

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de l'Enseignement Supérieur Et de La Recherche Scientifique



Université de Ghardaïa

N° d'ordre :

N° de série :

Faculté des Sciences et Technologies
Département hydraulique et Génie civil

Mémoire présenté en vue de l'obtention du diplôme de

MASTER

Domaine : *Sciences et Technologies*

Filière : Génie civil

Spécialité : *Structures*

Par : Ali Dahou

Thème

**Comportement mécanique de la marne de la région de Ghardaïa
sans et avec le traitement au ciment**

Soutenu publiquement le 28/10/2020

Devant les jurys :

Aziz Mohamed nadjib

MAA

Univ.Ghardaïa

Amieur Abdenacer

Magistère

LTPS

Daheur Elhadj guesmia

MCB

Univ.Ghardaïa

Année universitaire 2019/2020

DEDICACES

Au sens de gratitude et d'amour je dédie ce travail à Dieu tout puissant Allah qui m'a donné la volonté et la puissance pour réaliser cette étude dont je souhaiterai qu'elle sera acceptée par lui sobhanaho et qu'il m'aide à continuer incha Allah.

A ma famille :

Avec une profonde reconnaissance et toute ma gratitude, grâce et remerciement vont aussi à

MES PARENTS pour ses tendresses, amours, ses encouragements, et surtout de tous ses sacrifices, pour avoir sacrifié ses plus belles années pour moi pour que je puisse mon arriver là où je suis, c'est grâce à eux; et aussi pour mes frères, ainsi à ma famille Dahou et mellakh que je n'oublierai jamais ses encouragements et ses conseils aussi.

A mes amis :

A tous mes meilleurs amis; ainsi à toute mes amis de promo 2019/2020 option structure et à tous les autre qui étaient là pour moi et à tous les autres que je les connais bien.

Toute la promotion : M2-GC2019/2020. Tous ce qui m'aime et que j'aime.

Ali



REMERCIEMENT

Je remercie en particulier avant tout propos le bon « Dieu » le tout puissant qui m'a donné sagesse et santé pour faire ce modeste travail.

Je tiens à exprimer ma reconnaissance et ma gratitude à mon encadrant Monsieur: Daheur Elhadj Guesmia pour la bienveillance avec laquelle il a guidé mon travail pour son soutien, ainsi que pour les précieux conseils qu'ils m'a prodigués. Qu'il trouve ici l'expression de ma sincère gratitude.

Je tiens à exprimer mes vifs remerciements aux membres de jury qui ont accepté de juger mon travail.

Je voudrais également remercier l'ensemble de personnel du L.T.P.Sud pour leur soutien durant l'élaboration de ce travail.

Mes remerciements adressés également au personnel de CTC de Ghardaïa.

Mes remerciements à tous les professeurs de genie civile et le Chef du Département « génie civile et hydraulique » .

J'associe à ces remerciements toutes les personnes qui; directement ou indirectement; ont contribué à la réalisation de ce travail.

Enfin, j'adresse un très grand merci à mes amis, qui m'ont toujours soutenus et encouragés.

Ali

Résumé :

Notre travail s'insère dans l'optique de la valorisation des matériaux locaux en vue de répondre aux besoins des régions pauvres en matériaux nobles. En premier lieu on présente une étude d'identification géotechnique d'une marne de la région de Ghardaïa (Oued Nechou). Puis on va essayer de voir l'effet de traitement, par le ciment avec des pourcentages de 2% et 4%, 6% et 8%, sur les caractéristiques géotechnique (plasticité, les paramètres de Proctor modifier et la portance CBR), et sur le comportement mécanique de notre échantillon (résistance à la compression) et sur leur sensibilité à l'eau.

Mots clés : Marne, Matériaux locaux, Traitement au ciment, Chaussées sahariennes,

الملخص

هذا العمل يندرج في اطار تثمين المواد المحلية للنظر في احتياجات المناطق التي تفتقر منها، أولا قدمنا دراسة جيوتقنية حول المارن في غارداية خاصة في منطقة واد نشو ثم سوف نرى تأثير خلط هذه المادة بالإسمنت بنسب (2%، 4%، 6%، 8%) على الخصائص الجيوتقنية (اللينة، اعدادات البروكتور وضغط السبيار) وعلى السلوك الميكانيكي للعينة (مقاومة الضغط) وعلى حساسياتها للماء.

الكلمات المفتاحية مارن، مواد محلية، خلط بالإسمنت، ارضية صحراوية.

Abstract :

This work is part of an appreciation of local materials to look at the needs of the areas that lack it.

First , we presented a geotechnical study about marne in Ghardaïa especially in the Oued Necho region then we will see the effect of mixing this substance with cement with percentage of 2%,4%,6% and 8% on the characteristic's of geotechnology (ductility, proctor setting, and the CBR augmentation) and on the the mechanical behavior of the sample pressure resistance and its sensitivity to water .

Key word: Marne, local material, mixed cement, desert floor.

Dédicace	I
Remerciement	II
RESUME	III
Tableau des matière	IV
Liste des tableaux	VI
Liste des figures	VII
Liste des photos	VIII
Liste des	IX
INTRODUCTION GENERALE	02
CHAPITRE I : Revue bibliographique sur les marne, chaussée et traitement ... 04	
I-1. INTRODUCTION	05
I-2 Définitions de marne	05
I-2-1 Commentaire	05
I-3 Structure de la route	07
I-4 Définition des chaussées	08
I-5 Les types de chaussées.....	08
I-6 Constitution d'une structure de chaussée	10
I-7. Réseau routier: type de trafic	11
I-8 Structure de la chaussée saharienne.....	11
I-9 Domaine d'application des chaussées saharienne	13
I-10 Définitions le traitement	14
I-11 Historique Traitement des sols aux liants hydrauliques.....	14
I-12 Avantages de la technique.....	14
I-12-1- Avantages techniques	14
I-12-2 Avantages économiques	14
I-12-3 Avantages écologiques et environnementaux.....	15
I-13. Notions générales à connaître pour pouvoir faire le traitement des sols (Cftr - info)	15
I-14. Matériels de traitement	15
I-15 Principales opérations de traitement.....	16
I-16 Objet du traitement aux hydrauliques.....	16
I-17 Effets des liants hydrauliques sur les sols	17
I-17-1 La chaux	17
I-17-2 Cas du ciment.....	17
I-17-3 Cas d'un traitement mixte.....	19
I-18 Techniques de réalisation des travaux de traitement.....	19
I-19 Conclusion.....	20
CHAPITRE II : Etude d'identification des sols étudier 22	
II-1 INTRODUCTION	23
II-2 Le site du prélèvement.....	23
II-3 Situation géographique de la région.....	24
II-4 Etude d'identification géotechnique	25
II-5. Analyse granulométrique	26
II-5-1. Analyse granulométrique par tamisage	26
II-5-2. analyse granulométrique par sédimentometrie	27

Tableau des matières

II-6 Qualité des fines	31
II-6-1 Les limites d'Atterberg	31
II-6-2 Essai d'équivalent de sable	35
II-6-3 Essai au bleu de méthylène.....	37
II-7. Essai Proctor modifié.....	38
II-8. Essais CBR.....	41
II-9. Résistance à la fragmentation mécanique (Essai Los Angeles).....	44
II-10. Essais compressions simple.....	46
II-11. Analyse chimique.....	49
II-12 CLASSIFICATION.....	51
II-12-1.Classification USCS.....	51
II-12-2.Classification GTR (cas des sols fins).....	51
II-13.Conclusion.....	52
CHAPITRE III: le traitement du mélange de marne avec le ciment.....	53
III- 1. Introduction	54
III-2 Présentation de liant utilisé.....	54
III-3 L'influence de traitement au ciment sur les limites d'Atterberg.....	55
III-4 l'influence de traitement au ciment sur les caractéristiques de compactage ...	56
III-5 Etude de le traitement au ciment sur la stabilité immédiate	57
III-6 L'influence de traitement au ciment sur la résistance à la compression	61
III-7 Conclusion	65
CONCLUSION GENERALE	67

Liste des tableaux

Numéro	titre	Page
Tableau I-1	Terminologie des roches sédimentaires de pole calcaire au pole argile.	05
Tableau II-1	Résultats récapitulatif de l'analyse granulométrique.	30
Tableau II-2	Valeur de limites d'Atterberg.	33
Tableau II-3	Classification en fonction de l'indice de plasticité d'après (Cornell, 1951.et J.M. TCHOUANINANA1999).	34
Tableau II-4	donne VB pour notre échantillon.	38
Tableau II-5	Classification des sols selon la valeur de Vb.	38
Tableau II-6	Caractéristiques optimales de Proctor modifié.	40
Tableau II-7	Caractéristiques de compactage pour quelques matériaux routiers (Gandil, 1988).	41
Tableau II-8	Valeurs des indices CBR.	44
Tableau II-9	Valeurs des coefficients de Los Angeles	46
Tableau II-10	Résultats de l'analyse chimique sommaire	50
Tableau II-11	Classification USCS des sols grenus (plus de 50 % d'éléments > 0,08 mm).	51
Tableau III-1	Valeur de limites d'Atterberg du marne Ouade Nechou avec et sans traitement au ciment.	55
Tableau III-2	Caractéristiques de compactage avant et après le traitement de la marne traitée avec le ciment.	57
Tableau III 3	Valeurs des indices portant avant et après le traitement de la marne traitée avec le ciment.	59
Tableau III-04	Degré de compactibilité et de traficabilité.	60

Liste des figures

numéro	titre	page
Figure I-1	Coupe d'une route d'après le GTR.	08
Figure I-2	les chaussées et les différents types des couches .	10
Figure I-3	Coupe transversale type d'une chaussée saharienne.	12
Figure III-1	Courbes granulométriques de tuf et de sable de dune par rapport : (a) fuseau saharien (Fenzy, 1966), (b) fuseau de tuf 1 (0/40) et (c) fuseau de tuf 2 (0/20) (CTTP, 2001).	29
Figure II-2	abaque de casagrade marne .	34
Figure II-3	Matériel nécessaire pour l'essai ES.	35
Figure II-4	courbe Proctor marne	41
Figure II- 5	Variation de la résistance à la compression en fonction de la compacité.	49
Figure II-6	Classification des sols fins selon GTR.	52
Figure III-1-	Abaque de casagrande.des mélanges marne et(2.4.6.8) % de ciment .	55
Figure III-2	les courbe Proctor modifié des mélanges marne et ciment	56
Figure III -3	Variation de la pression en fonction de son enfoncement (imbibé) pour la marne traitée au ciment	58
Figure III -4	Variation de la pression en fonction de son enfoncement (immédiat) pour la marne traitée au ciment .	58
Figure III -5	Variation de gonflement en fonction de temps.	59
Figure III-6	Gains de l'ICBR immédiat et imbibé de la marne traitée.	61
Figure III-7	Influence de la teneur en ciment sur la résistance à la Compression.	64
Figure III-8	Gains de résistance à la compression en fonction de la teneur en ciment.	64

