'ouvrage. Les valeurs de la résistance au cisaillement qui s'appliquent sur le plan de rupture, ainsi définies sont portées sur un graphe en fonction de la contrainte normale σ .

- Le maximum de la contrainte de cisaillement τ_{\max} .
- La contrainte de cisaillement correspondante à une déformation très grande.
- La contrainte de cisaillement correspondante à une déformation plus ou moins arbitraire ϵ_1 .

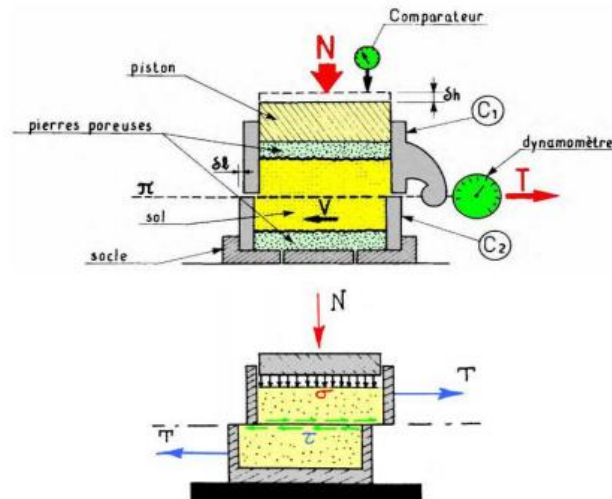


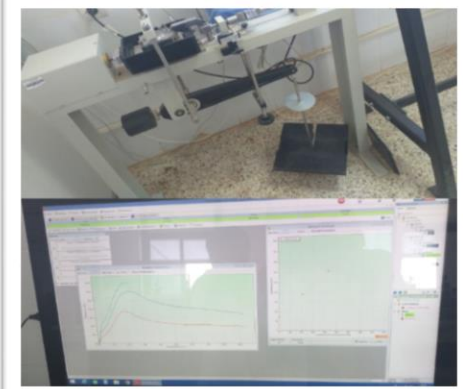



Figure III-8: Principe de l'essai de cisaillement direct à la boîte.

Le tableau III-24 résume les étapes de cet essai.

Tableau III-24 : Les étapes essai cisaillement direct (uu)

<p>1. Préparer les éprouvettes à partir de w_{opm} et γ_{dmax}.</p>	
<p>2. Placée les trois échantillons à chaque fois dans la boîte de cisaillement (deux demi-boîtes, un blocage des deux demi-boîtes, un châssis étanche en tant que support de la demi-boîte inférieure, plaque drainante, piston rigide muni à sa base une plaque drainante).</p>	
<p>3. Appliqué la boîte dans appareil de cisaillement les charges (3kg, 6kg, 12kg) pour chaque fois et commencer le calcul de cohésion.</p>	
<p>4. Les éprouvettes après cisaillement</p>	

Les figures III-9 et III-10 représentent respectivement la courbe contrainte-déformation et la droite intrinsèque de notre échantillon.

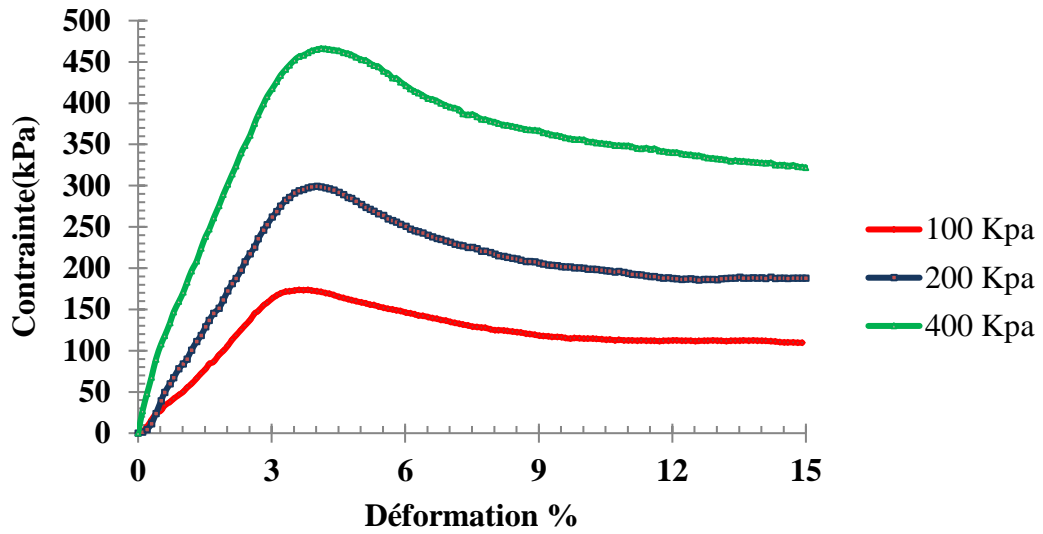


Figure III-9 : courbe de la contrainte de cisaillement en fonction de déformation.

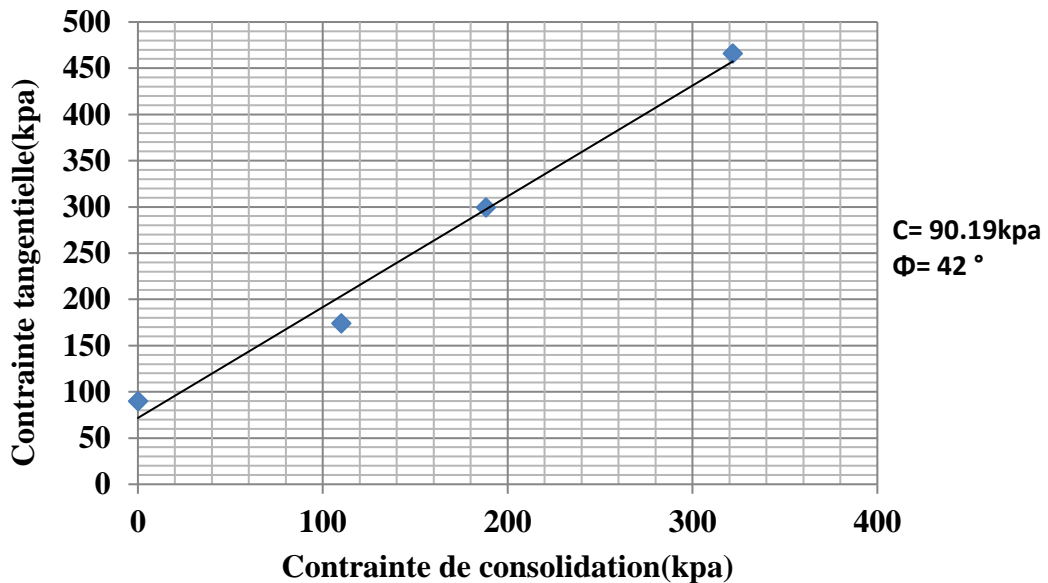


Figure III-10 : Droite intrinsèque de la marne d'Oued Nachou

Les courbes de contraintes- déformation pour le matériau étudié, montrent que la résistance au cisaillement de l'échantillon étudié augmente initialement en fonction des déformations, les courbes atteintes des pics, Au-delà, de cette déformation, les courbes ont tendance de plus en plus à évoluer en paliers, notamment sous les faibles contraintes normales.

D'après la valeur de la cohésion ($C = 90.19$ kpa) (figure III-10), le matériau se classe comme **un sol ferme** (Voir le tableau III-25).

Tableau III-25 : Qualificatif du sol en fonction de la cohésion

<i>Sol</i>	<i>Cohésion (kpa)</i>
Liquide à très mou	< 20
Mou	20 à 40
plastique	40 à 75
Ferme	75 à 150
Très Ferme	150 à 300 Dur
dur	>300

III-4-7 Analyse chimique sommaire:

Les analyses chimiques de notre échantillon ont été réalisées au niveau du service chimie du laboratoire des travaux publics du sud à Ghardaïa.

- **Le résidu insoluble** : il est constitué de silice essentiellement. Il provient de l'attaque par l'acide chlorhydrique (HCl) à 10 % et à chaud.
- **Le carbonate de calcium ($CaCO_3$)** : il est déterminé à partir du volume du CO_2 dégagé par attaque à l'acide chlorhydrique.
- **Les sulfates** : ils s'obtiennent par précipitation du sulfate de baryum ($BaSO_4$) dans le filtrat en provenance d'attaque au HCl à 10% et à chaud.

Les résultats de cet essai sont récapitulés sur le tableau III-26.

D'après les résultats de tableau III-26, on constate que notre matériau est de nature chimique calcaire avec une teneur en $CaCO_3$ de 68%.

Tableau III-27 présente la Classification du sol en fonction de la teneur en carbonate de calcium.

Tableau III-26 : Résultats analyses chimiques.

<i>Caractéristiques</i>	<i>formule</i>	<i>Marne d'Oued Nachou</i>
<i>insolubles</i>	/	24.3
<i>Carbonate de calcium</i>	CaCO ₃	68
<i>Sulfates</i>	CaSO ₄ ; 2H ₂ O	1.71

Tableau III-27 : Classification du sol en fonction de la teneur en carbonate de calcium.

<i>Nature du sol</i>	<i>W_{CaCO3} (%)</i>
<i>Argile ou limon</i>	0 – 10
<i>Argile marneuse ou limon marneux</i>	10 – 30
<i>Marne</i>	30 – 70
<i>Calcaire marneux</i>	70 – 90
<i>Calcaire</i>	90 – 100

III-5 Récapitulatif des essais d'identification :

Le tableau III-28 résume les caractéristiques géotechniques et mécaniques de la marne d'Oued Nachou, ainsi les exigences minimales des spécifications pour L'Algérie proposés par ALLOUL (1981) et STRUILLLOU (1984) de l'utilisation des tufs d'encrouement en Zone IV aride (H<100 mm).

Nous remarquons que certaines caractéristiques sont médiocres comme l'indice de plasticité et l'indice CBR après imbibition.

Tableau III-28 : Caractéristiques géotechniques et mécaniques de la marne d'Oued Nachou

	<i>Matériau</i>	<i>Spécifications pour L'Algérie par ALLOUL (1981) et STRUILLOU (1984).</i>						
		<i>La marne d'Oued Nachou</i>	<i>Couche</i>	<i>Poids lourd / jour</i>				
				<i>< 130</i>	<i>130 300</i>	<i>300 600</i>	<i>600 1200</i>	<i>> 1200</i>
Analyse granulométrique								
D_{max} (mm)	5		-	-	-	-	-	
% < 80 μ m	55		-	-	-	-	-	
C_u	66.67		-	-	-	-	-	
C_c	0.74		-	-	-	-	-	
Les limites d'Atterberg								
w_L (%)	44.22		-	-	-	-	-	
w_p (%)	23.46		-	-	-	-	-	
I_P (%)	20.76	<i>Base et fondation</i>	16	16	16	16	16	
Equivalent de sable E_s (%)	10.27		-	-	-	-	-	
Valeur de bleu VB	1.27		-	-	-	-	-	
Compactage								
$(t/m^3)\gamma_{dmax}$	2.05		-	-	-	-	-	
(%) ω_{opm}	12.5		-	-	-	-	-	
Portance								
I CBR Imméd (%)	29.91		-	-	-	-	-	
I CBR Imbibé (4h) (%)	16.93	<i>Base et fondation</i>	30	60	70	80	90	
Essai los Anglos LA%	57.58		-	-	-	-	-	
Essai de compression simple à 95% γ_{dmax} (MPa)	2.67	<i>Base</i>	2.5	3	3.5			
		<i>Fondation</i>	1.5	2	2.5	3	3.5	
Analyse chimique								
<i>Insolubles (%)</i>	24.3		-	-	-	-	-	
$CaCO_3 + CaSO_4$ (%)	70	<i>Base</i>	70	70	70			
		<i>Fondation</i>	60	60	60	60	60	

III-6 Classification de la marne d'Oued Nachou:

III-6-1 Classification USCS :

D'après la classification USCS (*Unified Soil Classification System*) (Tableau III-29), notre matériau est classé comme **GA (GC)** (Grave argileuse).

Tableau III-29: Classification USCS des sols grenus (plus de 50 % d'éléments > 0,08mm)

Définitions			Symbole	Conditions	Appellations
Graves	Plus de 50% des éléments >0,08 mm ont un diamètre > 2mm	moins de 5% d'éléments < 0,08 mm	Gb (GW)	$Cu = D_{60}/D_{10} > 4$ et $1 < Cc = (D_{30})^2/D_{10}D_{60} < 3$	Grave propre bien graduée
		plus de 12% d'éléments < 0.08 mm	Gm (GP)	Une des conditions de Gb n'est pas satisfaite	Grave propre mal graduée
			GL (GM)	Limites d'Atterberg au-dessous de la ligne A	Grave limoneuse
			GA (GC)	Limites d'Atterberg au-dessus de la ligne A	Grave Argileuse
Sable	Plus de 50% des éléments > 0,08 mm ont un diamètre < 2mm	moins de 5% d'éléments < 0,08 mm	Sb (SW)	$Cu = D_{60}/D_{10} > 6$ et $1 < Cc = (D_{30})^2/D_{10}D_{60} < 3$	Sable propre bien gradué
		plus de 12% d'éléments < 0,08 mm	Sm (SP)	Une des conditions de Sb n'est pas satisfaite	Sable propre mal gradué
			SL (SM)	Limites d'Atterberg au-dessous de la ligne A	Sable limoneux
			SA (SC)	Limites d'Atterberg au-dessus de la ligne A	Grave Argileux

III-6-2 Classification GTR (cas des sols fins) :

Selon la Classification **GTR (NF P 11-300)** (cas des sols fins), on peut classer notre matériau suit :

$$D_{\max} < 50\text{mm.}$$

$$\text{Passant à } 80\mu\text{m} = 55\% > 35\%$$

$$12\% < IP = 20.76 < 25\%$$

Donc selon ces valeurs, la classification de notre matériau est **A2** Sachant que la classe A2 est « sables fins argileux, limons, argiles et marnes peu plastiques arènes. »

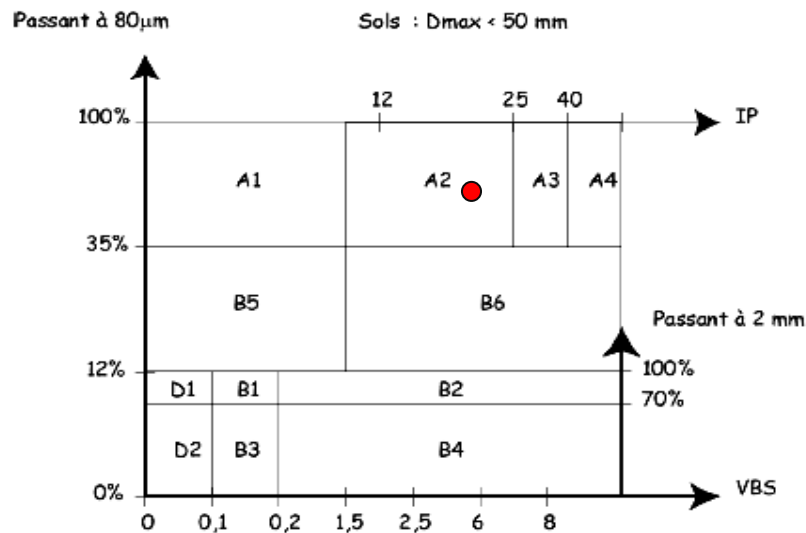


Figure III-11 : Classification des sols fins selon GTR.

III-7 Conclusion :

Ce chapitre représente en détaille les divers essais géotechniques réalisés sur la marne de la région d'Oued Nachou, ainsi on a présenté une description détaillée avec des photos illustratives sur les appareils et les techniques expérimentales utilisés ainsi que le mode opératoire, ce qui peut aider les futurs étudiants qui s'orientent vers ce domaine.

Le travail expérimental qui s'est déroulé au Laboratoire des Travaux Publics du Sud (L.T.P.S) à Ghardaïa. Les essais réalisés nous ont permis de constater que :

- La marne est un matériau qui se compose essentiellement de calcaire ($\text{CaCO}_3 = 68\%$), il a une courbe granulométrique étalée, La fraction $0/80\mu\text{m}$ est de l'ordre de 55%.
- Les essais de qualité des fines montrent que notre matériau est très pollué.
- Dans les essais de compactage et de portance nous avons vu que la marne est un matériau sensible à la teneur en eau.

Nous constatons dans cette partie de notre étude que certaines caractéristiques géotechniques de notre échantillon (granulométrie, qualité des fines, portance imbibé, résistance mécanique) sont médiocres par rapport aux matériaux routiers habituels.

Dans ce qui suit on va essayer de faire la correction de ces caractéristiques par le traitement de notre matériau à la chaux.

CHAPITRE IV :

ETUDE TRAITEMENT DE LA MARNE

Dans ce chapitre, nous allons étudier l'influence de la chaux sur les caractéristiques de la marne étudiée. Afin de mieux améliorer leurs caractéristiques physico-chimiques et mécaniques.