Liste des photos

numéro	titre	page
Photo I- 1	traitement sur terrain	20
Photo II-1	Photo de Google Maps	23
Photo II-2	Photo Prise Sur Terrain .	24
Photo II-3	situations de la wilaya de GHARDAIA	25
Photo II-4	l'essai de sedimentometrique.	28
Photo II-5	siphonage et imbibitions de l'échantillons de limite d'Atterberg	32
Photo II-6	limite de liquidité.	32
Photo II-7	limite de plasticité	33
Photo II- 8	Essai de L'équivalent de sable	36
Photo II-9	principe et résultats d'Essai au bleu de méthylène	37
Photo II- 10	matériel Proctor modifié.	39
Photo II- 11	essai Proctor modifié.	40
Photo II-12	presse CBR.	42
Photo II-13	échantillon lors de poinçonnement	43
Photo II-14	séché échantillon à l'étuve.	43
Photo II-15	Essai de CBR imbibi	44
Photo II-16	essais de los Angeles	45
Photo II-17	Moules de confection.	46
Photo II-18	préparation de l'échantillon.	48
Photo II-19	écrasement des éprouvettes dans la presse CBR.	48
Photo II- 20	l'essai Analyse chimique.	50
Photo III- 1	Ciment R42.5	54
Photo III-2	Constatation sur le bord de la chaussée, en enlevant la couche d'enduit, que la couche de tuf est devenue très dur en surface (route Gallela-sedouikech en Tunisie).	62

C_c	: coefficient courbure.
C_u	: coefficient d'uniformité dit de Hazzen
ES	: Equivalent de sable.
CBR	: <i>Californian Bearing Ratio</i> : Indice Portant Californien.
ICBR_{imb}	: Indice CBR imbibé
ICBR_{imed}	: Indice CBR immédiat
IP	: Indice de plasticité.
LTPS	: Laboratoire des travaux publics du sud.
OPM	: Optimum Proctor modifié.
R_c	: Résistance à la compression simple.
VB	: Valeur au bleu de méthylène.
ω	: Teneur en eau exprimée en %.
ω_L	: Limite de liquidité.
ω_n	: Teneur en eau naturelle.
ω_{opm}	: Teneur en eau optimale Proctor modifié.
ω_p	: Limite de plasticité.
γ_{dmax}	: Densité sèche optimale de l'essai Proctor modifié.

INTRODUCTION GENERAL

L'infrastructure des routes constitue une partie très importante du patrimoine national d'un pays. C'est un facteur très important de développement économique et social ; entre les villes, les provinces, les pays et les continents.

Dans les régions aride et semi-aride, les matériaux les plus prisés pour la construction routière sont les tufs essentiellement calcaires, mais ces matériaux sont peu abondants. Leur utilisation est admise en Technique Routière Saharienne (TRS) à condition qu'ils remplissent un certain nombre de critères. La bonne tenue des routes construites à partir de ces matériaux est obtenue grâce aux conditions environnementales favorables (qualité des sols supports, conditions pluviométriques.), aux critères de choix des matériaux mis en œuvre, aux propriétés particulières des tufs (bonne cohésion inter granulaire après compactage et séchage) et au savoir-faire des techniciens de la route.

Aujourd'hui, avec l'augmentation du trafic et la raréfaction des tufs répondant aux exigences de la Technique Routières Saharienne, des insuffisances sont de plus en plus constatées dans le comportement des chaussées sahariennes, insuffisance souvent liée à la dégradation du matériau mis en œuvre. Donc une recherche d'un matériau alternative doit être nécessaire, pour éviter cette carence.

La wilaya de Ghardaïa spécialement la région d'Oued nechou contient plusieurs types de roches surtout les marnes argileuses (DOCUMENT CTCS).

La marne est une roche sédimentaire qui contient du carbonate de calcium (Ca CO_3) et de l'argile. On l'a défini comme un matériau de transition entre le calcaire et l'argile ; c'est une roche carbonatée contenant de 30 à 70% d'argile.

Notre recherche rentre dans l'optique d'une valorisation de ces matériaux locaux en vue d'intégration dans les corps de chaussées dans ces régions. Cette idée peut s'avérer intéressante, non seulement d'un point de vue économique mais également environnemental. Elle a pour but d'élargir la gamme des matériaux locaux qui se trouve en abondance couvrant une superficie très importante du Sahara algérien et aboutir au meilleur choix technico-économique d'un projet routier.

L'étude comporte en premier lieu une identification géotechnique de la marne de la région d'Oued Nechou, puis l'étude des effets de traitement de ce matériau avec le ciment sur les propriétés physiques et le comportement mécanique.

Le présent travail est divisé en deux parties. La première partie présente des généralités sur les marnes, la structure des différents types des chaussées et les effets de traitement des sols avec les liants hydrauliques.

La deuxième partie présente l'étude expérimentale qui s'est déroulée au Laboratoire des Travaux Publics du Sud (L.T.P.S).

Cette partie englobe deux chapitres. Dans le chapitre deux, l'étude d'identification géotechnique et minéralogique de la marne est entreprise.

Par la suite, dans le chapitre troisième, nous présentons les effets de traitement de la marne avec le ciment, les effets se voient sur les caractéristiques physiques et le comportement mécanique.

En fin on clôture par une conclusion générale, qui critique les principaux résultats trouvés avec une proposition des recommandations qui nous semblent utiles pour des éventuelles recherches futures portant sur les traitements de marne.

CHAPITRE I :
RECHERCHE
BIBLIOGRAPHIQUE

I-1 Introduction :

Les roches sont classiquement classées dans trois grandes catégories. Les roches magmatiques sont issues du magma, c'est-à-dire qu'elles sont formées en profondeur, là où la chaleur due à la radioactivité naturelle est importante. Les roches sédimentaires sont formées à partir de dépôts d'autres roches, mais aussi de composés organiques (non minéraux) ou encore à partir de réactions chimiques, et sont caractérisées par la formation de strates, et leur caractère parfois fossilifère. Enfin, les roches métamorphiques sont issues de la transformation de roches existantes sous l'effet de températures et/ou de pressions importantes.

Ces matériaux sont les plus employés dans la construction des assises des chaussées de routes. L'abondance de cette ressource naturelle, fait que leur utilisation comme matériau routier est devenue de plus en plus répandue.

I-2 Définitions de marne :

La marne c'est 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.....).

Tableau I -1 : Terminologie des roches sédimentaires de pôle calcaire au pôle argile.

Teneur en Calcaire (%)	100 – 95%	95 – 65 %	65 – 35 %	35 – 5 %	5 - 0 %
Roches	Calcaire	Calcaire Marneux	Marne	Argile Marneux	Argile

I-2-1Commentaire :

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.

Ces différents éléments responsables de la couleur et de l'aspect permettent de définir la marne rencontrée par une appellation. On parle ainsi, si l'on s'intéresse à la couleur :

- des marnes vertes.
- des marnes bleues.
- des marnes rouges.
- des marnes bariolées.

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

- de marnes dolomitiques.
- de marnes micacées.
- de marnes sableuses.
- de marnes glauconieuses.
- de marnes bitumineuses.
- de marnes gypseuses, etc.

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.

Comme les argiles, les marnes sont tendres, finement poreuses, friables quand elles sont sèches, plastiques 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. À 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, macros fossiles, etc.

Les marnes apparaissent constituées de trois phases : phase carbonatée, phase sableuse et 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'argiles 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.

I-3 Structure de la route :

L'établissement d'une route procède d'une succession d'étapes d'élaboration qui varient en fonction de la topographie et de la nature du sol et du sous-sol. Le Guide technique des Terrassements Routiers présente une coupe type d'une route sur la figure I-1. On distingue ainsi :

- Le corps de remblai qui est un ouvrage en terre construit pour modeler la topographie naturelle du terrain de manière à assurer la géométrie imposée à la plate-forme sur laquelle la chaussée sera construite.
- La couche de forme qui recouvre la partie supérieure du terrassement. Elle sert « à adapter les caractéristiques aléatoires et dispersées des matériaux en remblai ou en déblai du site, aux caractéristiques mécaniques, géométriques, hydrauliques et thermiques prises comme hypothèses dans la conception de la chaussée ». Le GTR précise les types de matériaux retenus (limoneux, rocheux, sableux, sous-produits industriels) et donne les caractéristiques indispensables à leur utilisation ainsi que les mesures à prendre pour y parvenir.
- La chaussée proprement dite qui se subdivise en plusieurs couches : fondation, base, liaison et roulement.

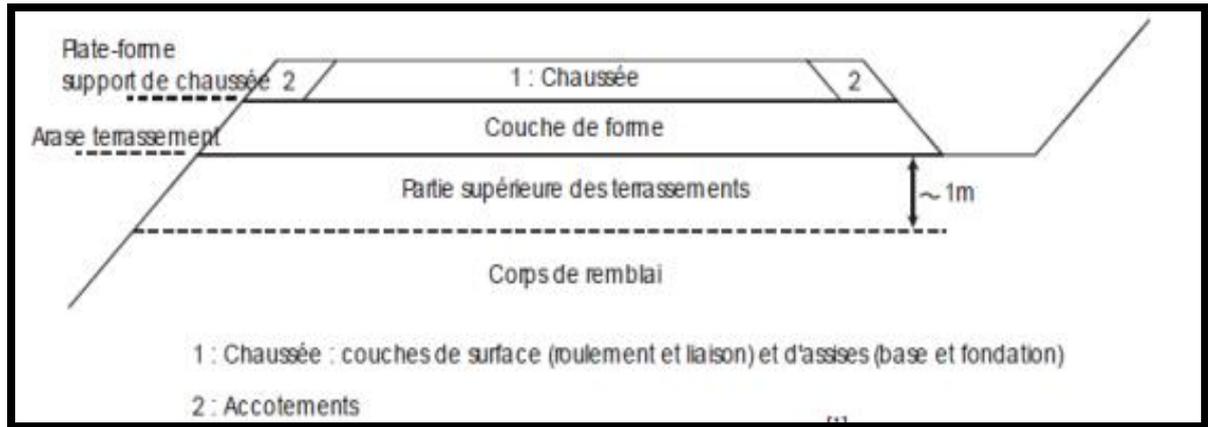


Figure I-1 : Coupe d'une route d'après le GTR

I-4 Définition des chaussées :

Les chaussées se présentent comme des structures multicouches mises en œuvre sur un ensemble appelé plate-forme support de chaussée constituée du sol terrassé (dit sol support) surmonté généralement d'une couche de forme.

I-5 Les types de chaussées

Il y a une grande diversité de structures de chaussée, que l'on classe dans les familles suivantes :

- souples,
- bitumineuses épaisses,
- à assise traitée aux liants hydrauliques,
- à structure mixte,
- à structure inverse,
- En béton de ciment.

Chaussées souples :

Ces structures comportent une couverture bitumineuse relativement mince (inférieure à 15 cm), parfois réduite à un enduit pour les chaussées à très faible trafic, reposant sur une ou plusieurs couches de matériaux granulaires non traités. L'épaisseur globale de la chaussée est généralement comprise entre 30 et 60 cm.

Chaussées bitumineuses épaisses :

Ces structures se composent d'une couche de roulement bitumineuse sur un corps de chaussée en matériaux traités aux liants hydrocarbonés, fait d'une ou deux couches (base et fondation). L'épaisseur des couches d'assise est le plus souvent comprise entre 15 et 40 cm.

Chaussées à assise traitée aux liants hydrauliques :

Ces structures sont qualifiées couramment de "semi-rigide ".Elles comportent une couche de surface bitumineuse sur une assise en matériaux traités aux liants hydrauliques disposés en une ou deux couches (base et fondation) dont l'épaisseur totale est de l'ordre de 20 à 50 cm .

Chaussées à structure mixte :

Ces structures comportent une couche de roulement et une couche de base en matériaux bitumineux (épaisseur de la base : 10 à 20 cm) sur une couche de fondation en matériaux traités aux liants hydrauliques (20 à 40 cm). Les structures qualifiées de mixtes sont telles que le rapport de l'épaisseur de matériaux bitumineux à l'épaisseur totale de chaussée soit de l'ordre de $\frac{1}{2}$.

Chaussées à structure inverse :

Ces structures sont formées de couches bitumineuses, d'une quinzaine de centimètres d'épaisseur totale, sur une couche en grave non traitée (d'environ 12 cm) reposant elle-même sur une couche de fondation en matériaux traités aux liants hydrauliques. L'épaisseur totale atteint 60 à 80 cm.

Chaussées en béton de ciment :

Ces structures comportent une couche de béton de ciment de 20 à 28 cm d'épaisseur éventuellement recouverte d'une couche de roulement mince en matériaux bitumineux. La couche de béton repose soit sur une couche de fondation (qui peut être en matériaux traités aux liants hydrauliques, en béton de ciment, ou drainante non traitée), soit directement sur le support de chaussée avec, dans ce cas, interposition fréquente d'une couche bitumineuse. La dalle de béton peut être continue avec un renforcement longitudinal (béton armé continu), ou discontinue avec ou sans éléments de liaison aux joints.

I-6 Constitution d'une structure de chaussée :

Une chaussée routière se présente comme une structure composite réalisée par empilements successifs de couches de matériaux granulaires, le tout reposant sur un sol support. Vis-à-vis de la description adoptée par la méthode de dimensionnement française, établie par le Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (LCPC) et le Service d'Etudes Techniques des Routes et Autoroutes (SETRA), on associe à chacune des couches une fonction.

Le sol support est généralement surmonté d'une couche de forme pour former un ensemble appelé plate-forme support de chaussée. Cette dernière sert, comme son nom l'indique, de support au corps de chaussée. Pendant la phase de travaux, la couche de forme a pour rôle d'assurer une qualité de nivellement permettant la circulation des engins pour la réalisation du corps de chaussée. Vis-à-vis du fonctionnement mécanique de la chaussée, la couche de forme permet d'augmenter la capacité portante de la plate-forme support de chaussée.

Les couches d'assise sont généralement constituées d'une couche de fondation surmontée d'une couche de base. Elles apportent à la structure de chaussée l'essentiel de sa rigidité et répartissent (par diffusion latérale) les sollicitations, induites par le trafic, sur la plate-forme support afin de maintenir les déformations à ce niveau dans les limites admissibles.

La couche de surface est formée d'une couche de roulement surmontant éventuellement une couche de liaison intermédiaire. La couche de roulement assure la fonction d'étanchéité des couches d'assise vis-à-vis des infiltrations d'eau et des sels de déverglaçage, et à travers ses caractéristiques de surface, elle garantit la sécurité et le confort des usagers.

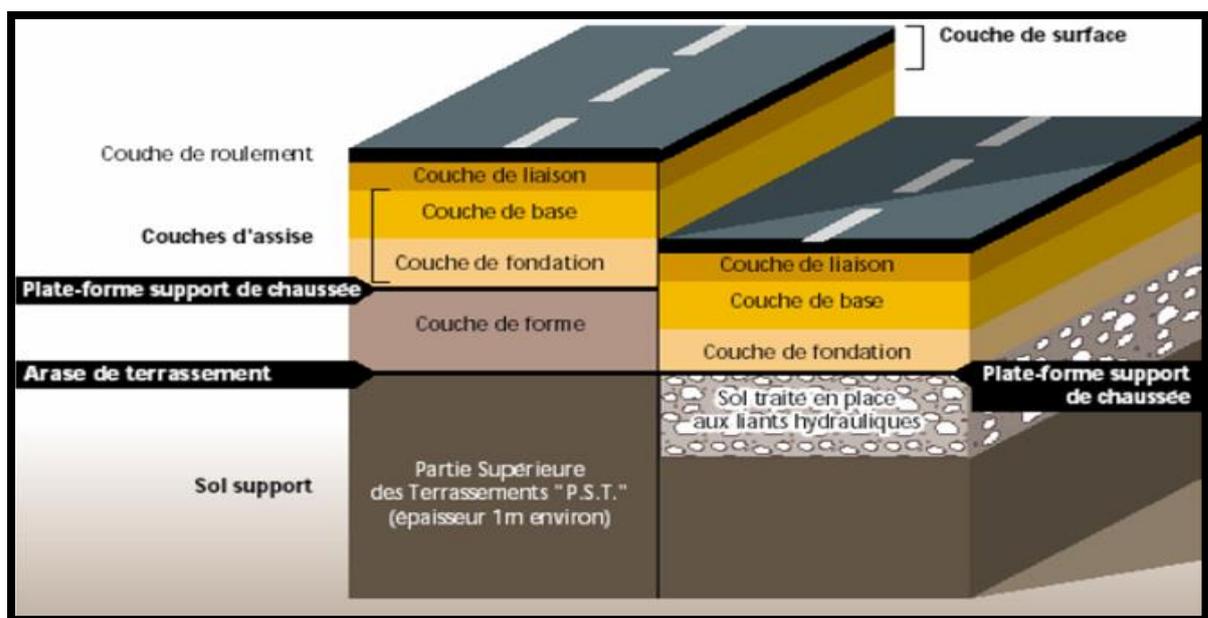


Figure I- 2: les chaussées et les différents types des couches.

I-7. Réseau routier: type de trafic :

Selon l'importance du trafic et les zones desservies, les axes routiers ont été classés en trois catégories ou réseaux :

- ✚ réseau primaire: route inter-état ou route reliée au corridor transafricain (trafic transfrontalier), route nationale (axe reliant les principales métropoles du pays).
- ✚ réseau secondaire : routes départementales (routes inter-régionales) et voiries urbaines.
- ✚ réseau rural: axes entre villages ou liaison avec une route secondaire ou connexion à l'axe primaire.

Par ailleurs, les chaussées sont exposées à divers autres facteurs agressifs représentés par :

- les conditions climatiques (pluie et température).
- les normes de constructions et de gestion restrictives.
- la faiblesse des ressources allouées pour l'entretien routier et le non-respect des calendriers de maintenance ;
- l'insuffisance d'expertise dans le dimensionnement structural des chaussées, le vieillissement et le non-renouvellement des équipements de laboratoires et de terrain ainsi que l'absence des statiques fiables et actualisées sur la charge et le volume du trafic.

I-8 Structure de la chaussée saharienne:

Selon la bibliographie consultée (Fenzy, 1970) ; (Inal, 1980) ; (Boularek, 1989) ; (Benmoussa, 1994), les routes sont implantées en remblai de faible hauteur, cette disposition facilite le drainage et modifie favorablement la teneur en eau d'équilibre sous chaussée et les déblais sont évités car ils favorisent l'ensablement des chaussées.

Le principe d'une assise unique est souvent retenu ; son épaisseur varie entre 15 cm et 30 cm. Elle est réalisée, à chaque fois que c'est possible avec un matériau identique soumis à des normes strictes découlant de la TRS (technique routière saharienne). Lorsque les matériaux performants ne sont pas disponibles en quantité suffisante, les 10 cm inférieurs - jouant le rôle de couche de fondation - sont alors réalisés avec un matériau ayant des caractéristiques moins bonnes ; la structure de chaussée se présente alors selon le schéma de la typique représenté par la figure I-3

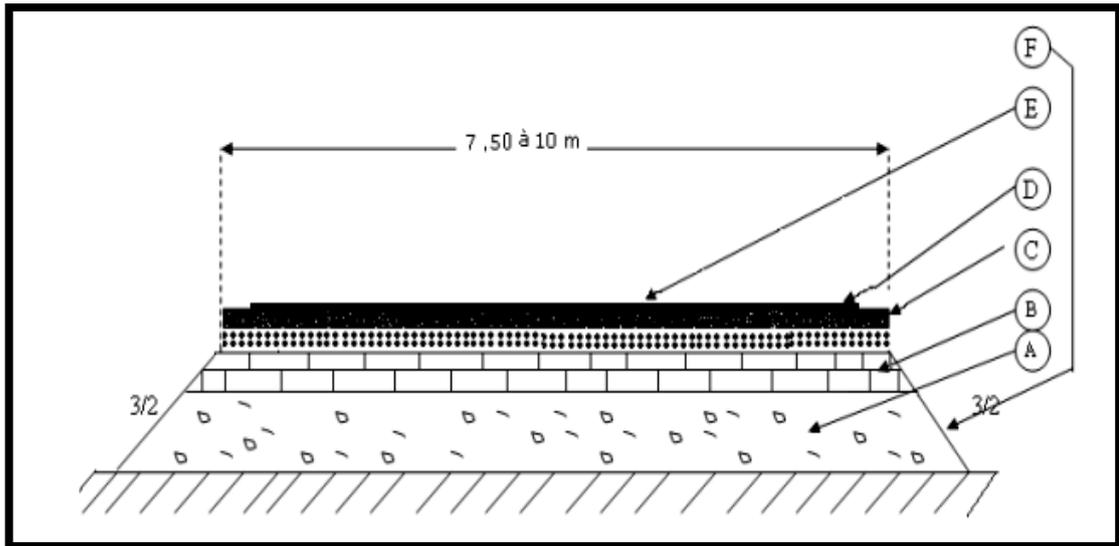


Figure I- 3 : Coupe transversale type d'une chaussée saharienne

Les terrassements (A)

Il y n'a pas de sélection de matériaux pour l'exécution des terrassements à l'exception des matériaux trop fins et pulvérulents qui sont écartés. Ce sont généralement des tout-venants qui sont utilisés; cependant, dans les zones des dunes, le sable peut constituer le corps du remblai, mais sa mise en œuvre pose des problèmes particuliers : faible portance du sable, sa fluidité et difficulté de épandage des matériaux d'assise de chaussée.

Les couches supérieures des terrassements sont compactées à sec de manière à atteindre des densités de l'ordre de 90% de la densité opm. Un choix judicieux des matériaux du remblai permet de réduire le corps de chaussée à une simple couche de base d'environ 15 cm.

La couche de fondation (B)

La couche de fondation est mise en place sur la plate-forme support de la chaussée (terrassements terminés) par compactage avec humidification et est exécutée sur toute la largeur de la plate-forme. Elle est constituée des matériaux sélectionnés, mis en place sur la plate-forme support de la chaussée par compactage avec humidification. Elle est exécutée sur toute la largeur de la plate-forme.

La couche de base (C)

La couche de base est aussi compactée avec humidification et exécutée sur toute la plate-forme.

Lorsqu'elle est terminée elle a une largeur de 7.50 à 10 m suivant les projets, et avec des élargissements sur certaines sections (passages submersibles, remblais de grandes hauteurs, etc.).

L'imprégnation (D)

Préalablement à la réalisation d'une couche de roulement, les matériaux de la couche de base doivent recevoir une couche d'imprégnation bitumineuse dont l'utilité est triple :

- Assurer l'accrochage de la couche de roulement sur un matériau souvent très fermé en surface;
- Servir éventuellement de couche de roulement provisoire;
- Protéger la couche de base d'éventuelles précipitations.

L'imprégnation est réalisée sur toute la largeur de la plateforme, le plus souvent au cut-back 0/1 et parfois au cut-back 10/15.

Le revêtement (E)

Le revêtement est réalisé sur une largeur de 7 m avec des élargissements sur certaines sections, car les anciennes routes revêtues sur une largeur moindre ont connu des dégradations prématurées malgré le faible trafic.

Selon l'intensité du trafic, la couche de roulement sera constituée par un enduit superficiel, un enrobé à froid, un enrobé à chaud ou un sable bitume.