IV-1 Introduction :

Dans le présent chapitre, les effets du traitement sur les différents paramètres de comportement de la marne sont présentés et discutés. Nous avons regroupé ces effets dans quatre aspects:

- Effet du traitement sur la modification des paramètres de plasticité, ce qui permet de comprendre le comportement à l'ouvrabilité de la marne traitée (limites d'Atterberg).
- Effet du traitement sur les caractéristiques de la courbe Proctor modifiée, ce qui permet de comprendre le comportement au compactage de la marne traitée.
- Effet du traitement sur les indices CBR immédiat et imbibé qui définissent la portance du sol c'est-à-dire sa capacité à supporter les charges qui lui sont appliquées.
- Effet du traitement sur les performances mécaniques qui se traduit par l'essai de cisaillement direct.

La conduite de l'étude de formulation est faite selon l'organigramme suivant :

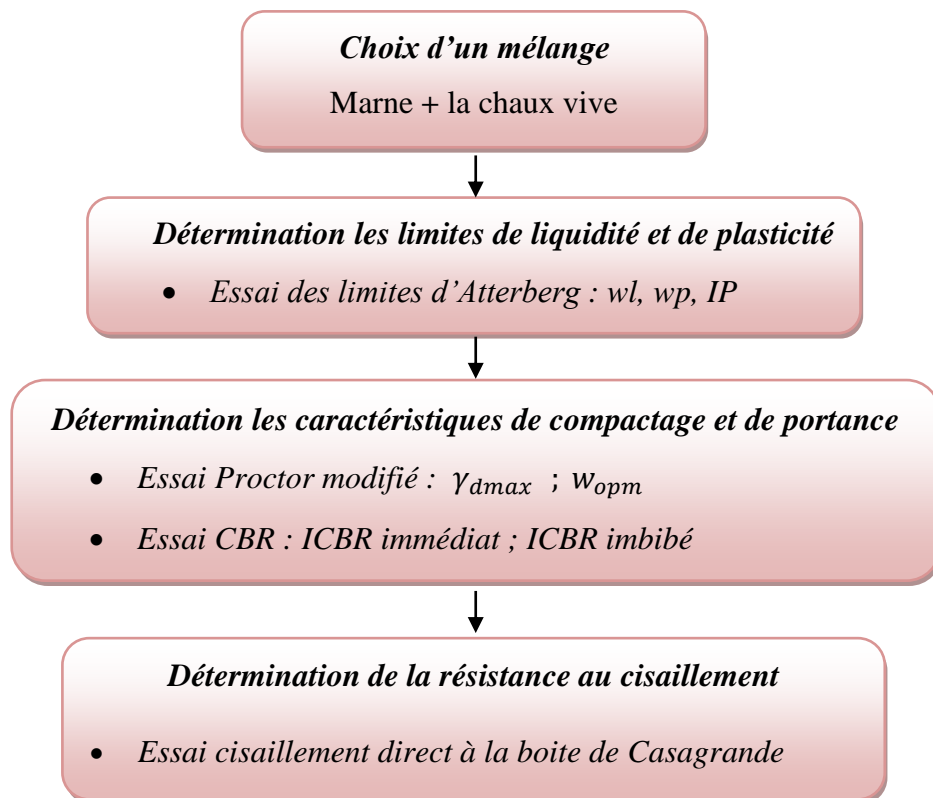


Figure IV-1 : Organigramme de conduite d'une étude de formulation.

IV-2 Présentation du liant hydraulique utilisé :

Dans cette étude, nous avons utilisé la chaux vive, elle est principalement constituée d'oxyde de calcium CaO (en général à plus de 90 %) ramenée de l'usine de GHARDAIA. La chaux est obtenue par calcination de pierres calcaires très pures à haute température ($\pm 950^{\circ}\text{C}$) selon la réaction suivante :

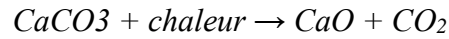


Photo IV-1: la chaux vive de Ghardaïa

Tableau IV-1 : Le cycle de la chaux

	<i>Langage commun</i>	<i>Langage technique</i>	<i>Formules chimiques</i>	<i>Poids en g</i>
<i>ETAT1</i>	Pierre calcaire	Carbonate de chaux	CaCO_3	100g
	+feu	Cuisson	- CO_2	-44g
<i>ETAT2</i>	=chaux vive	Oxyde de calcium	= CaO	=56g
	+eau	Extinction	+ H_2O	+18g
<i>ETAT3</i>	=chaux éteinte	Hydroxyde de calcium	= Ca(OH)_2	=74g
	+eau du mortier	Prise hydraulique et prise aérienne	+ CO_2	+44g
	+air (-eau évaporée)			-18g
<i>ETAT4</i>	Chaux carbonatée	Carbonate de chaux	= CaCO_3	100g

IV-2-1 Les caractéristique physique de la chaux :

IV -2-1-1 La résistance :

Les chaux hydrauliques appartiennent à l'une des trois classes : 30, 60 et 100.

Tableau IV-2 : classes de résistance de chaux hydraulique

<i>Classe</i>	<i>Résistance à la compression en MPA</i>	
	7jours	28jours
30	1	3
60	3	6
100	5	10

IV -2-1-2 La masse volumique apparente :

*650 et 900 Kg/m³ pour les XHN 60 et XHN 100

*600 et 750 Kg/m³ pour les XHN 30

***le début de prise** : ne peut pas avoir lieu avant 150 minutes.

IV -2-1-3 La masse volumique absolue :

Varie entre 2600 - 2900 (kg/m³)

IV -2-1-4 la couleur :

La chaux hydraulique en poudre est jaune claire avec nuances grisâtres, elle est plus claire que le ciment et contient au moins 10% de chaux libre.

IV -2-1-5 La granulométrie :

Sa granulométrie doit être telle que refus au tamis d'ouverture de maille 200µm < 10%.

IV -2-1-6 La surface spécifique Blaine :

Varie entre 3000 -8000 (cm²/g).

IV-2-2 Les caractéristiques chimiques de la chaux :

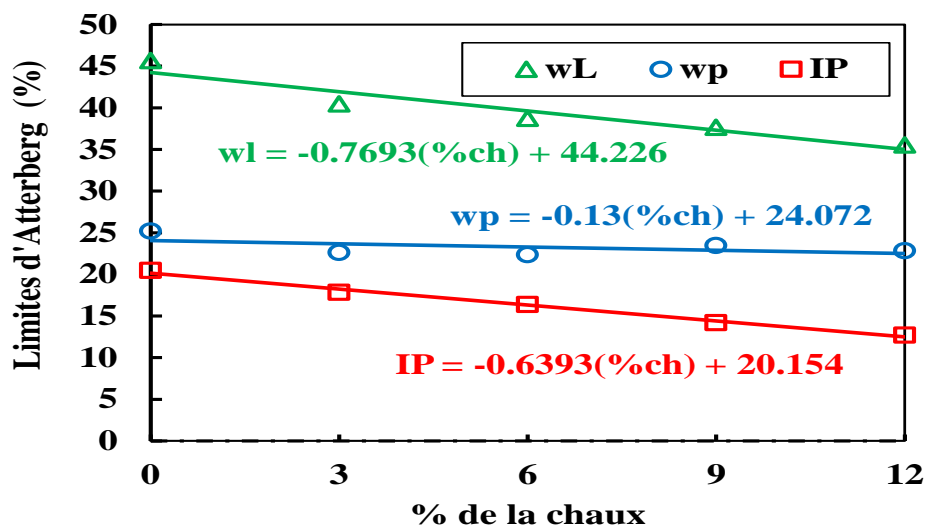
Tableau IV-3 : les caractéristiques chimiques de la chaux vive

<i>Caractéristiques de base</i>	<i>Chaux</i>
CaO	> 73,3
MgO	< 0,5
Fe ₂ O ₃	< 2
Al ₂ O ₃	< 1,5
SiO ₂	< 2,5
SO ₃	< 0,5
Na ₂ O	0,4 – 0,5
CO ₂	< 5
CaCO ₃	< 10

IV-3 Essai de consistance :

IV-3-1 L'influence du traitement sur les caractéristiques des limites d'atterberg :

L'influence de l'ajout de la chaux sur la limite de liquidité et la limite de plasticité et par conséquent sur l'indice de plasticité a fait l'objet d'une étude expérimentale. La figure IV-2 présente la variation de la limite de liquide, la limite de plasticité et l'indice de plasticité en fonction de pourcentage de la chaux ajoutée.



Avec: %ch : le pourcentage de la chaux

Figure IV-2 : Variation des limites d'Atterberg en fonction de la teneur en chaux

Nous remarquons que les limites d'Atterberg décroissent d'une manière linéaire avec l'augmentation de pourcentage de la chaux, avec les relations écrites dans la figure IV-2. La limite de plasticité variant dans des proportions nettement moins importantes par rapport à la limite de liquidité et l'indice de plasticité.

IV-4 Stabilité immédiat :

La stabilité immédiate caractérise l'aptitude du matériau :

- A supporter les opérations de mise en œuvre et à permettre le passage des engins de compactage, c'est la compactibilité.
- A ne pas se déformer au jeune âge sous le trafic du chantier ou sous la circulation, c'est la traficabilité. La stabilité immédiate peut être caractérisée par l'indice de portance immédiat. Les aptitudes au compactage des mélanges (marne + chaux) ont été déterminées lors des essais Proctor modifié et de la portance immédiate.

Les étapes des essais de compactage et de portance sont faites de la même manière que dans le chapitre III.

IV-4-1 Influence du traitement sur les caractéristiques de compactage (Proctor Modifié) :

L'essai Proctor modifier a été effectué sur la marne traitée à différents dosages de la chaux (3%, 6%, 9% et 12%). Ce type d'essai est considéré comme la référence de compactage des matériaux utilisés dans les terrassements routiers (sol support, remblai et couche de forme). Le but de ces essais est de mettre en évidence l'influence de dosage de produit de traitement sur les paramètres de compactage à savoir la teneur en eau optimale (w_{opt}) et la densité sèche maximale ($\gamma_{d_{max}}$).

Les résultats de l'essai Proctor modifié sont représentés dans la figure (IV-3) :

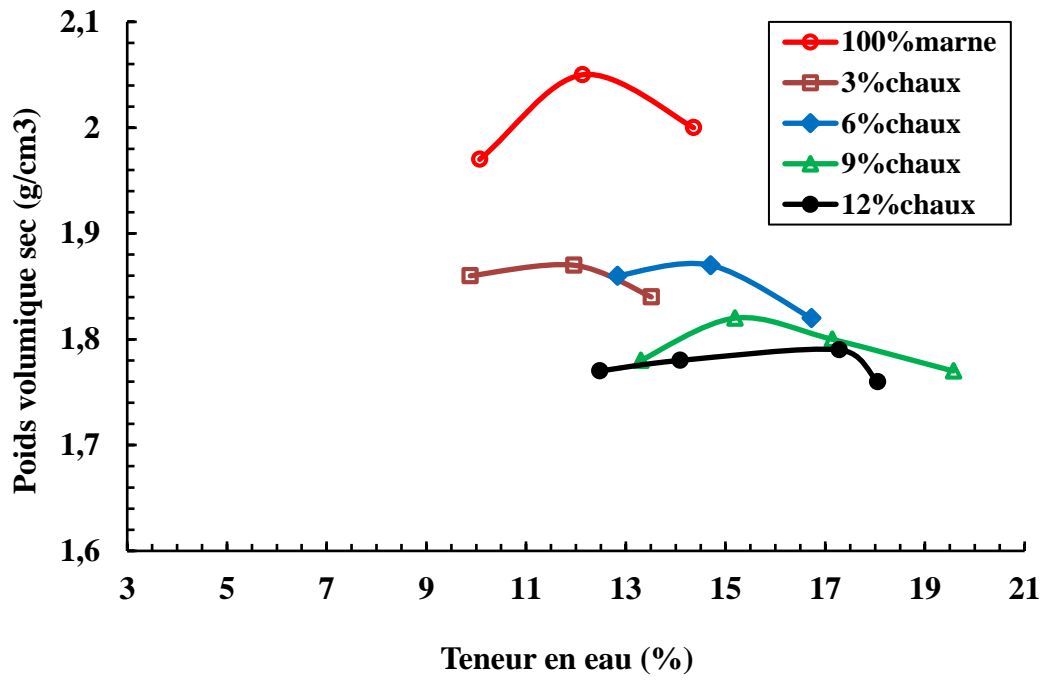


Figure IV-3 : Courbe Proctor modifié de la marne traitée à la chaux.

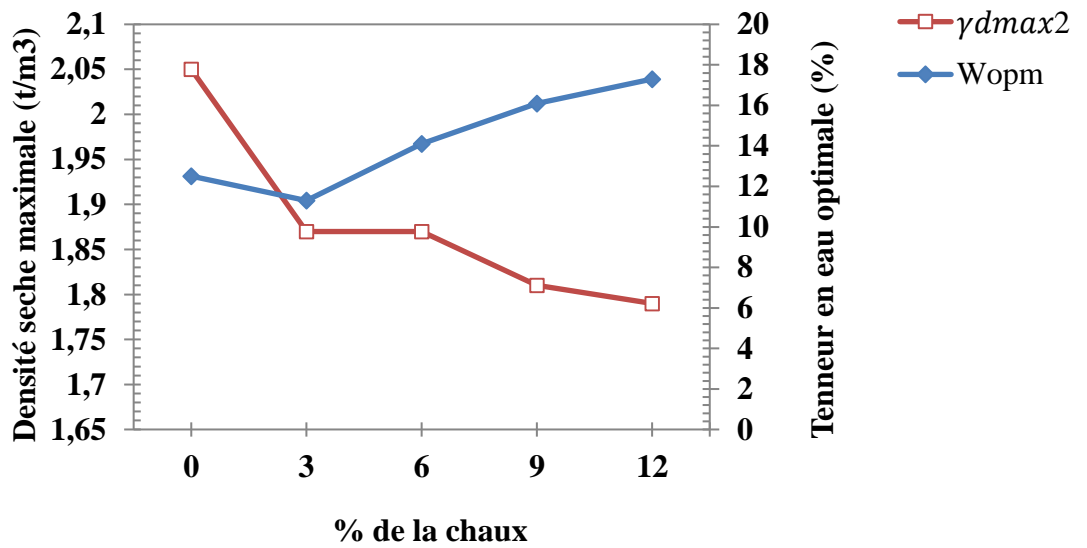


Figure IV-4 : Variation de la teneur en eau optimale et de la densité sèche maximale en fonction du pourcentage de la chaux.

D'après la figure IV-3, nous constatons qu'une sensibilité à l'eau des mélanges se traduit par des courbes Proctor de formes variées. À 0% de la chaux, la courbe Proctor présente une forme accentuée, ce qui explique une sensibilité du sol à l'eau.

Pour les mélanges (Marne + 3%, 6%, 9%,12% de la chaux), les courbes Proctor sont déplacées vers la droite, elles présentent une forme aplatie et les optimums Proctor sont déplacés vers les teneurs en eau plus fortes par apport au sol brute.

D'après la figure IV-4, la densité sèche maximale diminue tandis que la teneur en eau optimale augmente. Cet effet constitue manifestement un avantage pour des sols où la teneur en eau naturelle est trop élevée. Le traitement à la chaux permet donc de transformer en quelques minutes un matériau plastique, collant et difficile à compacter, en un matériau rigide, facile à manipuler et à mettre en œuvre, et qui présente de plus une excellente portance.

Donc, le traitement à la chaux réduit la valeur de la densité sèche maximale 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 diminution de la densité sèche maximale est due à la faible masse volumique de la chaux (F. MELLAL, B. LAMRI. 2011).

Un autre effet du traitement à la chaux est une réduction de la teneur en eau. Cet assèchement résulte de quatre phénomènes différents :

a)- Diminution de la teneur en eau due à la chaux (dépend uniquement de la quantité de chaux ajoutée) :

- 1. Fixation chimique d'eau d'hydratation par l'oxyde de calcium (chaux vive) :**
l'oxyde de calcium se lie chimiquement à l'eau du sol pour se transformer en hydroxyde de calcium: $\text{CaO} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Ca}(\text{OH})_2$.
1g de CaO libre contenu dans la chaux fixe chimiquement 0,321 g d'eau, une chaux vive titrant 92 à 93 % de CaO libre fixe donc environ 30 % de son poids en eau d'hydratation.
- 2. Evaporation par la chaleur d'hydratation de l'oxyde de calcium (chaux vive) :**
la réaction d'extinction de la chaux est exothermique. Une partie de la chaleur dégagée élève la température du mélange, le reste provoque une évaporation de l'eau du sol (quantité d'eau évaporée grâce à la chaleur d'hydratation $\pm 0,15$ g d'eau par g de CaO incorporé au sol). La répartition de la chaleur d'hydratation entre l'échauffement du mélange d'une part et l'évaporation d'autre part dépend de la

vitesse d'hydratation de la chaux ainsi que des échanges de chaleur entre le mélange et son environnement.