I-9 Domaine d'application des chaussées saharienne :

- ✚ Climat très sec (moyenne annuelle des pluies < 100 mm).
- ✚ Risques d'imbibition des sols sous chaussées très réduits.

Les routes sahariennes ne souffrent pas de sous - dimensionnement : elles périssent par fatigue des matériaux de la couche de base (ou par usure de la couche de roulement) et non par rupture des sols ou fluage, les sols étant généralement bien portants et secs. La tenue de l'ensemble des chaussées en tufs d'encroûtements a été satisfaisante à chaque fois que les conditions liées aux critères de choix sont remplies et que des précautions de mises en œuvre ont été respectées. En cas d'augmentation du trafic, ou en cas de matériaux non performants, l'utilisation des tufs passera par une amélioration des qualités du matériau et non par une augmentation de l'épaisseur de la chaussée. L'amélioration des qualités de ces matériaux

demande une meilleure connaissance de ses particularités et une réappropriation du capital expérience dont dispose nos entreprises.

I-10 Définitions le traitement :

Le traitement est une opération qui consiste à mélanger un sol naturel avec de la chaux et/ou un liant hydraulique. Il permet, en améliorant ses caractéristiques, d'utiliser un sol qui était impropre à l'état naturel. Par ailleurs, cette technique conduit à préserver l'environnement : en utilisant les matériaux du site, on sauvegarde les ressources naturelles nobles (roches massives) et on réduit les nuisances (pas de circulation de camions de transport sur les voiries publiques).

1-11 Historique 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).

1-12 Avantages de la technique :

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

I-12-1- Avantages techniques :

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

I-12-2 Avantages économiques :

Le traitement des sols en place à la chaux et/ou au liant hydraulique est une technique de traitement à froid, donc utilisant peu d'énergie. La réutilisation des matériaux en place est un facteur d'économie important puisqu'il réduit au minimum les déblais issus du décaissement,

la mise en décharge, l'apport de granulats et le coût de leur transport. L'absence de transport de granulats ou des déblais en décharge contribue à la préservation du réseau routier situé au voisinage du chantier. Enfin, le traitement des sols en place est une technique très économique, notamment du fait de la durée plus courte des travaux par rapport à une solution avec décaissement.

I-12-3 Avantages écologiques et environnementaux :

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

I-13 Notions générales à connaître pour pouvoir faire le traitement des sols (Cftr - info) :

Les paramètres indispensables à connaître pour la réalisation d'un traitement de sol sont :

- ✚ l'identification des sols (granularité, l'argilosité, état hydrique, les constituants chimiques indésirables, etc.)
- ✚ la chaux (présentation, teneur en chaux libre, réactivité à l'eau)
- ✚ les liants hydrauliques routiers : la proportion et la nature des constituants des liants hydrauliques.

I-14 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.

I-15 Principales opérations de traitement :

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

- ✚ Préparer le sol pour que la couche traitée soit d'épaisseur uniforme et réglée aux niveaux et pentes convenables.
- ✚ L'épandage du liant de traitement avec le maximum de précision et de régularité de la dose prescrite par l'étude préalable.
- ✚ Le malaxage du liant avec le sol de façon homogène.
- ✚ L'ajustement de l'état hydrique (soit humidifier le sol par arrosage, soit l'assécher par aération).
- ✚ Le réglage du mélange.
- ✚ Le compactage avec une intensité suffisante pour atteindre la densité prévue par l'étude préalable
- ✚ L'application de la protection superficielle du sol traité (cas d'une couche de forme).

I-16 Objet du traitement aux liants hydrauliques:

Certains sols, limoneux ou argileux, en raison de leurs propriétés géotechniques intrinsèques et (ou) de leur teneur en eau sont considérés comme des matériaux mauvaises ou médiocres, créant un handicap économique et technique pour le maître d'œuvre et pour l'entreprise. Le plus souvent, ces sols sont mis en dépôt et remplacés par d'autres de meilleure qualité. Le traitement aux liants hydrauliques peut apporter une solution aux problèmes posés par ces sols, à la fois en modifiant leur nature et en améliorant leur état. Il permet d'utiliser des sols impropres au réemploi ou de qualité médiocre dans leur état naturel, et d'exécuter les terrassements dans des conditions normales de travail tout en diminuant la susceptibilité du chantier aux intempéries, pour (CFTR - info):

- ✚ Exécuter des remblais en masse tout en améliorant leur stabilité, réalise des pistes de chantier, éventuellement améliorant localement des zones de terrain très humides.
- ✚ Constituer des couches de forme ayant des qualités mécaniques suffisantes pour recevoir le trafic de chantier, la chaussée et le trafic futur, et ayant une stabilité à l'eau et au gel améliorée. Le traitement à la chaux dans ce cas, constituer un traitement en soi ou un traitement préliminaire à un traitement au ciment.

I-17 Effets des liants hydrauliques sur les sols :**I-17-1 La chaux :**

On distingue plusieurs natures de 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 Normal (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.

I-17-2 Cas du ciment :

Un ciment mélangé avec un sol va se dissoudre et s'hydrater si la quantité d'eau est suffisante pour donner naissance à un certain nombre de constituants hydratés bien connus dans la chimie des ciments. Il s'agit, dans le cas de ciment portlands

- ✚ Le silicate de calcium hydraté CSH provenant des silicates bicalciques et tricalcique (C2S et C3S).
- ✚ Le portlandite $\text{Ca}(\text{OH})_2$.
- ✚ L'aluminate de calcium C_4AH_13 , provenant d'aluminate tricalcique (C3A).
- ✚ Le sulfo-aluminate de chaux (par réaction du gypse avec le C3A).

D'abord sous forme d'étringite :



Puis sous forme de monosulfoaluminate :



- ✚ Au cours de la prise du ciment, le portlandien attaque les minéraux processés qui amènent à une stabilisation efficace. Les ciments contenant de fortes teneurs en laitier donnent des constituants un peu différents.
- ✚ Le mélange tuf-ciment, procure une certaine cohésion et une résistance qui croît avec le temps, dues à la croissance des microcristaux, leur enchevêtrement et leur feutrage progressif (Goual I. 2002).
- ✚ Les constituants du ciment et leur finesse, la teneur en eau et la température déterminent la vitesse et le taux d'hydratation. L'hydroxyde de chaux $\text{Ca}(\text{OH})_2$ formé par l'hydratation du ciment se combine aux éléments argileux du tuf.
- ✚ Dans certains cas, les particules argileuses forment autour des grains une enveloppe protectrice qui peut ralentir la prise du ciment. C'est { dire que les phénomènes d'interaction qui ont lieu et qui se poursuivent dans le temps entre l'argile et le ciment, dépendent de la composition minéralogique des argiles, ainsi que de leur quantité .

On recherche principalement, à travers l'utilisation des liants hydrauliques en traitement des sols, des actions à moyen et long terme. Les actions immédiates sont plutôt secondaires.

A. Actions immédiates

Ces actions peuvent se résumer en deux points :

- ✚ Modifications de l'état hydrique : assèchement du sol traité du fait de l'ajout d'une certaine quantité de matière sèche (liant hydraulique).
- ✚ Modifications des caractéristiques de la fraction argileuse du sol : cette action est valable uniquement lorsqu'on utilise certains LHR comportant une forte proportion de chaux mais cette action reste très limitée.

B. Actions à moyen et long terme

La prise hydraulique donne aux matériaux traités une résistance en traction qui est prédominante dans leur comportement. Elle se développe en trois étapes, la durée de chacune d'elles dépend de la nature du liant et de la température du mélange.

Étape 1 : démarrage de la prise (phase dormante)

C'est le temps nécessaire de la mise en solution et à la précipitation sous forme de gel des silico-ferro-aluminates de calcium dans l'eau libre du sol (entre 2 et 48 h après fabrication du mélange). Ce délai, qui est appelé délai de maniabilité, est très important car il fixe la durée possible des opérations de mise en œuvre.

Étape 2 : développement de la cristallisation du gel

Elle correspond à la rigidification du mélange sous l'effet de la prise hydraulique. Elle s'étend de quelques jours comme dans le cas des ciments à forte proportion de clinker (CPA-CEM I) à quelques semaines pour les liants à prise lente comme certains LHR.

Étape 3 : période de durcissement

Elle se manifeste une fois la prise terminée (après formation de la quasi-totalité des ferrosilico-aluminates hydratés). Dans cette période, il y a une poursuite de la croissance des résistances mécaniques, sa durée peut s'échelonner, toujours suivant la nature des liants et pour les climats tempérés, entre quelques semaines et plusieurs mois. En traitement de sol, les durées de prise et de durcissement permettent d'évaluer notamment la possibilité d'être circulé par les engins de chantier (le temps nécessaire pour solliciter mécaniquement le matériau traité). La prise des liants hydrauliques s'arrête lorsque la température du mélange descend en dessous de 5 °C. de plus, la dépendance aux variations climatiques est moins contraignante comparativement à l'utilisation de la chaux car la cinétique de prise est beaucoup plus rapide

I-17-3 Cas d'un traitement mixte :

On effectue par fois un traitement mixte aux sols peu à moyennement plastiques utilisés en couches de forme et le cas échéant, en couche de chaussées et qui consiste à utiliser d'abord de la chaux puis le ciment, ces deux liants ne sont pas concurrents mais complémentaires puisque chacun apporte ses propriétés spécifiques (Azzouz et al 1997 et 1998) :

- ✚ la chaux permet un assèchement du sol trop humide, une floculation de l'argile.
- ✚ Le ciment permet l'obtention rapide de résistances mécaniques appréciables les tout premiers jour.

I-18 Techniques de réalisation des travaux de traitement :

Les étapes de traitement peuvent se présenter dans un ordre différent suivant qu'il s'agit de traiter le sol en place, ou que l'on prévoit des mouvements de terre avant ou après le traitement

Dans une centrale de malaxage ou en place. Dans le cas de la centrale le sol naturel est amené de l'emprunt à la centrale où il est mélangé avec le(s) liant(s) puis ré-transporté sur le lieu d'utilisation. Une centrale est une installation fixe qui est constituée de trémie, de silos de stockage de liants, de tapis transporteurs et/ou doseurs, d'un système réglable d'apport d'eau et d'un malaxeur à arbre horizontal.

Dans le cas du traitement en place le sol naturel est traité sur le lieu d'utilisation. Le matériel nécessaire est composé de :

- ✚ une épandeuse de liants : citerne tractée de 12 à 16 m³ avec système de dosage pondéral asservi à la vitesse d'avancement ;
- ✚ une arroseuse de 10 à 15 m³, avec une rampe munie d'injecteurs, tractée ou automotrice ;
- ✚ un malaxeur : soit une charrue à socs tractée par un boteur, soit un pulvérisateur automoteur (pulvi-mixer) à rotor horizontal. La profondeur de malaxage est d'environ 0.40 à 0.50 m.



Photo I- 1 : traitement sur terrain

Conclusion :

Ce chapitre a permis de présenter la définition des marnes et les routes plus beaucoup les routes sahariennes et les définitions des traitements ainsi que ces avantages

La marne c'est roche sédimentaire contenant du carbonate de calcium (CaCO_3) et de l'argile

La technique routière saharienne, ainsi définie par ses fondateurs, a permis d'équiper, en grand nombre, la vaste étendue désertique en routes et en aérodromes, dans des conditions technico-économiques convenables .

la technique de traitement des sols par l'ajout de le ciment est la plus répandue, elle concerne essentiellement les sols fins (argileux, limoneux et marneux):

- D'éviter des volumes de terrassement importants dans le cas de substitution des sols médiocres.