3. **Augmentation de la quantité de matière sèche (chaux vive ou éteinte) :** on observe une réduction de teneur en eau du fait que la matière sèche présente est augmentée du poids de la chaux éteinte formée, soit environ 1,3 fois le poids de chaux vive ajoutée.

b)- Diminution de la teneur en eau due aux facteurs extérieurs sur chantier (malaxage et aération) :

Une évaporation notable d'eau se produit lors du malaxage et au cours de l'exposition du mélange pulvérisé à l'air avant le compactage. Cette évaporation se produit également en l'absence de chaux.

IV-4-2 Influence du traitement sur les caractéristiques de portance (Essai CBR) :

L'essai CBR consiste à mesurer la résistance au poinçonnement d'un sol présentant la teneur en eau correspondant à l'optimum Proctor. La stabilité immédiate peut être caractérisée par l'indice de portance immédiat. Elle caractérise l'aptitude du matériau à supporter les opérations de mise en œuvre, c'est la compactibilité et à ne pas se déformer au jeune âge sous le trafic du chantier ou sous la circulation, c'est la traficabilité. Les figures IV-5-6 représentent la variation de la pression du piston en fonction de son enfoncement (Immédiat et imbibé) de nos échantillons.

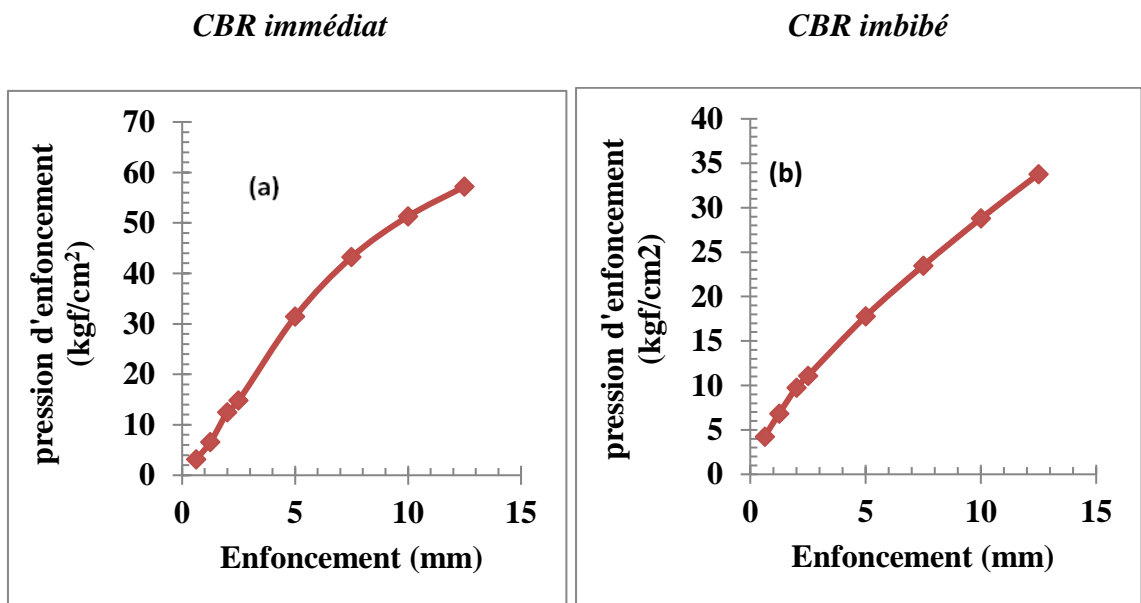


Figure VI-5 : Variation de la pression du piston en fonction de son enfoncement (marne brute)

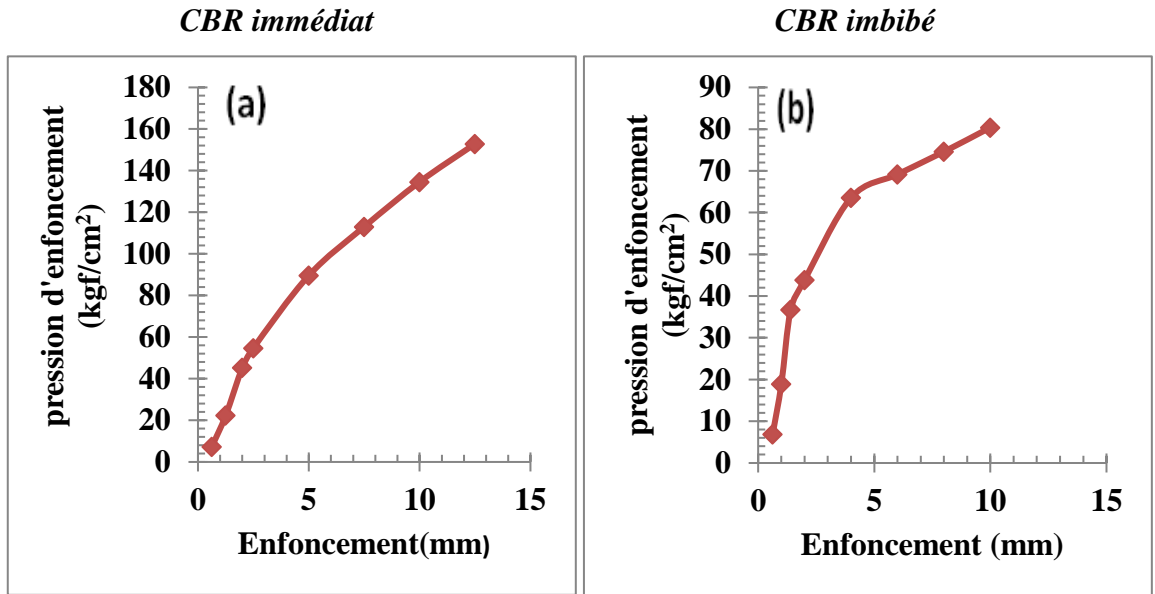


Figure VI-6 : Variation de la pression du piston en fonction de son enfoncement (3% chaux)

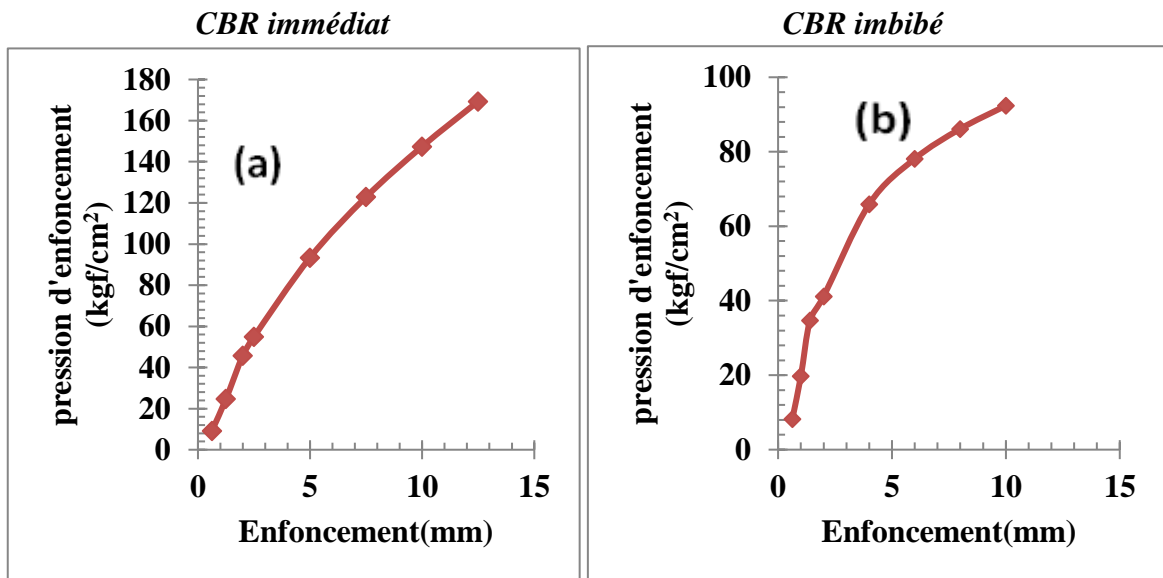


Figure VI-7 : Variation de la pression du piston en fonction de son enfoncement (6% chaux)

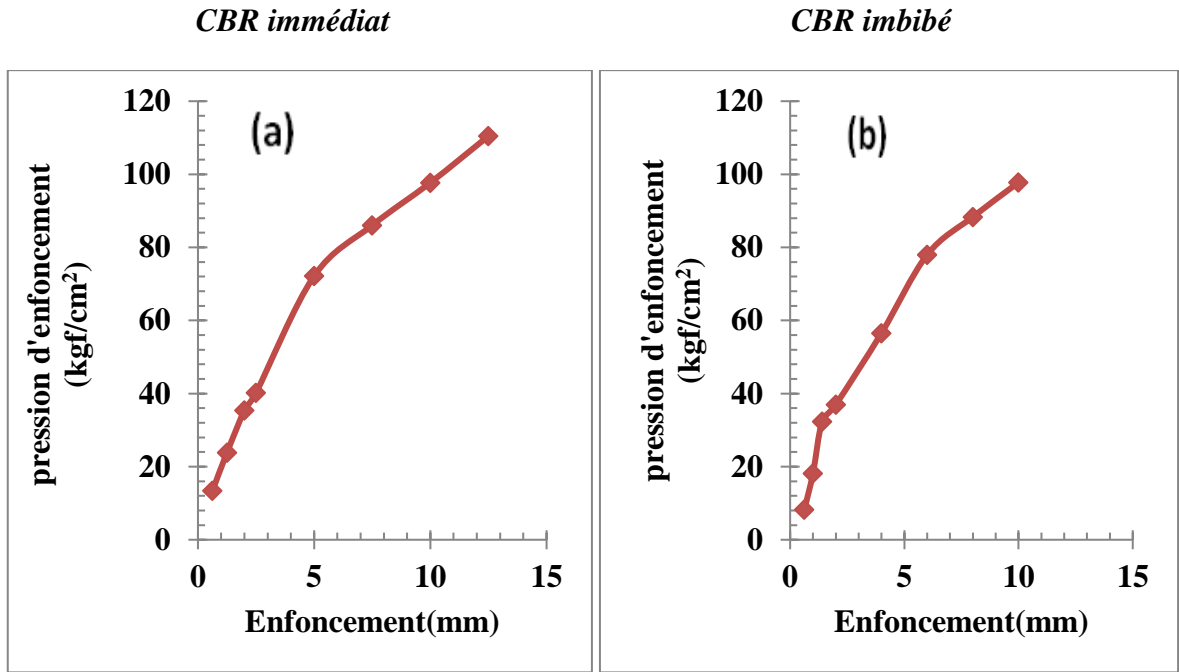


Figure VI-8 : Variation de la pression du piston en fonction de son enfoncement (9% chaux)

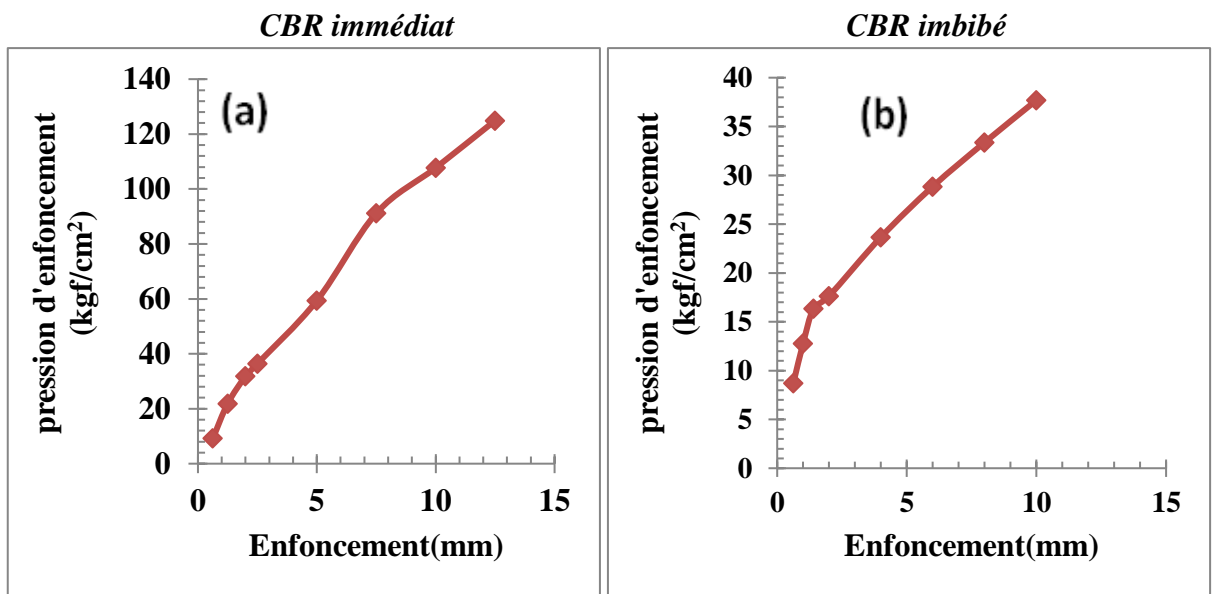


Figure VI-9: Variation de la pression du piston en fonction de son enfoncement (12% chaux)

La variation des indices CBR immédiat et imbibé en fonction de la teneur en chaux sont représentés sur la figure La figure IV-10.

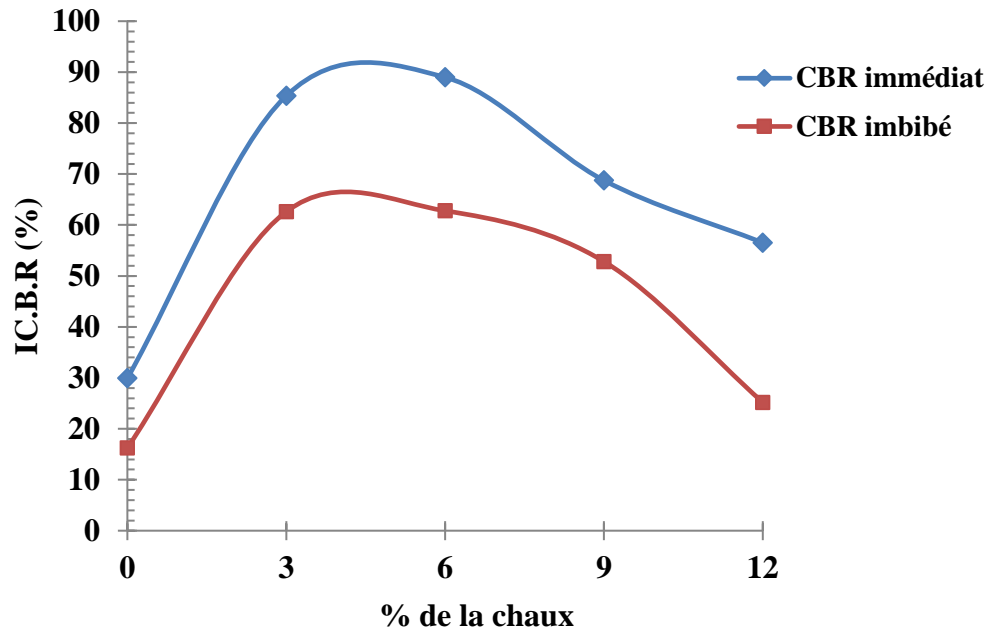


Figure IV-10 : courbe de ICB.R en fonction le pourcentage de la chaux.

D'après ces résultats on constate que :

- L'ajout de la chaux influe positivement sur les indices CBR.
- Les valeurs des indices CBR imbibé sont inférieures à celles immédiat. Cela est dû à la sensibilité de la marne à l'eau.

Les indices CBR immédiat et imbibé augmentent suite à l'augmentation du pourcentage de la chaux, Cette augmentation atteint son maximum (89 pour ICB.R immédiat et 63 pour ICB.R imbibé) dans le cas de traitement avec 6% et 3% de la chaux, respectivement. Au-delà de ces pourcentages les indices CBR diminuent, toute en gardant des valeurs supérieures à celle de la marne brute. On note un gain d'environ 200% et 300% pour les indices CBR immédiat et imbibé respectivement.

L'amélioration de la portance de la marne traitée 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 fines de l'additive chaux.

Si on compare ces résultats avec les valeurs du (Tableau IV-4), comportant le référentiel de l'indice de portance immédiat, nous constatons que la chaux améliore la compactibilité et la traficabilité notamment pour l'ajout de 6% de chaux.

Tableau IV-04 : Degré de compactibilité et de traficabilité.

IPI < 25	compactibilité faible à très faible. Compactage très difficile sinon impossible (IPI < 10)	traficabilité mauvaise tant que le liant n'a pas de prise. Choisir des engins légers ayant une bonne traficabilité
25 < IPI < 40	compactibilité moyenne. Compactage possible mais présentant quelque difficultés.	traficabilité médiocre avant prise.
40 < IPI < 60	compactibilité moyenne à élevée. compactage aisé.	traficabilité correcte dans des conditions normales de sollicitations.
IPI > 60	compactibilité élevée.	bonne traficabilité.