- De donner aux sols d'une manière assez rapide une bonne consistance pour des dosages compris entre 2% et 8%. Ceci montre aussi l'intérêt économique de ce procédé.
- De modifier les propriétés du sol.

CHAPITRE II :
ETUDE D'IDENTIFICATION
GEOTECHNIQUES DE MARNE

I-1 Introduction :

Le présent chapitre se propose de présenter l'étude entreprise pour identifier le matériau de base (La marne) à l'aide des essais géotechniques conventionnels de laboratoire. Puis on va le classer.

II-2 Le site du prélèvement :

Notre matériau provient d'Oued Nechou, située à 17km au nord du centre-ville de la wilaya de Ghardaïa. Cette région située à 600 km au sud de la capitale Alger,



Photo I1-1 : Photo de Google Maps



Photo II- 2 : Photo prise sur terrain.

II-3 Situation géographique de la région :

La Wilaya de Ghardaïa, l'une des plus importantes Wilaya du sud de l'Algérie est assise sur une superficie de 86.560 km². Situé dans la partie septentrionale et centrale du Sahara (région programme Sud/Est) entre 4° et 7° de longitude Est et 35° et 36° de latitude Nord.

Le climat de la wilaya est de type désertique saharien, il se caractérise par des étés très chauds et des hivers doux et une grande différence entre les températures de jour et de nuit, d'été et d'hiver. La période chaude commence au mois de mai et dure jusqu'au mois de septembre. La température moyenne enregistrée au mois de Juillet est de 36,3 °C, le maximum absolu de cette période a atteint 47 °C. Pour la période hivernale, la température moyenne enregistrée au mois de Janvier ne dépasse pas 9,2 °C, le minimum absolu de cette période a atteint -1 °C.

On note aussi la rareté et l'irrégularité des pluies. Par ailleurs, les crues sont rares mais instantanées et brutales, les vents de sable sont très fréquents, ils se manifestent souvent sur une grande partie de cette région.



Photo II-3 : situations de la wilaya de GHARDAIA

II-4. Etude d'identification géotechnique :

L'identification géotechnique a été faite au niveau du laboratoire des travaux publics du sud (LTPS), les essais sont effectués selon des modes opératoires définis par les normes françaises.

Les essais ont pour but de déterminer un bon nombre de paramètres et d'indices afin de classer les matériaux et de les situer par rapport aux spécifications et normes retenues pour leur emploi en corps de chaussée.

L'étude expérimentale comprend les analyses et les essais suivants :

- Analyses granulométriques.
- Les limites d'Atterberg.
- L'équivalent de sable.
- Essais au bleu de méthylène.
- Essais de Proctor.
- Essai Los Angeles.
- Essai de compression simple.
- Analyses chimiques.

II-4-1 Analyse granulométrique : NFP 94-056**Définition :**

L'analyse granulométrique sert à déterminer la distribution dimensionnelle d'un matériau soit :

- **Par tamisage (voie sèche ou humide).**
- **Par sédimentométrie .**

II-4-1-1 Par tamisage :**Objet :**

L'essai consiste à séparer par lavage les grains d'un matériau puis à les fractionner au moyen d'une série de tamis et à peser après séchage le refus de chaque tamis.

Matériel nécessaire :

- ✚ Une machine à tamiser.
- ✚ Une série de tamis conformes.
- ✚ Une main écope pour le remplissage.
- ✚ Une balance.

Mode opératoire :

- ✚ Provenir un quartage afin que l'échantillon soit représentatif,
- ✚ Procéder à une prise d'essai conformément à la formule : $200D < P < 600D$, avec D : diamètre moyen estimé du plus gros grain.
- ✚ Peser l'échantillon dans un récipient.
- ✚ Sécher l'échantillon dans une étuve jusqu'à 24h
- ✚ Tamiser l'échantillon.
- ✚ Peser le refus de chaque tamis dans une balance de portée pesant au g près et compatible avec les masses à peser ;
- ✚ Rapporter les poids des différents refus au poids initiaux de matériau.
- ✚ Calculer les pourcentages des tamis.
- ✚ Etablir la courbe granulométrique.

Les paramètres de la courbe granulométrique :

Coefficient de Hazen : $C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}}$

On définit aussi le coefficient de courbure : $C_c = \frac{(D_{30})^2}{D_{60} D_{10}}$

D60 : La dimension des particules telle que 60% des poids du sol a des dimensions inférieure ou égale à D60

D10 : La dimension des particules telle que 10% des poids du sol a des dimensions inférieure ou égale à D10

II-4-1-2 Par sédimentation : la norme NFP 94 – 057

Objet :

C'est la détermination de la distribution pondérale de la taille des particules de sols de dimension inférieure à 0.08 mm

Définition :

C'est un essai complété l'analyse granulométrique par tamisage d'un sol (norme NFP94-056) et qui peut être nécessaire à sa description et à sa classification.

Mode opératoire :

- ✚ Tamiser l'échantillon (passant au tamis 0.08 mm), et récupérer le tamisât ;
- ✚ Sécher l'échantillon dans une étuve
- ✚ Préparer la prise d'essai de 80 g + 10g de tamisât sec ;
- ✚ Pilonner l'échantillon, et le tamiser au 0.08mm, puis prendre 80g ;
- ✚ 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 à 5% d'hexamétaphosphate de sodium ($Na_6(PO_3)_6, 10H_2O$) ;
- ✚ Laisser imbiber pendant au moins 15 heures à température ambiante .
- ✚ Agiter vigoureusement la suspension au moyen d'un agitateur manuel ;
- ✚ Retirer l'agitateur manuel et déclencher au même instant le chronomètre (début de l'essai) ;
- ✚ Plonger le thermomètre et le densimètre avec précaution dans la suspension immédiatement après le déclenchement du chronomètre ;
- ✚ 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 ;

- ✚ Calculer le pourcentage des tamis et complète la courbe granulométrique.



Photo II-4: l'essai de granulométrie par sedimentometrique

La figure II-1 présente les positions des courbes granulométriques de matériau étudié, par rapport aux fuseaux discriminants de la TRS (Fenzy, 1966) et du Catalogue de Dimensionnement des Chaussées Neuves (CTTP, 2001). Les paramètres les plus significatifs tirés de cette analyse, ainsi que les seuils préconisés par les spécifications de la TRS, CTTP et le guide technique routière GTR (GTR, 1992).

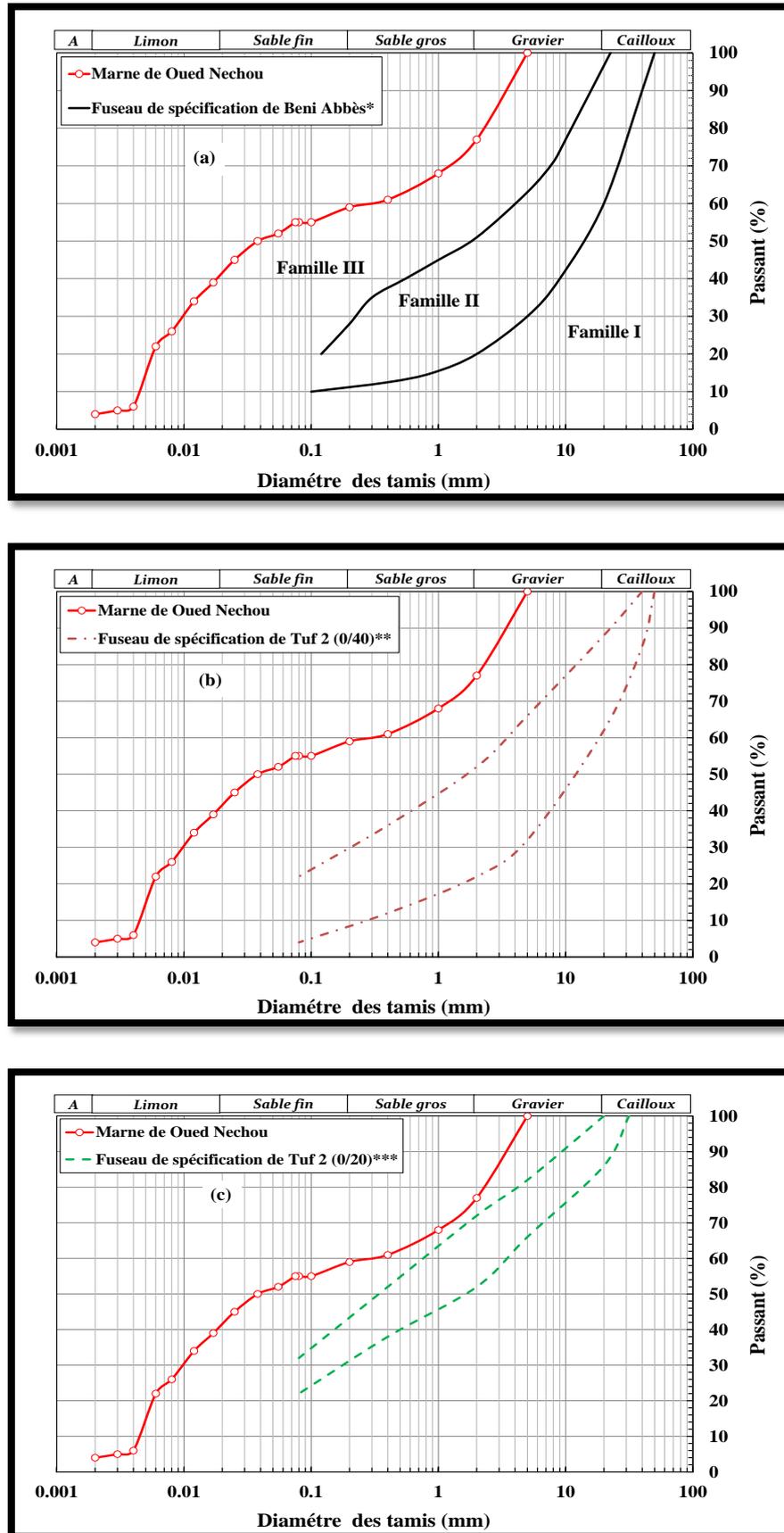


Figure II-1 : Courbes granulométriques de marne par rapport : (a) fuseau saharien (Fenzy, 1966), (b) fuseau de tuf 1 (0/40) et (c) fuseau de tuf 2 (0/20) (CTTP, 2001).

Tableau II-1 : Résultats récapitulatif de l'analyse granulométrique.

	Matériaux	Spécifications		
	Marne de Oued Nechou	TRS*	CTTP*	GTR*
D_{max} (mm)	5	-	20-40	<50
Argile (%)	4	-	-	-
Limon (%)	38	-	-	-
Sable fin (%)	17	-	-	
Sable gros (%)	18	-	-	-
Gravier (%)	23	-	-	-
Cailloux (%)	0	-	-	-
% < 0,425 mm	37	-	36-52	-
% < 80µm	55	< 30	22-32	≤ 35
D₁₀	0.0033	-	-	-
D₃₀	0.006	-	-	-
D₆₀	0.25	-	-	-
C_u	87.5	-	-	-
C_c	7.143	-	-	-
C_u : coefficient d'uniformité dit de Hazzen. $C_u = D_{60}/D_{10}$ C_c : coefficient de courbure. $C_c = (D_{30})^2/D_{60} \cdot D_{10}$ * Seuils préconisés par le TRS (Fenzy, 1966), le CTTP (CTTP, 2001) et le GTR (GTR, 1992).				

Interprétation :

D'après ces résultats, on constate que la courbe se situe au-dessus du fuseau saharien dit fuseau de Beni-Abbès. Ils appartiennent à la famille des matériaux fins (famille II).

La courbe granulométrique est étalée ($C_u > 20$), présente une grande fraction de fines (< 80µm) de l'ordre de 55%, ce dernier est supérieur aux seuils préconisés par les spécifications citées dans le tableau II-1 (TRS, CTTP et GTR). La courbe granulaire se trouve en dehors de fuseau de tufs à squelette de classe 1 (Tuf 1) et tufs fins de classe 2 (Tuf 2).

II-4-2. Qualité des fines**II-4-2-1. Les limites d'Atterberg : la norme NFP 94 – 051**

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.

LL : limite de liquidité (WL) : teneur en eau d'un sol remanié au point de transition entre les états liquide et plastique.

LP : limite de plasticité (WP): teneur en eau d'un sol remanié au point de transition entre les états plastique et solide.

IP : indice de plasticité: différence entre les limites de liquidité et de plasticité. Cet indice définit l'étendue du domaine plastique. $IP=LL-LP$

Mode opératoire :

- Faire un quartage afin que l'échantillon soit représentatif.
- Après Imbiber l'échantillon dans un récipient.
- Tamiser l'échantillon au tamis de 0.40 mm (passant 0.40 mm) par siphonage, et récupérer le tamisât.
- Sécher le matériau dans une étuve réglée à 105 c° pour les sols non gypseux et à 55 c° pour les sols gypseux.
- Placer l'échantillon de marne dans la coupelle et tracer un sillon avec l'outil à rainurer. Par convention, la limite de liquidité est la teneur en eau du matériau qui correspond à fermeture de 1 cm des lèvres de la rainure après 25 chocs.
- Prélever à l'aide d'une spatule deux échantillons des levers de la rainure dans des godets qu'on pèse puis le porter à l'étuve.
- Calculer la limite de liquidité.



Photo II-5 : siphonage et imbibitions de l'échantillons de limite d'Atterberg.



Photo II-6 : limite de liquidité.

Limite de plasticité (wp) :

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.

La limite de plasticité est atteinte lorsque le rouleau soulevé par le milieu de 1 à 2 cm se fissure.

- ✓ Prélever les échantillons qu'on pèse puis on les porte à l'étuve ;
- ✓ Peser l'échantillon après séchage ;
- ✓ Déterminer la limite de plasticité ;
- ✓ Calculer l'indice de plasticité : $IP=LL-LP$

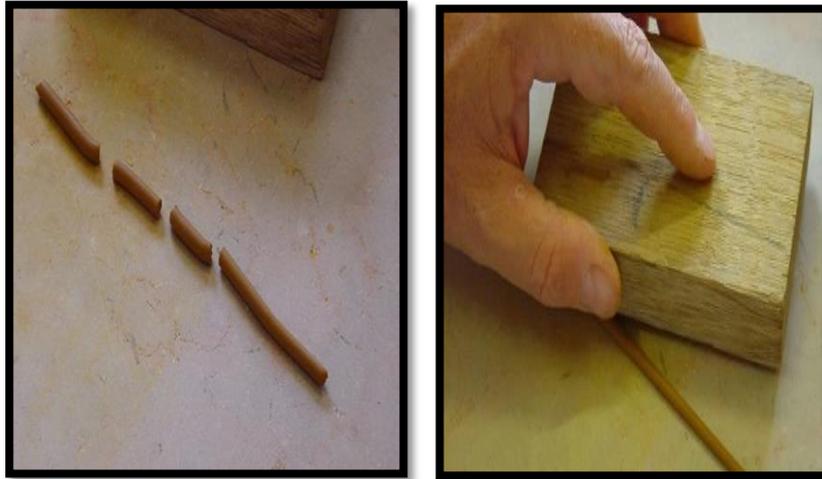


Photo II-7 : limite de plasticité

Le tableau II-2 résume les résultats de cet essai.

Tableau II-2 : Valeur de limites d'Atterberg.

	<i>Matériaux</i>	<i>Spécifications</i>		
	<i>Marne de Oued Nechou</i>	<i>TRS</i>	<i>CTTP</i>	<i>GTR</i>
<i>Les limites d'Atterberg</i>				
w_L (%)	43.5	-	>40	
w_p (%)	19.15	-	-	-
I_P (%)	24.35	> 13	> 15	> 12

Interprétations :

Ces résultats coïncident avec les résultats de l'analyse granulométrique où nous avons trouvé un pourcentage des fractions inférieurs à 80µm de 55% ; ceci peut donner une indication intéressante sur la nature argileuse des fines. la limite de liquidité et l'indice de plasticité sont inférieurs aux seuils préconisés par les spécifications TRS, CTTP et GTR.

Si on adopte la classification en fonction de l'indice de plasticité cité dans le tableau II-3, on trouve que notre matériau se classe comme **plastique**.

Tableau II-3 : Classification en fonction de l'indice de plasticité d'après (Cornell, 1951. et J.M. TCHOUANINANA1999).

Indice de plasticité	Etat- du sol
0 - 5	Non plastique
5 - 15	Peu plastique
15 - 40	Plastique
> 40	Très Plastique

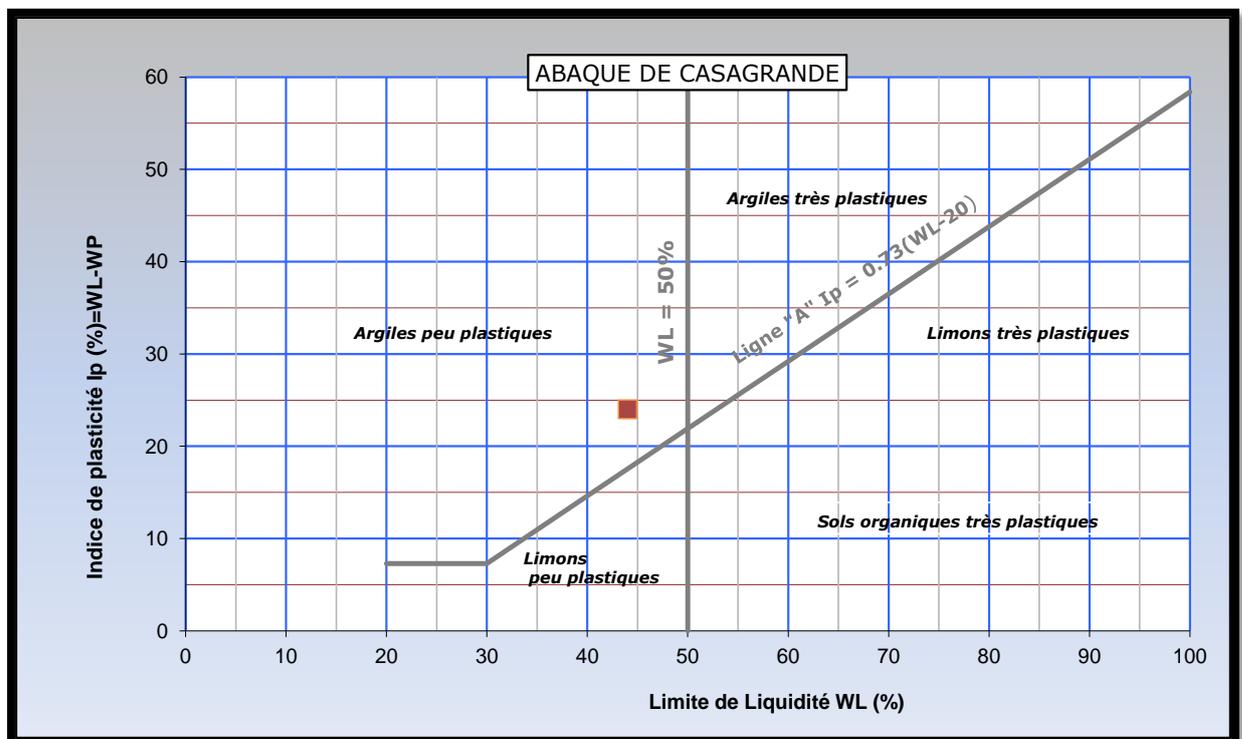


Figure II-2 : abaque de casagrade marne

La positionnement de la marne par rapport au diagramme de Casagrande (figure II-2) montre que notre matériau est positionné au-dessus de la ligne A (zone d'argile), se classe comme **argile peu plastique**.

II-4-2-2. L'équivalent de sable :**Objet :**

Le but de cet essai est de déterminer le pourcentage d'éléments fins au sein d'un matériau sableux.

Définition :

L'équivalent de sable est le rapport de la hauteur de la partie sédimentée (grains solides) et la hauteur totale (hauteur de floculat plus la hauteur de la partie sédimentée), multiplié par cent.

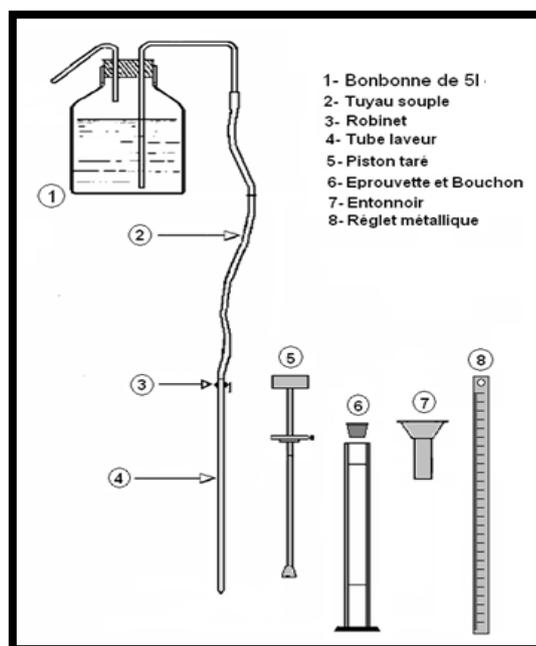


Figure II-3 : Matériel nécessaire pour l'essai ES.

Mode Opérateur :

- Tamiser l'échantillon au tamis de 4 mm (passant 4 mm).
- 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.
- Verser la mesure de l'échantillon (environ 120g) de sol, au préalable peser à la balance.
- Verser les 120 gr de l'échantillon dans l'éprouvette à l'aide de l'entonnoir. Préparer de la même façon une seconde éprouvette.
- Laisser les deux éprouvettes au repos pendant 10 minutes.
- Les 10 mn passées, on ferme l'éprouvette à l'aide du bouchon à liège avant de la secouer puis on met cette dernière sur la machine d'agitation pour le faire subir 90 cycles en 30

secondes environs tout en sachant qu'un cycle représente un aller-retour (un contour intégré dans la machine nous indique le nombre de cycle), et que le travail se fait avec les avant-bras.

- Remplir les éprouvettes jusqu'au second trait de jauge en lavant le bouchon et les parois intérieures afin de récupérer toutes les impuretés et le sable au fond des tubes.
- Laisser reposer pendant 20 mn.
- Au bout de ces 20 minutes, mesurer à l'aide de la règle graduée le niveau en haut de la suspension c'est à dire du floculat par rapport au fond et le noter H1. Puis procéder à la mesure de la hauteur du niveau supérieur de la partie sédimentée toujours par rapport au fond, on la note H2.
- Descendre doucement le piston taré dans l'éprouvette jusqu'à ce qu'il repose parfaitement sur le sédiment. Une fois en contact avec le sédiment, immobiliser le manchon coulissant. Lire la hauteur HP au niveau de la face supérieure du manchon.