IPI: indice portant immédiat

IV-5 performance mécanique:

L'utilisation d'un traitement à la chaux aboutit à l'amélioration des caractéristiques mécaniques du matériau traité.

IV-5-1 Influence du traitement sur la résistance au cisaillement :

Les essais de cisaillement sont réalisés dans les conditions de l'optimum, c'est-à-dire des teneurs en eau optimales et densités sèches maximales correspondant à chaque mélange, avec les différents pourcentages de la chaux : qui permettent d'obtenir la plage de résistance au cisaillement la plus intéressante en termes de C et ϕ :

Les figures ci après représentent la plage de résistance au cisaillement la plus intéressante en termes de C et ϕ avec les différents pourcentages de la chaux :

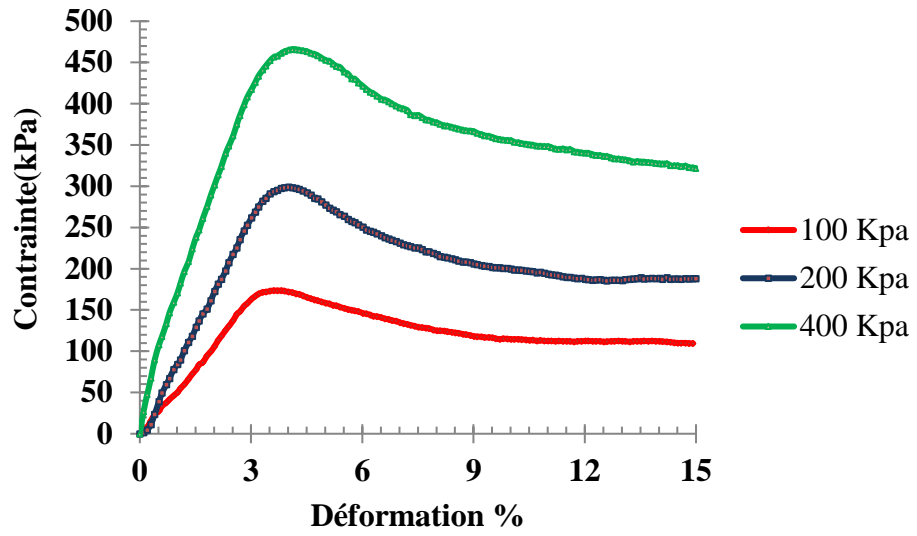


Figure IV-11: Courbes contraintes-déformations de la marne brute

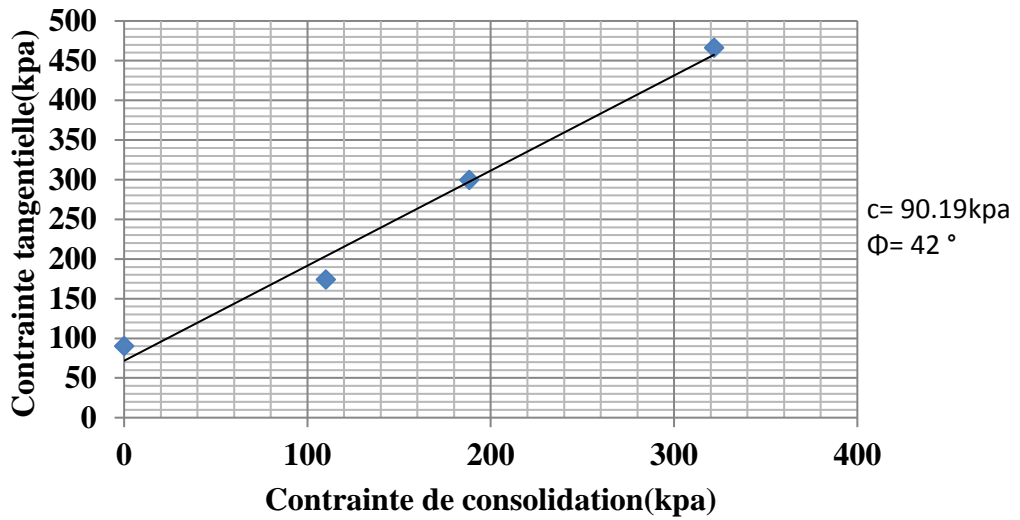


Figure IV-12 : Droite intrinsèque de la marne brute

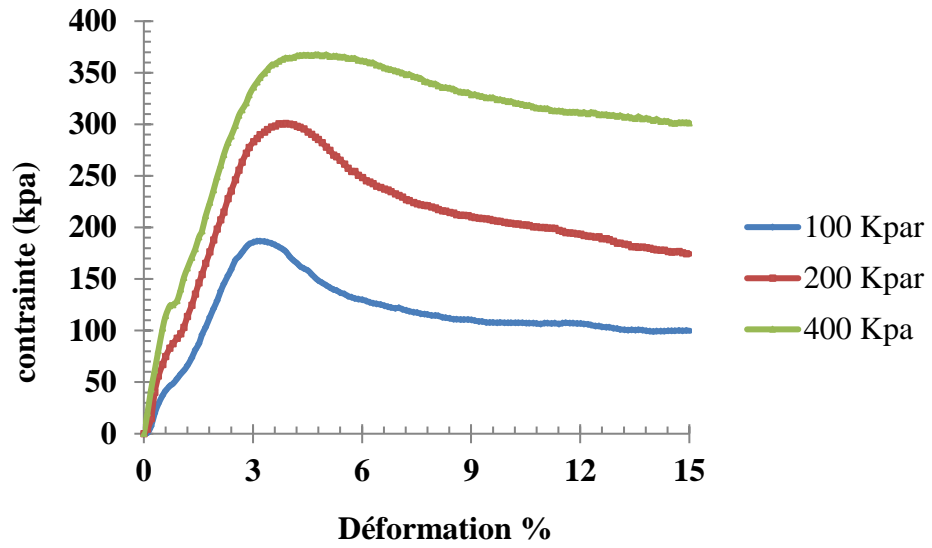


Figure IV-13 : Courbes contraintes-déformations de la marne + 3% chaux.

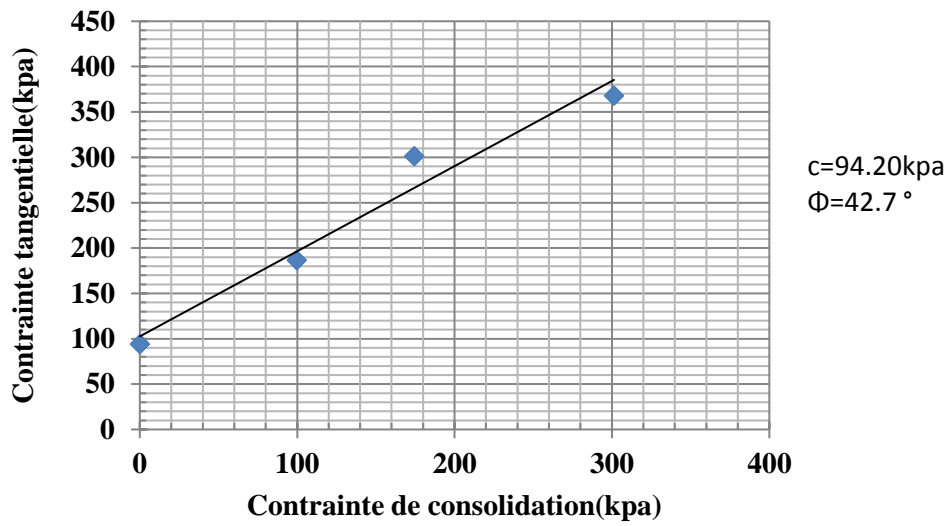


Figure IV-14 : Droite intrinsèque de la marne + 3% chaux

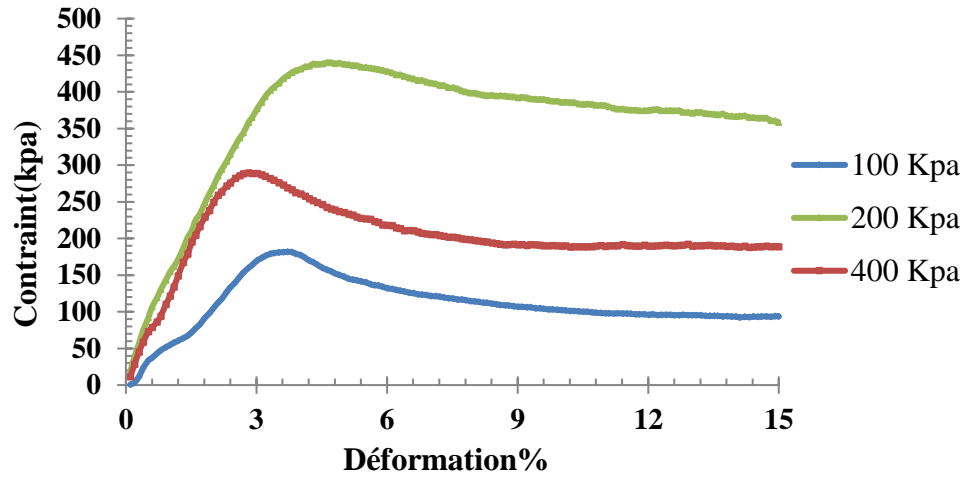


Figure IV-15 : Courbes contraintes-déformations de la marne + 6% chaux.

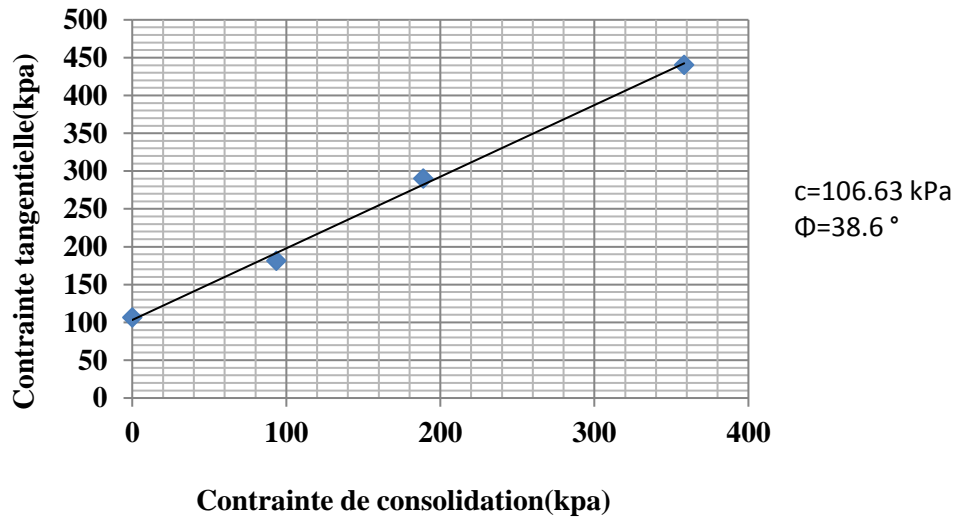


Figure IV-16 : Droite intrinsèque de la marne + 6% chaux.

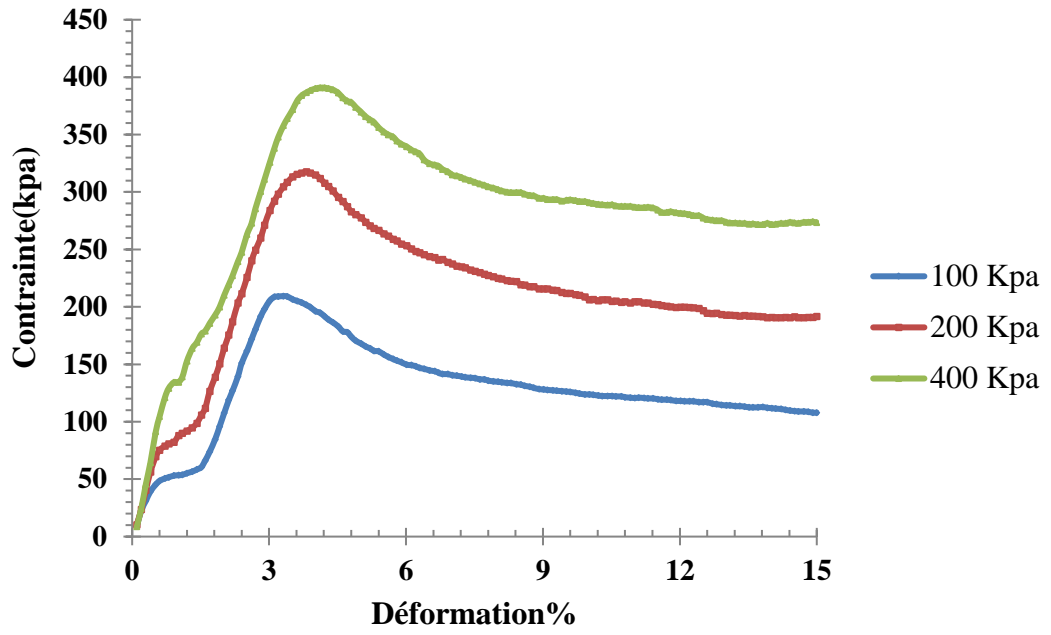


Figure IV-17: Courbes contraintes-déformations de la marne + 9% chaux.

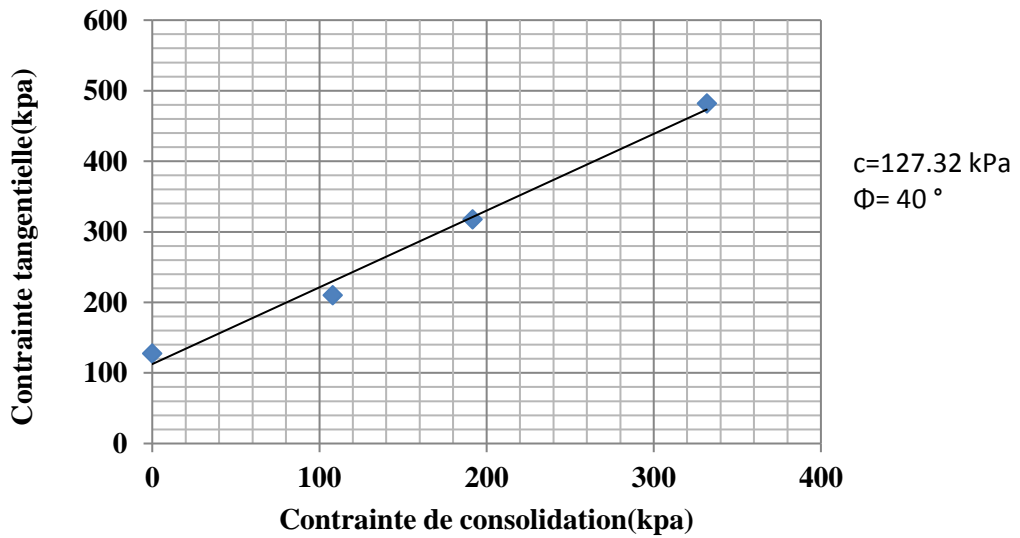


Figure IV-18: Droite intrinsèque de la marne + 9% chaux.

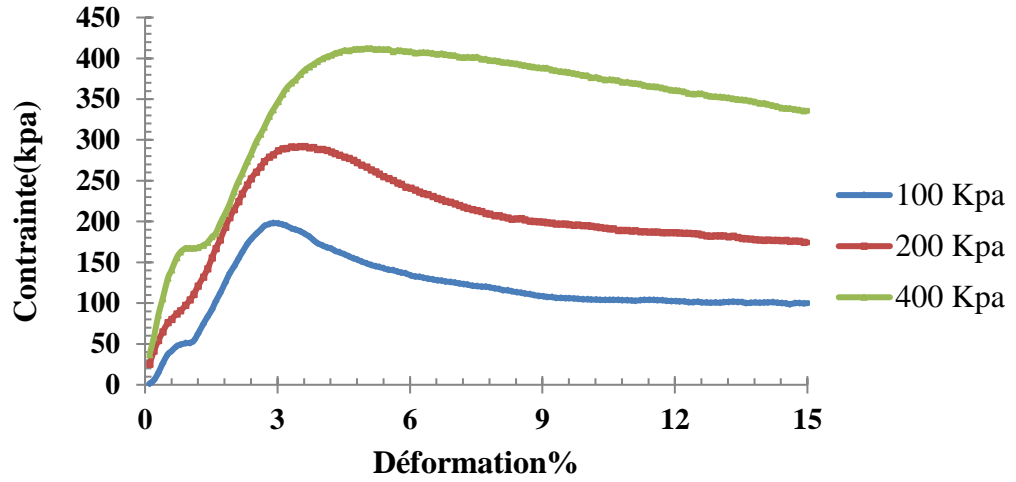


Figure IV-19: Courbes contraintes-déformations de la marne + 12% chaux.