Photo II- 8: Essai de L'équivalent de sable

La valeur de ES de notre échantillon est : 10.27%.

Interprétation :

Cette valeur montre bien la pollution argileuse de notre échantillon. Ce qui n'est pas forcément vrai, ce sont peut-être les fines gypseuses et calcaires qui ont causé la faiblesse de la valeur de ES.

Il faut compléter cette analyse par l'essai au bleu de méthylène pour étudier la qualité des fines.

II-4-3. Essai au bleu de méthylène NF P 94-068 :

L'essai au bleu de méthylène dit A LA TACHE permet la détermination de l'activité et de la quantité de la fraction argileuse d'un échantillon.

Mode Opérateur :

- Un statif rigide supportant un agitateur électrique à arbre creux pour palette suspendue dia 70mm. Vitesse de 3 à 1600tr/min (alimentation 220V-50Hz).
- Additions successives de bleu à grands pas (5cm^3) suivies immédiatement du test de la tache
- Additions successives de bleu à pas fins (2cm^3) suivies toujours immédiatement du test de la tache
- Fin de dosage : répétition de minute en minute du test de la tâche qui doit rester positif pendant 5 min consécutives.



Photo II-9 : principe et résultats d'Essai au bleu de méthylène

Tableau II-4 : donne VB pour notre échantillon.

	<i>Marne de Oued Nechou</i>	<i>GTR</i>
<i>Valeur de bleu de méthylène VB</i>	1.27	< 1.5

Interprétation :

La valeur de bleu de méthylène de notre échantillon est inférieure au seuil préconisé par le GTR. Si on adopte la classification des sols selon la valeur de bleu de méthylène (Colombier, 1988) (tableau II-5), le marne est classé comme matériau très pollué ($1 < VB$).

Tableau II-5 : Classification des sols selon la valeur de Vb

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

II-4-4. Essai Proctor modifié :**But de l'essai :**

L'essai 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.



Photo II- 10 : matériel Proctor modifié.

Mode opératoire :

- Tamiser le matériau au tamis 20mm.
- Prendre 5,5Kg de notre matériau.
- Ajouter pour chacun une quantité d'eau pour avoir le teneur en eau souhaité.
- Placer la hausse sur le moule et donner 55coups pour chaque couche.
- Compacter le sol en 5 couches pour avoir la dernière débordant légèrement le haut de moule.
- Peser le moule avec le sol.
- On prend de chaque cotés (au-dessus et au-dessous) de ce moule une quantité pour la détermination de la teneur en eau.
- Répéter l'essai pour des teneurs en eau croissante.
- Mettre les tares dans l'étuve de 55°C pendant 48heures.
- Détermine la teneur en eau du matériau, ce qui permet de calculer le poids volumique sec. Le résultat de l'essai se traduit par un point de la courbe.
- Après ces calculs on passe à la construction de la courbe représentative de la variation de la poids volumique sèche γ_d en fonction de la teneur en eau $f(w) = \gamma_d$ (voir la courbe) et on tire γ_{dmax} et ω_{opm} .



Photo II- 11 : essai Proctor modifié.

Les résultats de cet essai sont représentés dans la figure II-5, et les caractéristiques optimales déduites de cette courbe sont présentés dans le tableau II-6

Tableau II-6: Caractéristiques optimales de Proctor modifié.

	<i>Marne de Oued Nechou</i>	<i>TRS</i>
<i>Poids volumique sec maximal</i> γ_{dmax} (g/cm ³)	2.05	> 1,7
<i>Teneur en eau optimale</i> w_{opt} (%)	12.01	-

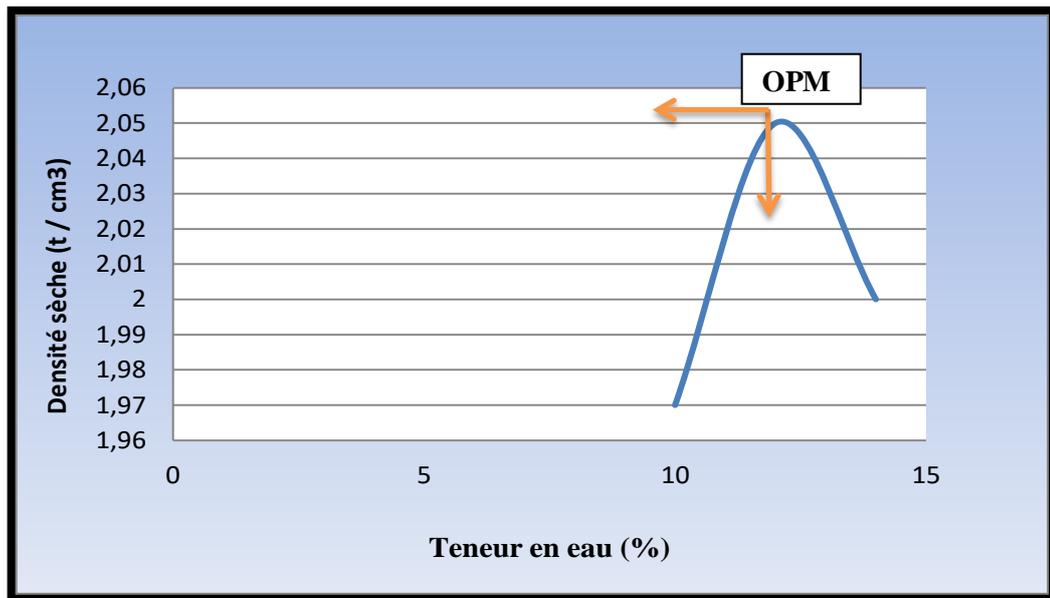


Figure II-4: courbe Proctor marne

Interprétations :

D'après ces résultats on remarque que la courbe représente 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 explique bien l'influence de l'eau sur les fines existantes. La teneur en eau optimale est assez élevée par rapport à celle des matériaux routiers habituels cités dans le tableau II-7 La densité sèche dépasse 1.7 g/cm^3 préconisée par le TRS.

Tableau II-7 : Caractéristiques de compactage pour quelques matériaux routiers (Gandil, 1988).

Nature de matériaux	γ_{dmax} (g/cm^3)	w_{opt} (%)
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

II-8. Essais CBR NFP 94-078 :

L'indice CBR est le coefficient le plus généralement utilisé pour donner une épaisseur à un corps de chaussée. Cet indice empirique se détermine par un essai au laboratoire. Fait selon la norme NFP 94-078 soit :

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

Objet :

L'essai CBR consiste à déterminer la résistance au poinçonnement d'un matériau immédiatement ou après immersion.

Définition :

L'essai permettant la détermination de : CBR immédiat d'un sol, CBR imbibé, indice portant immédiat (IPI).

Indice CBR après immersion, indice CRB immédiat : grandeur utilisée pour caractériser un sol, en tant que support ou constituant d'une structure de chaussée.

Indice portant immédiat IPI : grandeur utilisée pour évaluer l'aptitude d'un sol ou d'un matériau élaboré à supporter directement sur sa surface la circulation des engins de chantier.



Photo II-12 : presse CBR.

Mode opératoire :

➤ **L'exécution de l'essai :** il convient tout d'abord de choisir les différents ensembles de conditions d'état du sol (Masse volumique séchée, teneur en eau, état de saturation) pour lesquels on veut réaliser l'essai. Lorsque la dimension maximale des éléments du sol à étudier est inférieure à 20 mm, l'intégralité du sol est soumise à l'eau.

Pour chaque ensemble de conditions d'état considéré, il convient de préparer 5.5 Kg de matériau dans le cas où l'on recherche l'indice CBR immédiat ou l'IPI et 5.5Kg de matériau dans le cas de l'indice CBR immersion.

Pour ce dernier le surplus du matériau restant après confection de l'éprouvette est pesé et séché à l'étuve pour détermination de la teneur en eau de confection.

➤ **Exécutions de poinçonnement :** Placer l'ensemble (plaque de base, moule, éprouvette) sur la presse en position centrée par rapport au piston de poinçonnement et procéder au poinçonnement de manière suivant :

- Approcher, la surface supérieure de l'éprouvette vers le piston, jusqu'à ce que le piston vienne affleurer le matériau ;
- Régler la mise à zéro du dispositif dynamométrique et celle du comparateur, mesurer l'enfoncement du poinçon ;
- Exécuter le poinçonnement en maintenant la vitesse de pénétration à 1.27 mm / min ;
- Enregistrer les lectures obtenus du poinçonnement.

L'éprouvette après son démoulage est pesée et introduite dans l'étuve pour déterminer la teneur en eau.

CBR immédiat :



Photo II-13: échantillon lors de poinçonnement



Photo II-14: séché échantillon à l'étuve.

CBR imbibi :**Photo II-15 :** Essai de CBR imbibi

Le tableau II-8 représente les valeurs de la portance de notre échantillon.

Tableau II-8 : Valeurs des indices CBR.

	<i>Marne de Oued Nechou</i>	<i>TRS</i>
<i>CBR Immédiat (%)</i>	29.9	> 40
<i>CBR Imbibé (Après 4 h d'immersion) (%)</i>	16.9	-

Interprétation :

D'après ces résultats on remarque que l'indice CBR immédiat et imbibé est inférieur au seuil préconisé par la TRS.

Les indices portants après 4 heures d'immersion, est plus faible que l'indice immédiat. En effet, On constate, une réduction de 65 %.

II-9. Résistance à la fragmentation mécanique (Essai Los Angeles) :

L'essai (N.F. P18.573) permet de mesurer les résistances combinées à la fragmentation par chocs et à l'usure par frottements réciproques des éléments d'un granulat.

Matériel utilisé :

- La machine Los Angeles.
- Une balance précise au gramme.

- Une étuve.
- Un jeu de tamis de 16/31,5.
- Matériaux (Marne).

Mode opératoire :

- Préparer deux fractions des échantillons marne en 5000 g (Fraction 1 =60% 3000g et Fraction 2 = 40% 2000g).
- Mise en place de l'échantillon dans la machine ainsi que la charge de boulets relatifs à la classe granulaire choisie. (N de boule 12 ; N de tours totale de l'essai 500)
- Tamiser le matériau contenu dans le bac sur le tamis de 1,6



Photo II-16 : essais de los Angeles

Les valeurs de Los Angeles (LA) obtenue est représenté dans le tableau II-9.

Tableau II-9 : Valeurs des coefficients de Los Angeles

<i>Classe granulaire (mm)</i>	<i>LA (%)</i>	<i>GTR*</i>
16-31,5	57.6	>45

Nous constatons que les valeurs de LA dépasse 45 % préconisé par le GTR (GTR, 1992).

II-10. Essais compressions simple :

Objet :

La résistance à la compression permet d'apprécier approximativement la valeur de la cohésion du matériau ou des éléments fins.

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 théorique (100%, 98% et 95%) afin d'étudier la relation entre la résistance et la compacité.