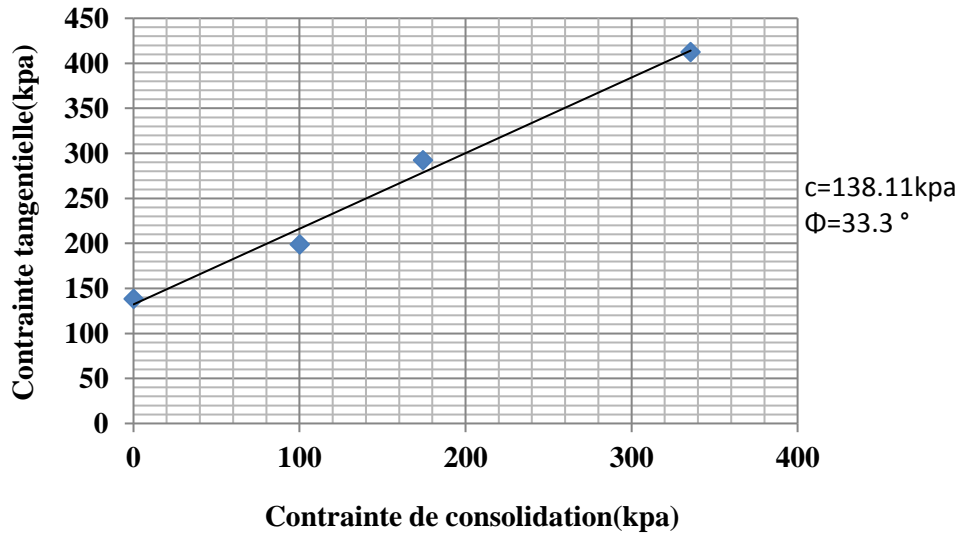


Figure IV-20 : Droite intrinsèque de la marne + 12% chaux.

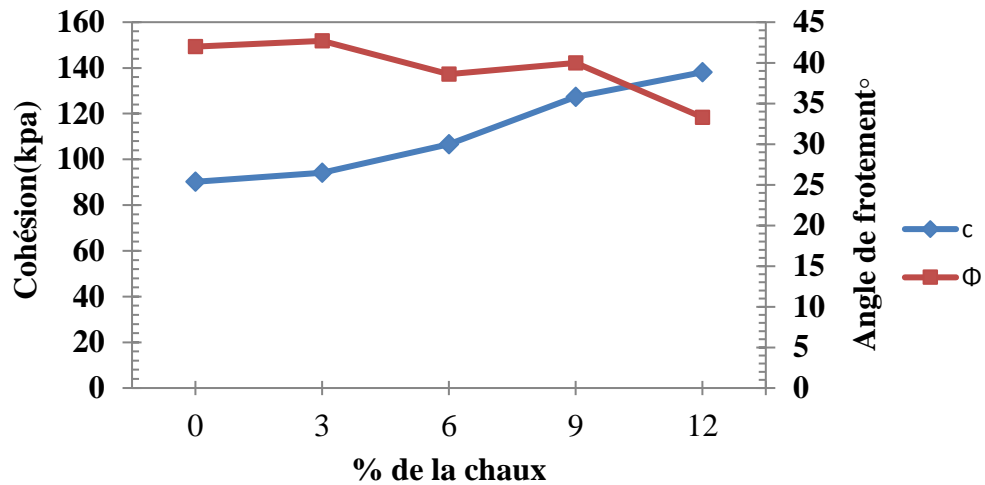


Figure IV-21: Variation de la cohésion et de l'angle de frottement en fonction du pourcentage de la chaux.

D'après la figure IV-21, on constate que :

- Les caractéristiques de cisaillement augmentent lorsqu'on ajoute 3% de la chaux. La cohésion passe de 90.19 kPa à 94.20 kPa et l'angle de frottement passe de 42° vers 42.7°.
- Lorsque les taux de la chaux passent de (3% à 6%) et de (9% à 12%), l'angle de frottement évolue dans le sens inverse et il subit une chute considérable.
- La cohésion évolue toujours dans le même sens (augmentation continue) jusqu'à une valeur maximale 138.1kPa avec le traitement par 12% de la chaux.

Donc on peut conclure que le paramètre principal qui influence les caractéristiques mécaniques de sol marneux est le pourcentage de la chaux ajoutée.

IV-6 Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons étudié l'influence du traitement à la chaux, sur les caractéristiques immédiates et sur les performances mécaniques. Notre objectif est de chercher un matériau pouvant être utilisé en couche de base et de fondation pour des chaussées à moyen et fort trafic.

Au cours de cette étude, nous avons vu que le traitement à la chaux améliore la compactibilité, la traficabilité et diminue la plasticité du matériau.

Les résultats obtenus à partir de l'étude de la résistance au cisaillement montrent que la cohésion augmente et l'angle de frottement diminue suite à l'augmentation de la teneur en chaux. Mais cette amélioration reste toujours décevante vis-à-vis du résultat escompté.

CONCLUSION GENERALE

CONCLUSION GENERALE

Nous avons présenté dans ce mémoire, un travail purement expérimental qui a duré près de 4 mois au sein des laboratoires des travaux public du sud (LTPS). Le travail réalisé fait partie d'un projet global mené sur l'étude des marnes de la région de Ghardaïa. Il a pour objectif principal leur caractérisation physique, chimique, minéralogique, mécanique et traité ce sol par la chaux pour comprendre mieux son comportement.

Notre étude entre dans le cadre de valorisation des matériaux locaux afin de généraliser leurs utilisations en techniques routières à différents trafics (moyen et fort), dans le but de protéger l'environnement, et pour réduire l'épaisseur des structures de chaussées proprement dites, et éviter le recours à des transports onéreux et gênants, les deux contribuant de manière sensible à l'économie des projets routiers.

Les essais d'identification géotechnique réalisés sur notre matériau, nous ont permis de constater que certaines caractéristiques géotechniques entrent dans les règles de spécification d'utilisation des marnes en Algérie, par contre il y'a d'autres qui sont médiocres (le taux des fines, la plasticité et la portance) par rapport aux matériaux routiers habituels.

On ce qui concerne le traitement à la chaux, le but est de voir l'influence de ce traitement sur les caractéristiques immédiates et le comportement mécanique de la marne. L'étude à montré les points suivants:

- Les limites d'Atterberg décroissent suite à l'augmentation de pourcentage de la chaux ; ce qui rend la marne traitée plus maniable durant les périodes humides.
- L'ajout de la chaux a la marne a beaucoup influencé ses caractéristiques de compactage ; la densité sèche maximale a été réduite et la teneur en eau est augmentée suite à l'ajout de la chaux.
- Le traitement de notre matériau à la chaux améliore sensiblement la portance ; les indices CBR immédiat et imbibé ont augmentés considérablement au fur et à mesure que le pourcentage de la chaux augmente.
- Le traitement de la marne à différents pourcentages de la chaux améliore les caractéristiques de cisaillements (cohésion et l'angle de frottement).

Enfin, on peut conclure que le traitement par la chaux n'est pas une solution adéquate pour que la marne soit insensible à l'eau. Donc des mesures de protections contre l'infiltration des

eaux doivent être prises lors de la construction d'une chaussée. Pour les eaux pluviales, il faut accélérer le ruissellement et empêcher toute stagnation d'eau sur la chaussée. Pour les eaux capillaires, réaliser un bon drainage et limiter les remontées, par exemple en construisant la route sur un petit remblai anticapillaire.

Les résultats obtenus montrent que le dosage de la chaux est un paramètre influant directement sur les qualités de notre échantillon. Néanmoins, nous ne pouvons pas confirmer ou infirmer l'utilisation des marnes traitées dans la construction des routes à moyen et fort trafic. Il est évident que des essais complémentaires sont à réaliser sur un échantillonnage plus grand, avec des traitements autres que la chaux et à des dosages économiques.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

AFNOR NF P 98- 230-2: Essais relatifs aux chaussées- préparation des matériaux traités aux liants hydrauliques ou non traités – fabrication des éprouvettes de sables ou de sols fins par compression statique.

AFNOR NFP 11-300: Exécution des terrassements- Classification des matériaux utilisables dans la construction des remblais et des couches de forme d'infrastructures routières.

AFNOR NFP 18-573: Granulats- Essai los Angeles.

AFNOR NFP 18-598: Granulats : équivalent de sable.

AFNOR NFP 94 – 057: Analyse granulométrique des sols - Méthode par sédimentation.

AFNOR NFP 94-010: Sols : reconnaissance et essais - Glossaire géotechnique - Définitions - Notations - Symboles.

AFNOR NFP 94-011: Sols : reconnaissance et essais – Description. Identification. Dénomination des sols – Terminologie. Éléments de classification.

AFNOR NFP 94-051: Sols : Reconnaissance et essais -Détermination des limites d'Atterberg - Limite de liquidité à la coupelle - Limite de plasticité au rouleau.

AFNOR NFP 94-056: Sols : Reconnaissance et essais - Analyse granulométrique - Méthode par tamisage a sec après lavage.

AFNOR NFP 94-068: Sols : Reconnaissance et essais - Détermination de la valeur de bleu de méthylène d'un sol ou d'un matériau rocheux par l'essai a la tache.

AFNOR NFP 94-078: Sols : Reconnaissance et essais - Indice CBR après immersion-Indice CBR immédiat - indice portant immédiat mesure sur échantillon compacte dans le moule CBR.

AFNOR NFP 94-093: Sols : Reconnaissance et essais - Détermination des références de compactage d'un matériau essai Proctor normal - Essai Proctor modifié.

AFNOR NFP 98-101: Chaux Aérienne Calcique Pour Sols et Routes Spécification Norme française.

Aissa Mamoune S.M., Djedid A. A., Bekkouche A. (2002): « Techniques de Stabilisation des Sols Expansifs », Journées d'études sur les sols gonflants, Université AbouBekr Belkaid de Tlemcen – Algérie, les 27 et 28 Octobre 2002

Akacem Mustapha (2008): « Contribution à l'étude de la stabilisation aux liants hydrauliques des tufs de la région d'Adrar », Thèse de magister, USTO.

Alili boudjemaa(2015): « Caractérisation mécanique et minéralogique des marnes de la Grande Kabylie (Application aux marnes du Sud et de l'Ouest) », Mémoire master 02, Université mouloud Mammeri de Tizi ousou.

Babouri radha (2008): « Stabilisation des sols argileux par la chaux (cas de kaolin de gisement de djebel debagh- Guelma) », Thèse de magister, Université m'sila.

Barka Zeineb (2017): « Etude Du Comportement d'une Marne Argileuse Traitee Pour Valorisation Dans Les Projets Routiers », Mémoire de master 02, Université 08 Mai 1945 de Guelma.

Baryla J.-M., Chenais V., Gavois L. Havard H. (2000): Effet de sulfates et sulfures sur des marnes traitées à la chaux et au liant routier sur un chantier autoroutier. Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées n°224. pp 39-48.

Bufalo M. (1989): L'érosion des terres noires dans la région de Buech (Hautes-Alpes, France). Thèse de doctorat en géologie, Aix-Marseille III, 230 p.

Caroline Le Bouteiller(2010): «Dégradation des sédiments marneux et suspensions hyper concentrées. Sciences de l'environnement. », Thèse en Sciences de la Terre, de l'Univers et de l'Environnement, Université de Grenoble Français.

Centre de recherches routières: Stabilisation des sols à la chaux, Bruxelles, décembre 1971.

Ch. SCHON: Classification géotechnique des sols basée sur la classification U.S.C.S

CIM béton: « Traitement des sols aux liants hydrauliques », Terrassement et assises de chaussées, centre d'information sur le ciment et ses applications.

D. Delahaye et al: Désordres sur des remblais en marne, thèse, université de Nice France

Daheur Elhadj Guesmia(2008): «Comportement mécanique d'un mélange Tuf -Sable calcaire sans et avec traitement à la chaux et/ou ciment», Mémoire Université de Amar Telidji Laghouat.

Daheur Elhadj Guesmia(2011): «Contribution à l'étude de traitement des tufs d'encroûtements dans le domaine de la géotechnique routière», thèse magistère, l'université de Amar Telidji Laghouat.

Fenzy.E. (1966): « particularité de la technique routière au Sahara », Rapport technique du laboratoire centrale des travaux publics, Alger, sep.1980.

Goual Idriss (2002): « Contribution à l'étude traitement aux liants hydrauliques des tufs de la région de Laghouat », thèse magistère, l'université de Amar Telidji Laghouat.

Goual Idriss (2012): «Comportement mécanique et hydrique d'un mélange de tuf et de sable calcaire de la région de Laghouat: Application en construction routière», thèse docteur, Université aboubakr belkaid – tlemcen.

GTR(2000): Réalisation des remblais et des couches de forme

GTS (2000): Traitement des sols à la chaux et/ou aux liants hydrauliques, SETRA

Livet M. (1990): « Sols Argileux Gonflants – Site Expérimental de Waza-Maltman », Rapport de Synthèse, Laboratoire Régional des Ponts et Chaussées de Clermont- Ferrand, Lyon.

M.krikrou Mohammed el-akhdar (2018): « Caractérisation et amélioration des propriétés mécaniques de l'argile de DIDOUCHE (Constantine) par ajout de Liants (La chaux) », mémoire master 02, Université L'arbi Ben Mhidi de Constantine.

Melbouci bachir(2002): «: caractéristiques et comportement en construction routière », thèse docteur, Université Tizi-Ouzou.

Mellal fatima (2010): « Etude du comportement d'un remblai routier traite a la chaux », thèse de doctorant, Université Hassiba Benbouali de Chlef.

Mitchell J.K. (1986): Practical Problems from Surprising Soil Behavior. 20e Terzaghi lecture, A.S.C.E. Journal of Geotechnical Engineering, vol. 112, nO 3, mars 1986 (Delayed Failure of Limestabilized Pavement Bases: pp. 274-279).

Mokrani lynda(2013): « Stabilisation du sol marneux à la chaux et au ciment Etude comparative», Mémoire de master 02, Université Mouloud Mammeri de Tizi ousou.

Nicolas Cabane (2004): « Sols traités à la chaux et aux liants hydrauliques : Contribution à l'identification et à l'analyse des éléments perturbateurs de la stabilisation », Thèse de doctorat, Ecole nationale supérieure des Mines de St-Etienne.

SETRA – LCPC: Manuel de conception des chaussées neuves à faible trafic, SETRA – LCPC, juillet 1980.

Van Ganse(1971): «Quelques aspects théoriques et pratiques de la stabilisation des sols à la chaux (Effets immédiats de la chaux», Bruxelles.

Verhasselt (1978): Rapport de recherche« Amélioration immédiate à la chaux», Bruxelles

Chaux flash(2009): (www.chauxflash.be)

Wikip (2018): <https://www.wikip.fr/essais-mateacuteriaux-granulaires>

ANNEXES

ANNEXE A

Tableau de Spécifications de ALLOUL (1981) et STRUILLOU (1984)

				poids	lourd	/jour	
			<	130	300	600	>
			130	300	600	1200	1200
Zone II sup- humide H=350 à 600 mm de pluie avec bon drainage exigé	% < 80 µm max	BF	30	30	30	30	30
	% > 4 mm min	BF	30	30	30	30	30
	% > 12,5 mm min	BF	10	10	10	10	10
	LA max, sur > 12,5 mm sec	B	100	55	35		
		F	100	100	100	100	100
	IP max, sur < 0,4 mm	BF	10	10	10	10	10
	CBRe à 4 j d'immersion min	BF	40	70	80	90	100
	% CaCO ₃ min, sur < 1 mm	B	70	70	70		
		F	60	60	60	60	60
% CaSO ₄ max, sur < 1 mm	BF	tr	tr	tr	Tr	Tr	
Zone III semi aride H= 100 à 350 mm de pluie par an sans exigence- de bon drainage	% < 80 µm max	BF	30	30	30	30	30
	% > 4 mm min	BF	30	30	30	30	30
	% > 12,5 mm min	BF	10	10	10	10	10
	LA max, sur > 12,5 mm sec	B	100	100	55	35	
		F	100	100	100	100	35
	IP max, sur < 0,4 mm	BF	13	13	13	13	13
	CBRe à 4 j d'immersion min	BF	40	70	80	90	100
	% CaCO ₃ min, sur < 1 mm	B	70	70	70	70	
		F	60	60	60	60	60
% CaSO ₄ max, sur < 1 mm	BF	05	05	05	05	05	

Zone IV aride H<100 mm de pluie par an sans exigences de bon drainage	Rc (MPa) min, sur < 5 mm ; ($\gamma_d = 0,95$, γ_d opm ; 48 h à 55°C)	B	2,5	03	3,5		
		F	1,5	02	2,5	03	3,5
	IP max, sur < 0,4 mm	BF	16	16	16	16	16
	CBRe à 4 j d'immersion min	BF	30	60	70	80	90
	% (CaCO ₃ +CaSO ₄) min Sur < 1 mm	B	70	70	70		
		F	60	60	60	60	60
	%NaCL max , sur < 1 mm	BF	03	03	03	03	03

Caractéristiques à viser si possible, en Algérie pour le choix des tufs d'encroûtements, suivant la zone climatique et le trafic prévu, Tufs d'encroûtement déconseillés ; B : pour couche de Base ; F : pour couche de fondation ; traces ; Rc (Mpa) ; compression simple sur cylindres (5*10 cm) séchés 48 h à 55°C ; Ip indice de plasticité ; granulométrie sous eau après 48h dans l'eau : compactage CBR à 55 cops/couche à Wopm puis 4 jours d'immersion ; la Los Angeles sur granulométrie A,

ANNEXE B₁ : Analyse granulométrique des sols

Voie Humide

Echantillon : Marne d'Oued Nachou

Poids de l'Echantillon (g)	Tamis (mm)	Poids refus partiels (g)	Poids refus cumulés (g)	Poids refus cumulés (%)	Complément à 100	Tamisats %
1200g	5	0,37	0,37	0,03	99,97	100
	2	270,64	271,01	22,58	77,42	77
	1	116,48	387,49	32,29	67,71	68
	0,4	76,55	464,04	38,67	61,33	61
	0,2	26,97	491,01	40,92	59,08	59
	0,1	46,72	537,73	44,81	55,19	55
	0,08	0,74	538,47	44,87	55,13	55

ANNEXE B₂ : Analyse sédimentométrique

Température ° C	Temps	Durée de chute	R'=R -1000 R : lecture au densimètre	Correction (C)	Lecture corrigée R1=R'+C Ou R1=R'-C	Diamètre (D)	% des éléments (D) sur l'ensemble de l'échantillon
26.4°C	8H20	30 "	20	+1.116	21.116	0.075	55
26.4°C	8H21	01'	19	+1.116	20.116	0.055	52
26.4°C	8H22	02'	18	+1.116	19.116	0.038	50
26.4°C	8H25	05'	16	+1.116	17.116	0.025	45
26.4°C	8H30	10'	14	+1.116	15.116	0.017	39
26.4°C	8H40	20'	12	+1.116	13.116	0.012	34
26.4°C	9H00	40'	09	+1.116	10.116	0.008	26
24.4°C	09H40	80'	04	+0.664	4.664	0.006	22
24.4°C	10H40	160'	02	+0.664	2.664	0.004	05
23.8°C	12H20	320'	01	+0.748	1.748	0.003	04
28°C	24H	1440'	0.5	+1.614	2.040	0.002	04
-	48H	-	00	-	-	0.001	00
-	-	--	-	-	-	0.0005	-

Remarque:

R1=R' +C Si T° > à 20° C

$p' = \frac{y}{100} \times p$ avec y = % du passant à 0.080 mm = **55%**

R1= R' - C Si T° < à 20° C

ANNEXE B₃ : Limits d'atterberg

Echantillon : Marne d'Oued Nachou

Limite de plasticité

	1 ^{er} Essai	2 ^{ème} Essai	3 ^{ème} Essai
N° de la tare	D ₆	T _X	D ₂
Poids total humide	9,73	9,47	9,62
Poids total sec	9,48	9,26	9,37
Poids de la tare	8,48	8,44	8,37
Poids de l'eau	0,25	0,21	0,25
Poids du sol sec	1,00	0,82	1,00
Teneur en eau (%)	25,00	25,61	25,00
Moyenne	25,00	25,61	25,00

LP = 25,20

Limite de liquidité

	1 ^{er} Essai		2 ^{ème} Essai		3 ^{ème} Essai éventuellement	
Nombre de coups	18		24		34	
N° de la tare	0,55	139	125	355	108	294
Poids total humide	18,48	18,27	20,29	19,55	18,2	18
Poids total sec	16,96	16,8	18,36	17,8	16,89	16,73
Poids de la tare	13,79	13,71	14,09	13,94	13,87	13,79
Poids de l'eau	1,52	1,47	1,93	1,75	1,31	1,27
Poids du sol sec	3,17	3,09	4,27	3,86	3,02	2,94
Teneur en eau (%)	47,95	47,573	45,199	45,337	43,377	43,197
Moyenne	47,76		45,27		43,29	

RAPPORT D'ESSAI
Limites d'Atterberg
 NF P 94 - 51

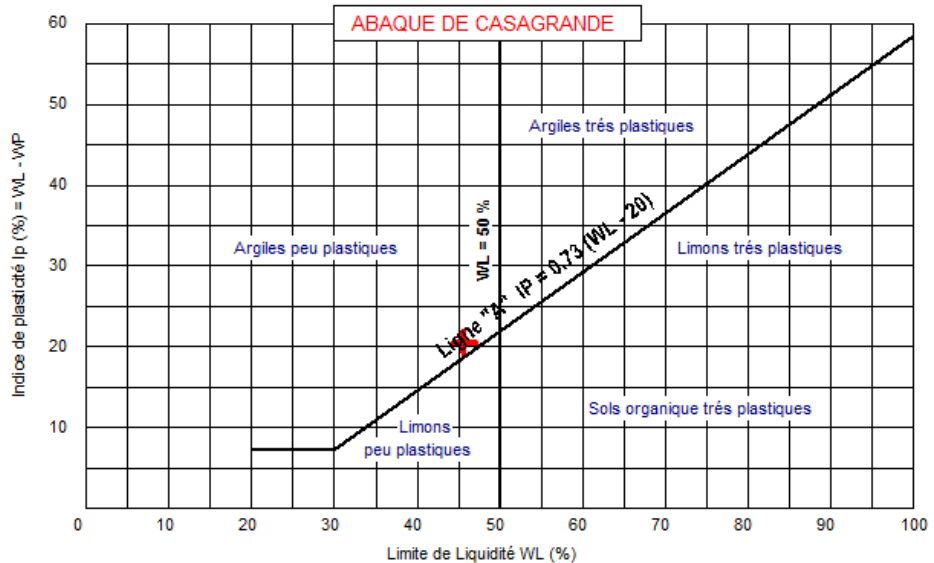
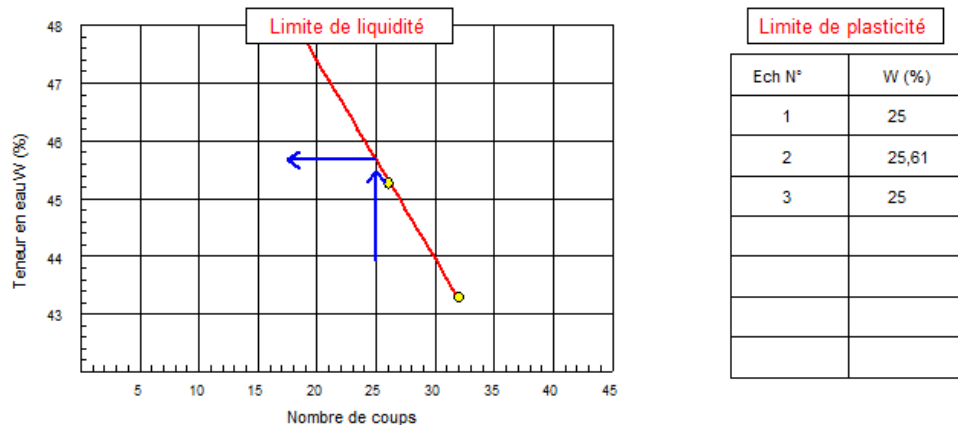
Client :
 Projet : RECHERCHE
 Endroit :

N° Projet : sans titre
 Réf. Client :
 N° rapport : Rév :

Echantillon n° : TUF
 Sondage n° :
 Profondeur :
 Matériaux :

Provenance :
 Endroit de prélèvement :
 Prélevé par : Reçu le :
 Date prélèvement : Date essais : 26.02.2020

Limite de Liquidité (%) : WL = 45,67 **Teneur en eau naturelle (%) : Weau =**
Limite de Plasticité (%) : WP = 25,20
Indice de Plasticité (%) : IP = 20,47



© Sothelis 2007

Remarque :

Préparé par :

Date :

Approuvé par :

Date :

ANNEXE B₄ : Équivalent de sable

Echantillon : Marne d'Oued Nachou

Echantillon		
	Eprouvette 1	Eprouvette 2
Masse d'échantillon	120g	120 g
Hauteur totale (sable + floculat) H_1 (cm)	30,5	28
Hauteur de sable sédiment H_2 (cm)	03	03
$ES = \frac{H_2}{H_1} \times 100$	9,83	10,71
ES moyen (%)	10,27	

ANNEXE B₅ : Essai au bleu de méthylène

Echantillon : Marne d'Oued Nachou

PriseD'essai Mh =60 g		
Calcul de la Teneur en Eau		
Tare N°	G₂₅	E
PT	120,14	126,74
Ph+T	256,51	232,30
PS+T	254,95	231,12
ps	134,81	104,38
W (%)	1,15	1,13
W _{moy}	1,14%	
Ps=ph×100 / 100 +w (%) Ps = 59,32		

-Volume de bleu injecté dans la prise d'essai :
V = 125 cm³

-Valeur au bleu de la prise d'essai passant :
V_b = V/Ms = 125 / 59,32 = 1,27

ANNEXE B₆ : Essai Proctor modifié

Echantillon : Marne d'Oued Nachou

Poids d'eau ajoutée :	10%		12%		14%	
Poids total humide :	3792		3909		3904	
Poids du moule :	1717		1717		1717	
Poids du sol humide :	2075		2192		2187	
Poids du sol sec :	1885		1955		1913	
Volume du moule :	955		955		955	
Densité sèche :	1,97		2,05		2,00	
N° de la tare :	564	F10	51	E7	553	8
Poids total humid:	103,7	107.1	29,22	85,19	77,5	79,94
Poids total sec:	95,9	99.02	23,16	78,01	70,05	72,17
Poids de la tare :	18,56	18.68	18,87	18,64	17,83	18,35
Poids de l'eau :	7,8	8.08	5,61	7,18	7,45	7,77
Poids du sol sec :	77,34	80.34	54,29	59,37	52,22	53,82
Teneur en eau :	10,09	10.06	12,18	12,09	14,27	14,44
Moyenne :	10,07		12,13		14,36	

ANNEXE B7: CBR immédiat

Echantillon: Marne d'Oued Nechou

1- Etat initial de l'échantillon 0%

Teneur en eau de compactage w ₀ (%)			Densité sèche γ _d (t/m ³)	
T° de séchage (g)	48h		p. Total humide (g)	8429
N° de la tare (g)	z30	w31	p. du mol (g)	3920
p. Total humide (g)	78,66	74,85	p. du sol humide (g)	4509,00
p. total sec (g)	72,53	68,96	Teneur en eau w ₀	11,59
p.de la tare (g)	19,04	18,73	p. du sol sec (g)	4040,57
p.de l'eau (g)	6,13	5,89	Volume du mole (cm ³)	2104,00
p. du sol sec (g)	53,49	50,23	Densité sèche γ _d	1,92
Teneur en eau w ₀	11,46	11,73		
Moyenne	11,59			

temps	Enfoncement (mm)	Fonce totale (kgf)		pression (kgf/cm ²)
		Lecture	Valeur	
0-30	0,625	0,609	62,118	3,165
1-00	1,250	1,268	129,336	6,590
1 40	2,000	2,401	244,902	12,479
2-00	2,500	2,845	290,190	14,787
4-00	5,000	6,043	616,386	31,408
6-00	7,500	8,316	848,232	43,222
8-00	10,000	9,869	1006,638	51,294
10-00	12,500	11,007	1122,714	57,208

Calculs de l'indice portant

$$A_{2,5 \text{ mm}} : p(2,5)/0,70 = 21,124$$

$$A_{5 \text{ mm}} : p(5)/1,05 = 29,913$$

ANNEXE B₈: CBR imbibé
Echantillon: Marne d'Oued Nechou
A-Etat initial de l'échantillon 0%

Teneur en eau de compactage w ₀ (%)		Densité sèche γ _d (t/m ³) = 1.91	
T° de séchage (g)	48h	p. Total humide (g)	10639
N° de la tare (g)		p. du mol (g)	6051
p. Total humide (g)		p. du sol humide (g)	4588
p. total sec (g)		Teneur en eau w ₀	14,35
p.de la tare (g)		p. du sol sec (g)	4012,11
p.de l'eau (g)		Volume du mole (cm ³)	2104

B-Etat final de l'échantillon après imbibition

Teneur en eau après immersion w _f (%)			Poids approximatif du sol imbibé	
N° de la tare (g)	L1	F10	p. Total après imbibition	10737
p. Total humide (g)	2299,3	2288,97	p. Total avant imbibition	10639
p. total sec (g)	2019,7	2018,98	P. de l'eau absorbée	98
p.de la tare (g)	110,1	99,47	Différence de teneur en eau	2,76
p. de l'eau	279,60	269,99	p. du sol imbibé	4686
p. du sol sec	1909,60	1919,51		
Teneur en eau W _f	14,64	14,07		
Moyenne	14,35			

temps	Enfoncement (mm)	Force totale (kgf)		pression (kgf/cm ²)
		Lecture	Valeur	
0-30	0,625	0,818	83,436	4,252
1-00	1,250	1,313	133,926	6,824
1 40	2,000	1,875	191,250	9,745
2-00	2,500	2,131	217,362	11,076
4-00	5,000	3,42	348,840	17,775
6-00	7,500	4,519	460,938	23,487
8-00	10,000	5,54	565,080	28,794
10-00	12,500	6,5	663,000	33,783

ANNEXE B₉ : Essai de compression simple

Échantillon: Marne d'Oued Nachou

$W_{opm} : 12.5 (\%)$

$\gamma_{d\ max} : 2.05(t/m^3)$

Compacité théorique	Densité	Poids du sol sec	Poids de l'eau	Poids du sol humide
100	2,05	402,31	50,29	452,60
98	2,01	394,27	49,28	443,55
95	1,95	382,20	47,77	429,97

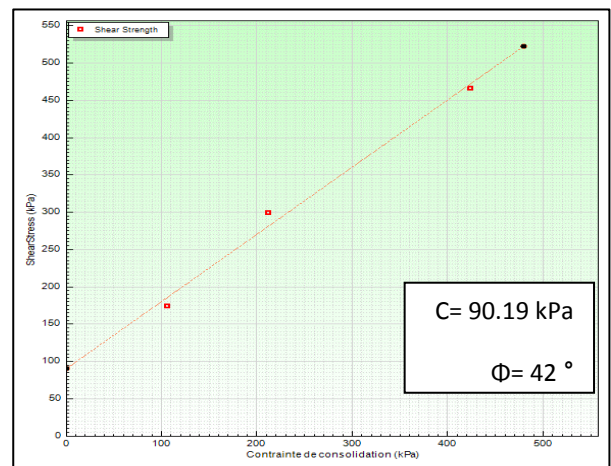
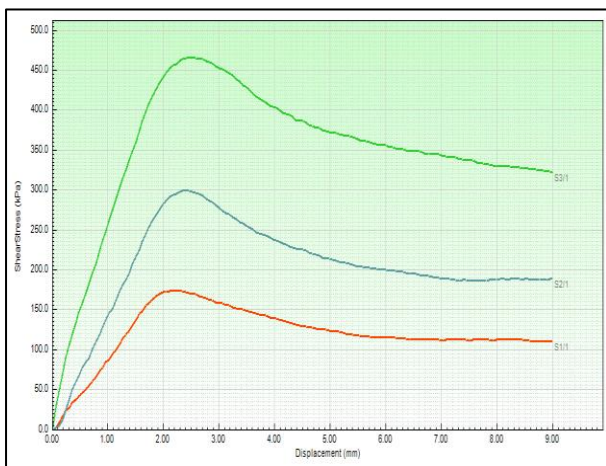
N° éprouvette	Poids réel après compactage	Poids réel à l'écrasement	Teneur en eau	Diamètre éprouvette	Hauteur éprouvette	Volume éprouvette	Densité sèche à l'écrasement	Compacité à l'écrasement	Lecture	Résistance en (Kg/cm ²)	RC Moyenne (bars)
100%	447.26	400.17	12,02	5	10	196.25	2,04	100	4.098	21,30	27.06
100%	448.20	399.75	12,12	5	10	196.25	2,04	100	6.314	32,82	
98%	438.88	389.46	12,69	5	10	196.25	1,98	97	4.447	23,11	23.25
98%	436.91	387.46	12,76	5	10	196.25	1,97	97	4.501	23,39	
95%	427.95	377.25	13,44	5	10	196.25	1,92	94	3.607	18,75	18.62
95%	426.99	376.28	13,48	5	10	196.25	1,92	94	3.557	18,49	

ANNEXE B₁₀ : Essai de cisaillement direct

Échantillon: Marne d'Oued Nachou

Tableau résultats des contraintes tangentielles de la marne brute

3 kg de la charge		6 kg de la charge		12 kg de la charge	
Displacement	Shearstress	Displacement	Shearstress	Displacement	Shearstress
0,05999994	1,768389	0	0	0	0
0,1199999	7,78091	0,06000018	1,414711	0,05999994	26,87951
0,1800001	15,9155	0,1200001	4,59781	0,1199999	47,74649
3,97	139,349	0,1800001	11,31769	0,1799998	67,55244
4,03	138,6417	0,24	23,69641	0,24	89,48046
4,08	137,227	1,92	275,1613	0,9599998	247,2207
4,15	136,5196	1,99	282,2348	1,02	261,0142
4,21	134,7512	2,04	285,7716	1,92	433,6089
4,27	133,6902	2,88	284,7106	1,99	441,0361
4,86	132,6292	2,94	281,1738	2,04	445,9876
4,93	124,4946	3,01	277,2833	2,94	455,5369
4,98	123,7872	3,07	273,7466	3,01	452,7075
5,05	123,0798	3,97	238,0251	3,91	405,6683
5,11	122,3725	4,03	236,2567	3,97	404,6073
5,16	122,0188	4,08	234,842	4,03	402,4853
5,58	120,6041	4,15	233,0736	4,98	373,13
5,65	116,7136	5,11	211,1456	5,05	371,7153
6,01	116,36	5,16	209,7309	5,88	356,1535
6,06	114,5916	5,23	208,3162	5,95	355,7998
6,13	114,5916	5,28	208,3162	6,01	355,4461
6,18	114,2379	5,95	200,5353	6,91	344,1284
6,25	113,8842	6,01	199,8279	6,96	344,8358
6,91	113,1769	6,06	198,7669	7,03	342,0063
6,96	112,1158	6,91	189,9249	7,08	341,6527
7,03	111,4085	6,960001	189,9249	7,150001	340,5916
7,08	112,1158	7,03	188,8639	7,99	329,6276
8,05	112,1158	8,049999	188,1566	8,53	327,5056
8,11	112,1158	8,110001	189,2176	8,59	325,0298
8,83	112,4695	8,460001	187,4492	8,650001	325,0298
8,89	109,6401	8,889999	187,8029	8,71	325,0298
8,95	109,6401	8,950001	188,1566	8,95	322,5541
8,95	109,9938	9	188,1566	9	321,8467



Figures : Variation de la cohésion et l'angle de frottement de la marne d'Oued Nachou

ANNEXE C₁ : Essai limite d'atterberg

Echantillon: marne d'Oued Nachou +3% chaux

Limite de plasticité

	1 ^{er} Essai	2 ^{ème} Essai	3 ^{ème} Essai
N° de la tare	B ₆	13	N ₃
Poids total humide	9,80	9,83	9,81
Poids total sec	9,57	9,56	9,55
Poids de la tare	8,55	8,36	8,41
Poids de l'eau	0,23	0,27	0,26
Poids du sol sec	1,02	1,2	1,14
Teneur en eau (%)	22,55	22,50	22,81
Moyenne	22,55	22,50	22,81

LP = 22,62

Limite de liquidité

	1 ^{er} Essai		2 ^{ème} Essai		3 ^{ème} Essai éventuellement	
Nombre de coups	16		26		33	
N° de la tare	Y	L2	V6	W1	A1	H5
Poids total humide	16,82	16,39	13,56	13,68	13,82	13,08
Poids total sec	14,32	13,85	12,1	12,24	12,26	11,61
Poids de la tare	8,35	7,74	8,47	8,68	8,3	7,87
Poids de l'eau	2,5	2,54	1,46	1,44	1,56	1,47
Poids du sol sec	5,97	6,11	3,63	3,56	3,96	3,74
Teneur en eau (%)	41,876	41,571	40,22	40,449	39,394	39,305
Moyenne	41,72		40,33		39,35	

LL= 40,47

ANNEXE C₂ : Essai limite d'atterberg

Echantillon: marne d'Oued Nachou +6% chaux

Limite de plasticité

	1 ^{er} Essai	2 ^{ème} Essai	3 ^{ème} Essai
N° de la tare	H ₃	103	I
Poids total humide	10,39	9,30	10,09
Poids total sec	10,04	9,15	9,79
Poids de la tare	8,51	8,45	8,47
Poids de l'eau	0,35	0,15	0,30
Poids du sol sec	1,53	0,70	1,32
Teneur en eau (%)	22,88	21,43	22,73
Moyenne	22,88	21,43	22,73

LP = 22,35

Limite de liquidité

	1 ^{er} Essai		2 ^{ème} Essai		3 ^{ème} Essai éventuellement	
Nombre de coups	18		25		35	
N° de la tare	Y	L2	V6	W1	A1	H5
Poids total humide	14.26	14.66	14	16.11	13,08	11.23
Poids total sec	12.58	12,91	12.25	13,99	11,82	10.23
Poids de la tare	8,36	8,48	7,71	8,55	8,47	7,53
Poids de l'eau	1,68	1,75	1,75	2,12	1,26	1
Poids du sol sec	4,22	4,43	4,54	5,44	3,35	2,7
Teneur en eau (%)	39,81	39,503	38,546	38,971	37,612	37,037
Moyenne	39,66		38,76		37,32	

LL= 38,72

ANNEXE C₃ : Essai limite d'atterberg

Echantillon: marne d'Oued Nachou +9% chaux

Limite de plasticité

Limite de liquidité

	1 ^{er} Essai	2 ^{ème} Essai	3 ^{ème} Essai
N° de la tare	340	192	027
Poids total humide	8.13	8.49	8.81
Poids total sec	7.92	8.22	8.49
Poids de la tare	7.03	7.05	7.14
Poids de l'eau	0.21	0.27	0.32
Poids du sol sec	0.89	1.17	1.35
Teneur en eau (%)	23.60	23.08	23.70
Moyenne	23.60	23.08	23.70

LP = 23.46

	1 ^{er} Essai		2 ^{ème} Essai		3 ^{ème} Essai éventuellement	
Nombre de coups	16		25		34	
N° de la tare	0,47	355	289	253	139	244
Poids total humide	19,03	19,19	19,94	18,26	20,97	20,81
Poids total sec	17,65	17,72	18,22	17,01	19,01	18,95
Poids de la tare	14,07	13,93	13,67	13,67	13,68	13,92
Poids de l'eau	1,38	1,47	1,72	1,25	1,96	1,86
Poids du sol sec	3,58	3,79	4,55	3,34	5,33	5,03
Teneur en eau (%)	38,547	38,786	37,802	37,425	36,773	36,978
Moyenne	38,67		37,61		36,88	

LL= 37,65

ANNEXE C₄ : Essai limite d'atterberg

Echantillon: marne d'Oued Nachou +12% chaux

Limite de plasticité

	1 ^{er} Essai	2 ^{ème} Essai	3 ^{ème} Essai
N° de la tare	277	280	108
Poids total humide	8.01	7.70	8.02
Poids total sec	7.84	7.53	7.83
Poids de la tare	7.08	6.77	7.03
Poids de l'eau	0.17	0.17	0.19
Poids du sol sec	0.76	0.76	0.80
Teneur en eau (%)	22.37	22.37	23.75
Moyenne	22.37	22.37	23.75

LP = 22.83

Limite de liquidité

	1 ^{er} Essai		2 ^{ème} Essai		3 ^{ème} Essai éventuellement	
Nombre de coups	18		22		30	
N° de la tare	310	262	207	305	124	128
Poids total humide	20,31	18,85	20,72	20,48	20,86	22,23
Poids total sec	18,57	17,52	18,94	18,66	19,05	20,03
Poids de la tare	13,85	13,86	13,93	13,57	13,81	13,72
Poids de l'eau	1,74	1,33	1,78	1,82	1,81	2,2
Poids du sol sec	4,72	3,66	5,01	5,09	5,24	6,31
Teneur en eau (%)	36,864	36,339	35,529	35,756	34,542	34,865
Moyenne	36,60		35,64		34,70	

LL= 35,54

ANNEXE C₅ : Essai Proctor modifié

Echantillon: marne d'Oued Nachou +3% chaux

Poids d'eau ajoutée :	10%	12%	14%			
Poids total humide :	3666	3790	3792			
Poids du moule :	1717	1793	1793			
Poids du sol humide :	1949	1997	1999			
Poids du sol sec :	1774	1784	1761			
Volume du moule :	955	955	955			
Densité sèche :	1.86	1.87	1.84			
N° de la tare :	S1	N4	XXL	ZT	569	F19
Poids total humid :	59.39	62.13	65.61	66.32	72.23	79.37
Poids total sec :	55.44	58.24	60.51	61.21	65.84	72.13
Poids de la tare :	15.45	18.84	18.21	18.11	18.73	18.36
Poids de l'eau :	3.95	3.89	5.1	5.11	6.39	7.24
Poids du sol sec :	39.99	39.4	42.3	43.1	47.11	53.77
Teneur en eau :	9.88	9.87	12.06	11.86	13.56	13.46
Moyenne :	9.88	11.96	13.51			

ANNEX C₆ : Essai Proctor modifié

Echantillon: marne d'Oued Nachou +6% chaux

Poids d'eau ajoutée :	14%		16%		18%	
Poids total humide :	3719		3845		3822	
Poids du moule :	1717		1793		17.93	
Poids du sol humide :	2002		1052		2029	
Poids du sol sec :	1774		1789		1738	
Volume du moule :	955		955		955	
Densité sèche :	1.86		1.87		1.82	
N° de la tare :	S1	N4	XXL	ZT	569	F19
Poids total humid :	87.66	101.93	78.36	63.11	66.67	77.31
Poids total sec :	79.75	92.46	70.67	57.36	59.76	68.81
Poids de la tare :	18	18.8	18.4	18.2	18.57	17.83
Poids de l'eau :	7.91	9.47	7.69	5.75	6.91	8.5
Poids du sol sec :	61.75	73.66	52.27	39.16	41.19	50.98
Teneur en eau :	12.81	12.86	14.71	14.68	16.78	16.67
Moyenne :	12.83		14.70		16.72	

ANNEXE C₇ : Essai Proctor modifié

Echantillon: marne d'Oued Nachou +9% chaux

Poids d'eau ajoutée :	14%		16%		18%		20%	
Poids total humide :	3719		3798		3728		3736	
Poids du moule :	1793		1793		1717		1717	
Poids du sol humide :	1926		2005		2011		2019	
Poids du sol sec :	1700		1741		1717		1689	
Volume du moule :	955		955		955		955	
Densité sèche :	1.78		1.82		1.80		1.77	
N° de la tare :	XXL	S1	W300	W4	K7	FX	E10	569
Poids total humid :	74.66	71.05	76.72	78.55	115.67	109.01	60.97	67.74
Poids total sec :	68.26	64.73	69.11	70.52	101.22	95.86	53.52	59.94
Poids de la tare :	18.62	18.65	18.46	18.23	18.02	18.12	15.45	20.09
Poids de l'eau :	6.4	6.32	7.61	8.03	14.45	13.15	7.45	7.8
Poids du sol sec :	49.64	46.08	50.65	52.29	83.2	77.74	38.07	39.85
Teneur en eau :	12.89	13.72	15.02	15.36	17.37	16.92	19.57	19.57
Moyenne :	13.30		15.19		17.14		19.57	

ANNEXE C₈ : Essai Proctor modifié

Echantillon: marne d'Oued Nachou +12% chaux

Poids d'eau ajoutée :	14%		16%		18%		20%	
Poids total humide :	3695		3728		3725		3780	
Poids du moule :	1793		1793		1717		1793	
Poids du sol humide :	1902		1935		2008		1987	
Poids du sol sec :	1691		1696		1712		1683	
Volume du moule :	955		955		955		955	
Densité sèche :	1.77		1.78		1.79		1.76	
N° de la tare :	S16	569	ZT	F19	E10	569	S16	548
Poids total humid :	85.59	78.26	68.11	86.37	63.53	76.51	99.16	93.57
Poids total sec :	78.27	71.8	60.1	61.2	59.4	67.25	87.14	82.22
Poids de la tare :	19.55	20.1	18.78	18.38	15.45	20.1	19.55	18.84
Poids de l'eau :	7.32	6.46	8.01	25.17	4.13	9.26	12.02	11.35
Poids du sol sec :	58.72	51.7	41.32	42.82	43.95	47.15	67.59	63.38
Teneur en eau :	12.47	12.50	14.23	13.95	17.60	16.95	18.20	17.91
Moyenne :	12.48		14.09		17.28		18.05	

ANNEXE C₉ : Essai CBR immédiat
Echantillon: marne d'Oued Nachou +3% chaux
I-État initial de l'échantillon

Teneur en eau de compactage W_0 (%)			Densité sèche γ_d (t/m ³)	
T° de séchage	48h		P. total humide (g)	8043
N° de la tare (g)	551	S0	P. du moule (g)	3656
P. total humide (g)	85.71	88.09	P. du sol humide (g)	4387
P. total sec (g)	17.83	88.09	Teneur en eau W_0 (%)	11.46
P. de la tare (g)	17.83	18.26	P. du sol sec (g)	3946.56
P. de l'eau (g)	7.7	7.67	Volume du moule (cm ³)	2104
P. du sol sec (g)	67.88	69.83	Densité sèche γ_d : 1.87	
Teneur en eau W_0	11.34	10.98		
Moyenne	11.16			

temps	Enfoncement (mm)	Fonce totale (kgf)		pression (kgf/cm ²)
		Lecture	Valeur	
0-30	0,625	1,398	142,596	7,266
1-00	1,250	4,297	438,294	22,333
1 40	2,000	8,702	887,604	45,228
2-00	2,500	10,532	1074,26	54,740
4-00	5,000	17,243	1758,79	89,620
6-00	7,500	21,749	2218,4	113,039
8-00	10,000	25,895	2641,29	134,588
10-00	12,500	29,414	3000,23	152,878

Calculs de l'indice portant

$$A_{2,5 \text{ mm}} : p(2,5)/0,70 = 78,20$$

$$A_{5 \text{ mm}} : p(5)/1,05 = 85,35$$

ANNEXE C₁₀ : Essai CBR imbibé

Echantillon: marne d'Oued Nachou +3% chaux

II-État final de l'échantillon après imbibition

Teneur en eau après immersion W_f (%)		Poids approximatif du sol imbibé (g)	
N° de la tare	RM	P. total après imbibition	10443
P. total humide	4756.9	P. total avant imbibition	10260
P. total sec	4273.7	P. de l'eau absorbée	183
P. de la tare	240	Différence de teneur en eau	0.81
P. de l'eau	483.2	P. du sol imbibé	4540
P. du sol sec	4033.7		
Teneur en eau W_f	11.97		
Moyenne	11.97%	Densité sèche γ_d :	1.91(t/m³)

temps	Enfoncement (mm)	Fonce totale (kgf)		pression (kgf/cm ²)
		Lecture	Valeur	
0-30	0,625	1,317	134,334	6,845
1-00	1,250	3,637	370,974	18,903
1 40	2,000	7,058	719,916	36,684
2-00	2,500	8,432	860,064	43,825
4-00	5,000	12,23	1247,46	63,565
6-00	7,500	13,307	1357,31	69,162
8-00	10,000	14,351	1463,8	74,589
10-00	12,500	15,469	1577,84	80,399

Calculs de l'indice portant

$$A_{2,5 \text{ mm}} : p(2,5)/0,70 = 60,54$$

$$A_{5 \text{ mm}} : p(5)/1,05 = 62,61$$

ANNEXE C₁₁ : Essai CBR immédiat

Echantillon: marne d'Oued Nachou +6% chaux

I-État initial de l'échantillon

Teneur en eau de compactage W ₀ (%)			Densité sèche γ_d (t/m ³)	
T° de séchage	48h		P. total humide (g)	8169
N° de la tare (g)	R9	15	P. du moule (g)	3656
P. total humide (g)	90.54	94.80	P. du sol humide (g)	4513
P. total sec (g)	82.37	86.16	Teneur en eau W ₀ (%)	12.71
P. de la tare (g)	18.21	18.10	P. du sol sec (g)	3243.72
P. de l'eau (g)	8.17	8.64	Volume du moule (cm ³)	2104
P. du sol sec (g)	64.16	68.06	Densité sèche γ_d : 1.87	
Teneur en eau W ₀	12.73	12.69		
Moyenne	12.71			

temps	Enfoncement (mm)	Fonce totale (kgf)		pression (kgf/cm ²)
		Lecture	Valeur	
0-30	0,625	1,78	181,56	9,251
1-00	1,250	4,75	484,5	24,688
1 40	2,000	8,813	898,926	45,805
2-00	2,500	10,57	1078,14	54,937
4-00	5,000	17,977	1833,65	93,435
6-00	7,500	23,649	2412,2	122,915
8-00	10,000	28,367	2893,43	147,436
10-00	12,500	32,594	3324,59	169,406

Calculs de l'indice portant

$$A_{2,5 \text{ mm}} : p(2,5)/0,70 = 78,48$$

$$A_{5 \text{ mm}} : p(5)/1,05 = 88,99$$

ANNEXE C₁₂ : Essai CBR imbibé

Echantillon: marne d'Oued Nachou +6% chaux

II - État final de l'échantillon après imbibition

Teneur en eau après immersion W_f (%)		Poids approximatif du sol imbibé (g)	
N° de la tare	RM	P. total après imbibition	10199
P. total humide	4691	P. total avant imbibition	10064
P. total sec	4148.1	P. de l'eau absorbée	135
P. de la tare	226	Différence de teneur en eau	1.2
P. de l'eau	545.9	P. du sol imbibé	4489
P. du sol sec	3922.1		
Teneur en eau W_f	13.91		
Moyenne	13.91%	Densité sèche γ_d :	1.86 (t/m³)

temps	Enfoncement (mm)	Fonce totale (kgf)		pression (kgf/cm ²)
		Lecture	Valeur	
0-30	0,625	1,584	161,568	8,233
1-00	1,250	3,794	386,988	19,719
1 40	2,000	6,677	681,054	34,703
2-00	2,500	7,914	807,228	41,133
4-00	5,000	12,685	1293,87	65,930
6-00	7,500	15,03	1533,06	78,118
8-00	10,000	16,577	1690,85	86,158
10-00	12,500	17,771	1812,64	92,364

Calculs de l'indice portant

$$A \text{ 2,5 mm : } p(2,5)/0,70 = 58,76$$

$$A \text{ 5 mm : } p(5)/1,05 = 62,79$$

ANNEXE C₁₃ : Essai CBR immédiat

Echantillon: marne d'Oued Nachou +9% chaux

I-État initial de l'échantillon

Teneur en eau de compactage W_0 (%)			Densité sèche $\gamma_d(t/m^3)$	
T° de séchage	48h		P. total humide (g)	8267
N° de la tare (g)	E7	539	P. du moule (g)	3830
P. total humide (g)	89.12	87.77	P. du sol humide (g)	4437
P. total sec (g)	80.44	79.17	Teneur en eau W_0 (%)	14.04
P. de la tare (g)	18.64	17.96	P. du sol sec (g)	3890.74
P. de l'eau (g)	8.68	8.60	Volume du moule(cm^3)	2104
P. du sol sec (g)	61.8	61.21	Densité sèche γ_d : 1.81	
Teneur en eau W_0	14.04	14.05		
Moyenne	14.04			

temps	Enfoncement (mm)	Fonce totale (kgf)		pression (kgf/cm ²)
		Lecture	Valeur	
0-30	0,625	2,584	263,568	13,430
1-00	1,250	4,593	468,486	23,872
1 40	2,000	6,808	694,416	35,384
2-00	2,500	7,74	789,48	40,228
4-00	5,000	11,668	1416,78	72,193
6-00	7,500	16,557	1688,81	86,054
8-00	10,000	18,8	1917,6	97,712
10-00	12,500	21,254	2167,91	110,467

Calculs de l'indice portant

$$A \ 2,5 \text{ mm} : p(2,5)/0,70 = 57.47$$

$$A \ 5 \text{ mm} : p(5)/1,05 = 57.76$$

ANNEXE C₁₄ : Essai CBR imbibé

Echantillon: marne d'Oued Nachou +9% chaux

II- État final de l'échantillon après imbibition -

Teneur en eau après immersion W_f (%)		Poids approximatif du sol imbibé (g)	
N° de la tare	RM	P. total après imbibition	10269
P. total humide	4813.06	P. total avant imbibition	10188
P. total sec	4185.7	P. de l'eau absorbée	81
P. de la tare	258.9	Différence de teneur en eau	1.26
P. de l'eau	624.36	P. du sol imbibé	4536
P. du sol sec	3926.8		
Teneur en eau W_f	15.90		
Moyenne	15.90%	Densité sèche γ_d :	1.86 (t/m³)

temps	Enfoncement (mm)	Fonce totale (kgf)		pression (kgf/cm ²)
		Lecture	Valeur	
0-30	0,625	1,586	161,772	8,243
1-00	1,250	3,496	356,592	18,170
1 40	2,000	6,224	634,848	32,349
2-00	2,500	7,115	725,73	36,980
4-00	5,000	10,88	1109,76	56,548
6-00	7,500	15,005	1530,51	77,988
8-00	10,000	17	1734	88,357
10-00	12,500	18,811	1918,72	97,769

Calculs de l'indice portant

$$A_{2,5 \text{ mm}} : p(2,5)/0,70 = 52,83$$

$$A_{5 \text{ mm}} : p(5)/1,05 = 53,86$$

ANNEXE C₁₅ : Essai CBR immédiat

Echantillon: marne d'Oued Nachou +12% chaux

I-État initial de l'échantillon

Teneur en eau de compactage W_0 (%)			Densité sèche γ_d (t/m ³)	
T° de séchage	48h		P. total humide (g)	7815
N° de la tare (g)	F10	I29	P. du moule (g)	3656
P. total humide (g)	175.68	171.65	P. du sol humide (g)	4159
P. total sec (g)	160.15	156.66	Teneur en eau W_0 (%)	10.92
P. de la tare (g)	18.64	18.79	P. du sol sec (g)	3749.55
P. de l'eau (g)	15.53	14.99	Volume du moule (cm ³)	2104
P. du sol sec (g)	141.51	137.87	Densité sèche γ_d : 1.78	
Teneur en eau W_0	10.97	10.87		
Moyenne	10.92			

temps	Enfoncement (mm)	Fonce totale (kgf)		pression (kgf/cm ²)
		Lecture	Valeur	
0-30	0,625	1,768	180,336	9,189
1-00	1,250	4,207	429,114	21,866
1 40	2,000	6,124	624,648	31,829
2-00	2,500	7,003	714,306	36,398
4-00	5,000	11,42	1164,84	59,355
6-00	7,500	17,541	1789,18	91,169
8-00	10,000	20,64	2105,28	107,275
10-00	12,500	24,03	2451,06	124,895

Calculs de l'indice portant

A 2,5 mm : $p(2,5)/0,70 = 52,00$

A 5 mm : $p(5)/1,05 = 56.53$

ANNEXE C₁₆ : Essai CBR imbibé

Echantillon: marne d'Oued Nachou +12% chaux

II- État final de l'échantillon après imbibition

Teneur en eau après immersion W_f (%)		Poids approximatif du sol imbibé (g)	
N° de la tare	RM	P. total après imbibition	10195
P. total humide	4425.3	P. total avant imbibition	9822
P. total sec	3852.7	P. de l'eau absorbée	373
P. de la tare	228.8	Différence de teneur en eau	4.88
P. de l'eau	572.6	p. du sol imbibé	4224
P. du sol sec	3623.9		
Teneur en eau W_f	15.80		
Moyenne	15.80%	Densité sèche γ_d :	1.73 (t/m³)

temps	Enfoncement (mm)	Fonce totale (kgf)		pression (kgf/cm ²)
		Lecture	Valeur	
0-30	0,625	1,678	171,156	8,721
1-00	1,250	2,46	250,92	12,786
1 40	2,000	3,144	320,688	16,341
2-00	2,500	3,393	346,086	17,635
4-00	5,000	4,553	464,406	23,664
6-00	7,500	5,551	566,202	28,851
8-00	10,000	6,421	654,942	33,373
10-00	12,500	7,252	739,704	37,692

Calculs de l'indice portant

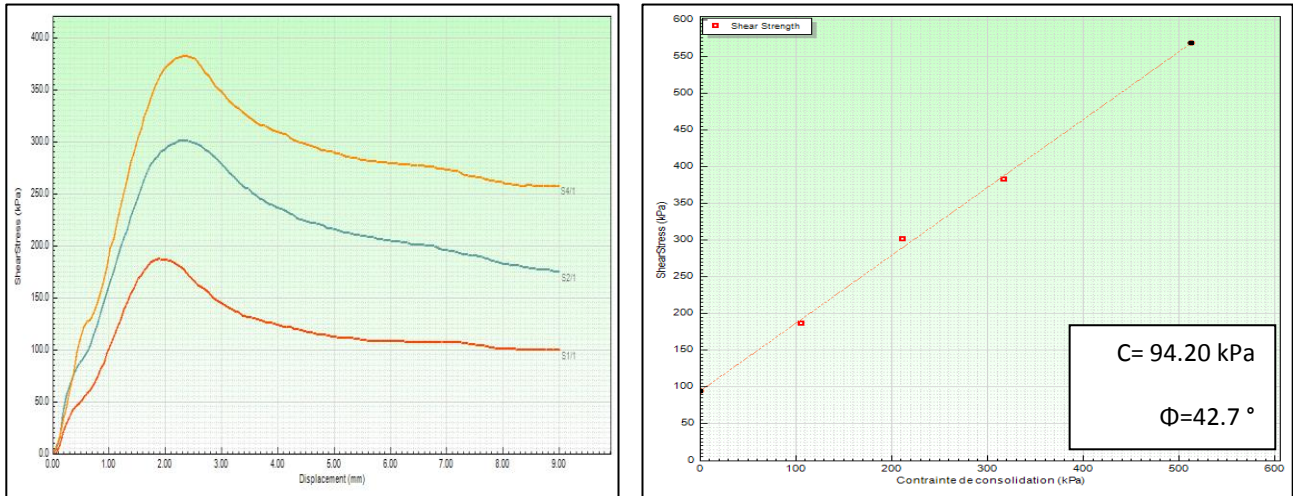
$$A_{2,5 \text{ mm}} : p(2,5)/0,70 = 22,54$$

$$A_{5 \text{ mm}} : p(5)/1,05 = 25,19$$

ANNEXE C₁₇ : Essai cisaillement direct

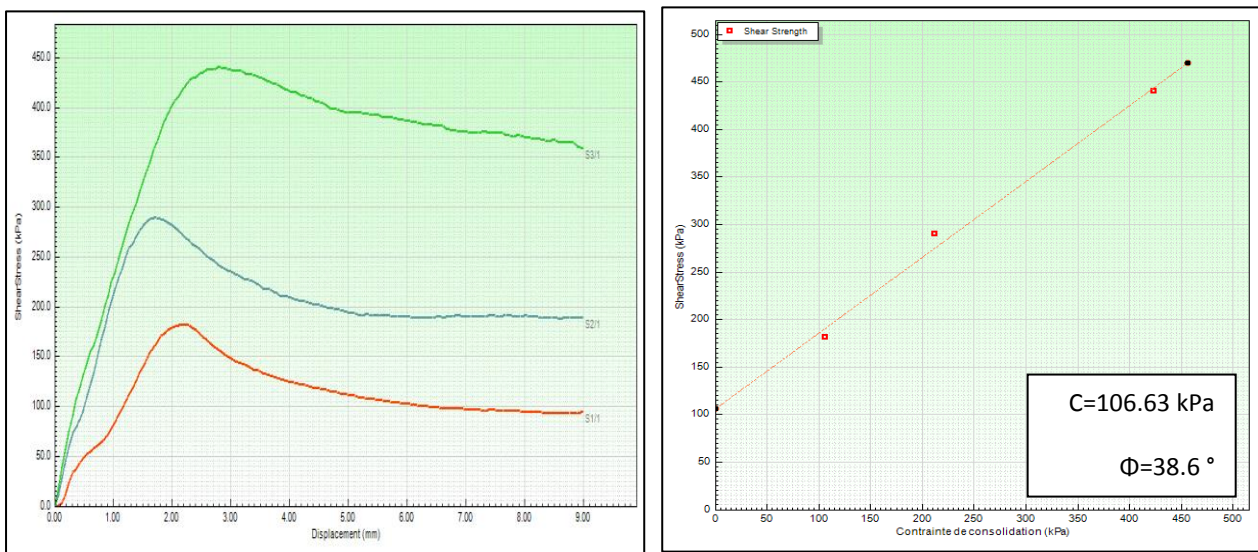
Variation de la cohésion et l'angle de frottement de la marne d'Oued Nachou :

Echantillon: marne d'Oued Nachou +3% chaux



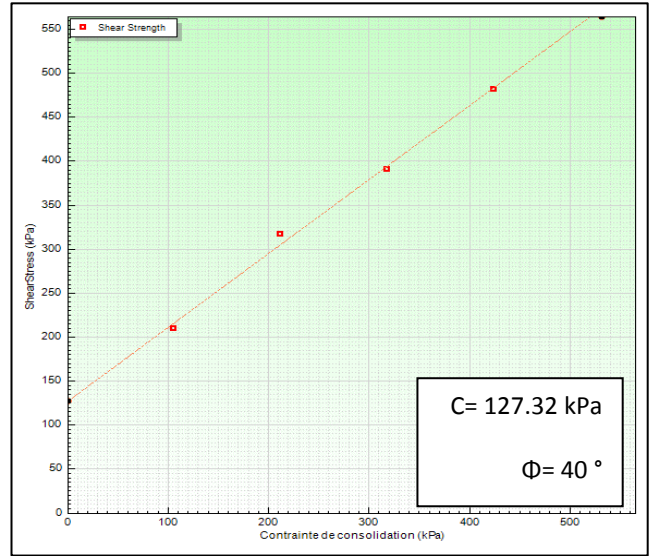
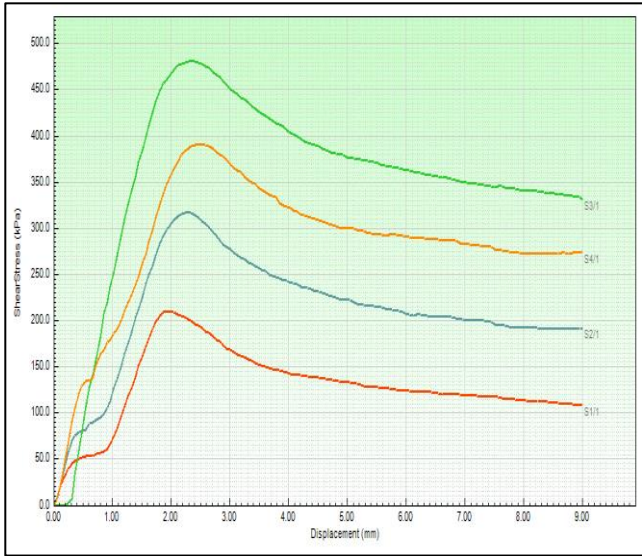
Figures : Influence de 3% de chaux sur la cohésion et l'angle de frottement.

Echantillon : Marne d'Oued Nachou +6% chaux



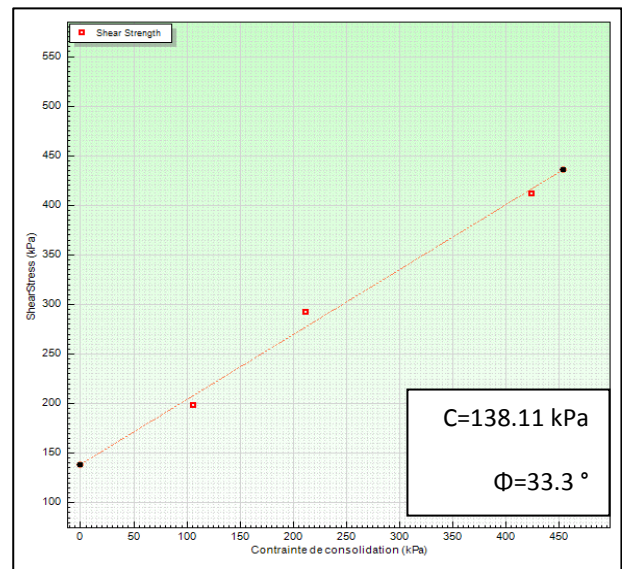
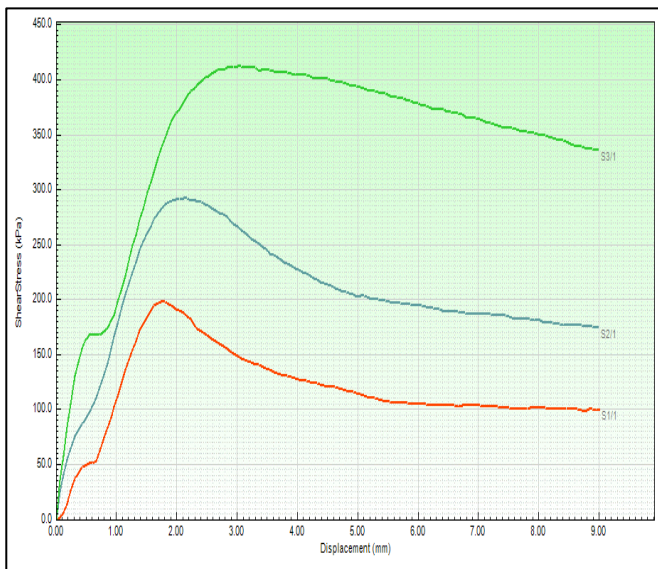
Figures : Influence de 6% de chaux sur la cohésion et l'angle de frottement.

Echantillon : Marne d'Oued Nachou +9% chaux



Figures : Influence de 9% de chaux sur la cohésion et l'angle de frottement.

Echantillon : Marne d'Oued Nachou +12% chaux



Figures : Influence de 12% de chaux sur la cohésion et l'angle de frottement