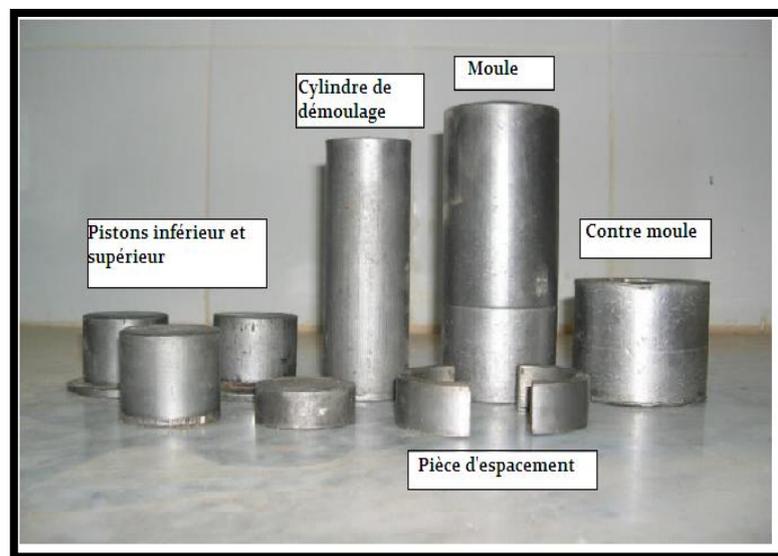


Photo II-17: Moules de confection.

Mode opératoire :

- ✚ (06) éprouvettes doivent être confectionnées ;
- ✚ Les résultats du Proctor modifié doivent être connus et mentionner sur la feuille d'essai.

- ✚ Malaxage de l'échantillon.
- ✚ Moulages des éprouvettes par compactage statique.
- ✚ Démoulages des éprouvettes.
- ✚ Étuvages des éprouvettes à 55c° pendant 48heurs pour les matériaux non gypseux.
- ✚ Écrasement des éprouvettes : les éprouvettes conservées pendant la durée voulue dans l'étuve, puis ensuite porté entre les plateaux de la presse CBR.
- ✚ sur la feuille d'essai, les renseignements suivants seront conjoints :
- ✚ La densité sèche maximale Proctor modifie.
- ✚ La teneur en eau optimale Proctor modifie.
- ✚ Le poids théorique humide de l'éprouvette
- ✚ La teneur en eau réelle du compactage.
- ✚ La hauteur de l'éprouvette.
- ✚ Le diamètre de l'éprouvette.
- ✚ Le volume de l'éprouvette.
- ✚ La valeur de l'écrasement : R/C en Kg /cm²



Photo II-18: préparation de l'échantillon.



Photo II-19 : écrasement des éprouvettes dans la presse CBR

La figure II-5 : présente la relation entre résistance à la compression (R_c) et la compacité (C).

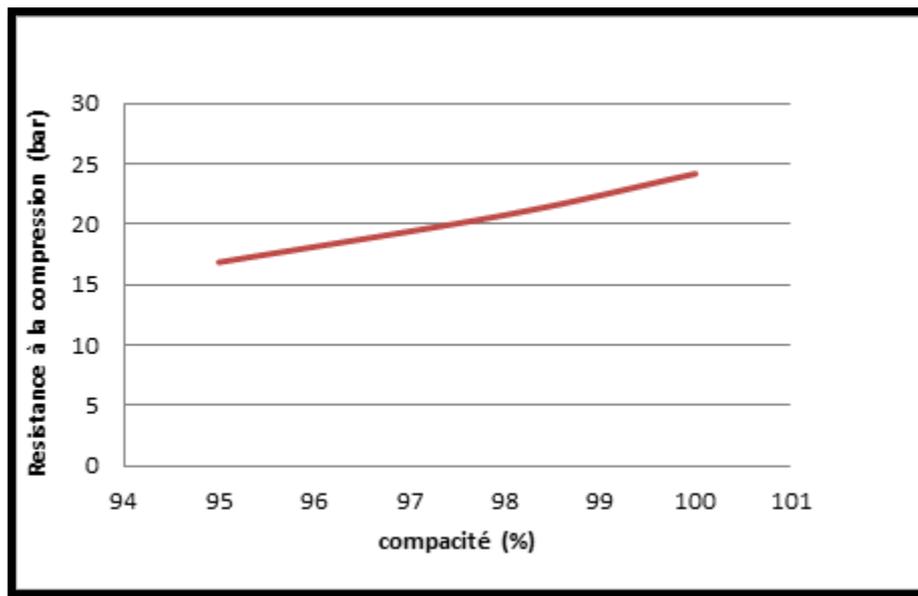


Figure II- 5: Variation de la résistance à la compression en fonction de la compacité

Interprétation :

Nous remarquons que la résistance à la compression augmente d'une manière linéaire avec l'augmentation de la compacité.

La valeur de R_c de la marne correspond à 95% de compacité est supérieure à celle qui est exigée par les spécifications de la TRS ($R_c = 1,7 \text{ MPa} > 1,5 \text{ MPa}$).

II-11. Analyse chimique :

L'analyse chimique élémentaire donne la composition quantitative élémentaire du matériau. On doit noter que la précision sur la quantité d'un élément dépend de son abondance dans le matériau et les résultats de cette analyse sont à la base de la composition minéralogique ; par conséquent, il est important que cette étude se fasse avec le maximum de rigueur.

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 l'attaque de l'acide chlorhydrique.

Les sulfates : ils s'obtiennent par précipitation du sulfate de baryum (BaSO_4) dans filtrat en provenance d'attaque au HCl à 10 % et à chaud.



Photo II- 20: l'essai Analyse chimique

Les résultats de l'analyse chimique de nos échantillons sont récapitulés dans le tableau II-10.

Tableau II-10 : Résultats de l'analyse chimique sommaire

	<i>Marne de Oued Nechou</i>	<i>CTTP</i>
<i>Insolubles (%)</i>	24.3	-
<i>CaCO₃ (%)</i>	68	≥ 45
<i>CaSO₄ ; 2H₂O (%)</i>	1.7	-
<i>Autres (%)</i>	6	

Interprétations :

D'après ces résultats on remarque que la marne est de nature chimique marne avec une teneur en CaCO₃ de l'ordre de 68%.

II-12 CLASSIFICATION :**II-12-1. Classification USCS**

D'après la classification USCS (*Unified Soil Classification System*) (tableau II-11) basée sur :

❖ *Des critères granulométriques :*

- Les pourcentages de gravier, sable et particules fines (tamisats à 2 mm et 0,08 mm) ;
- La forme de la courbe granulométrique :
 - ✓ Coefficient d'uniformité C_u ;
 - ✓ Coefficient de courbure C_c .

❖ *Les caractéristiques de plasticité :*

- Limite de liquidité w_l et l'indice de plasticité I_p
- La ligne A d'équation : $IP = 0,73 (w_l - 20)$ (relation de Casagrande).

Notre matériau sont classés comme **GA (GC)** (Grave argileuse).

Tableau II-11 : Classification USCS des sols grenus (plus de 50 % d'éléments > 0,08 mm).

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)	$C_u = D_{60}/D_{10} > 4$ et $1 < C_c = (D_{30})^2/D_{10}D_{60} < 3$	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	

II-12-2. Classification GTR (cas des sols fins) :

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

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

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

$$12\% < IP = 24.35 < 25\%$$

Donc selon ces valeurs, la classification de notre matériau est **A3** Sachant que la classe A3 est « sables fins argileux, limons, argiles et marnes peu plastiques arènes. »

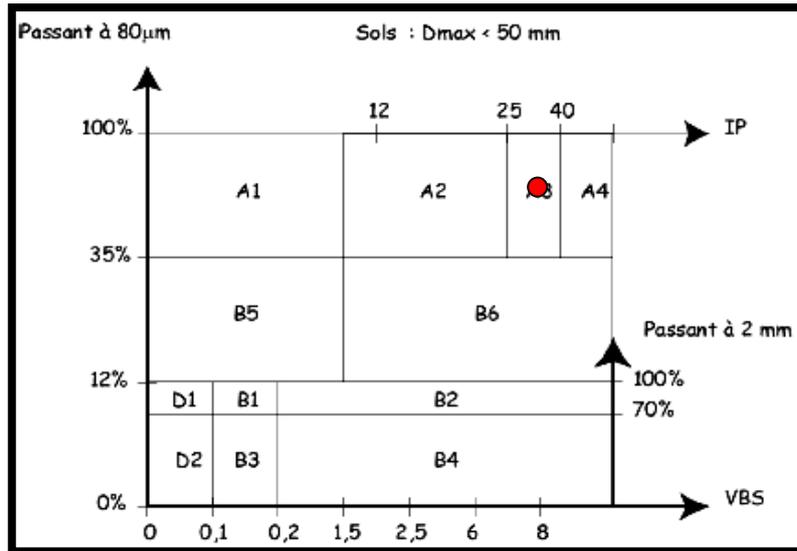


Figure II-6: Classification des sols fins selon GTR.

II-13. Conclusion :

➤ L'étude d'identification géotechnique à permet de dire que la Marne étudiée est riche en fines ; La fraction 0/80 μ m est de 55 %. La courbe granulométrique est au-dessus du fuseau de BENI ABBES (famille III). Sa densité sèche maximale au Proctor modifie qui est ($\gamma_{d_{max}} = 2.05 \text{ t/m}^3$). Celle-ci est sensible à la teneur en eau ainsi que sa portance. Ce matériau tendre ($L.A > 55$).

Certaines caractéristiques de notre matériau sont médiocres par rapport aux matériaux routiers habituels et ne répondent pas aux exigences de la technique routière saharienne TRS, catalogue de dimensionnement des chaussées neuves et le guide technique routière GTR.

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

CHAPITRE III :
LES EFFETS DE TRAITEMENT
DE LA MARNE AVEC LE
CIMENT

III-1. Introduction :

Dans tous les domaines, le monde a connu de très grands progrès scientifiques et techniques. En ce qui concerne les conceptions des routes, celles des structures des chaussées, et les exigences sur les matériaux utilisés dans la construction routière ont connu aussi une nouvelle ère.

Pour profiter au mieux des matériaux naturels on supporte le trafic qui est devenu plus intense et plus lourd. Il a fallu donc recourir aux traitements de ces matériaux par des liants (hydrauliques ou hydrocarbonés), afin d'améliorer leurs performances mécaniques.

Dans ce chapitre, nous avons envisagé d'étudier les traitements de notre matériau au liants hydrauliques tel que le ciment en vu d'observer :

- L'influence de traitement sur les limites d'Atterberg ;
- L'influence de traitement sur les caractéristiques de compactage (essais Proctor modifié) ;
- L'influence de traitement sur les caractéristiques immédiats (essais CBR immédiat et imbibé) ;
- L'influence de traitement sur le comportement mécanique (essais de compression simple).

Les teneurs en ciment retenues sont : 2, 4, 6 et 8%.

III-2 Présentation de liant utilisé :

Le ciment utilisé est un ciment de 42.5 R (voir photo III-1).



Photo III- 1 : Ciment R42.5

Grâce à la réaction chimique entre le ciment et l'eau (l'hydratation), le mélange tuff-ciment se transforme en pierre artificielle cohérente. On observe une transformation rapide du mélange après la mise en œuvre, c'est la prise. Après cette phase commence le durcissement qui est relativement lente et dure plusieurs années.

L'incidence de ces réactions porte sur la stabilité immédiate, les performances mécaniques à long terme et la tenue à l'immersion.

III-3 L'influence de traitement au ciment sur les limites d'Atterberg:

L'essai est réalisé selon la norme NFP 94-051, sur la fraction inférieure à 0,4mm. Pour la limite de liquidité nous avons utilisé la coupelle rugueuse. Le tableau III-1 résume les résultats de cet essai.

Tableau III-1. Valeur de limites d'Atterberg du marne Ouade Nechou avec et sans traitement au ciment.

	LL	LP	IP
Marne brute	43.5	19.15	24.35
Marne+ 2% ciment	45.19	22.47	22.72
Marne+ 4% ciment	36.27	1420	22.07
Marne+ 6% ciment	41.35	20.22	21.13
Marne+ 8% ciment	39.54	18.66	20.88

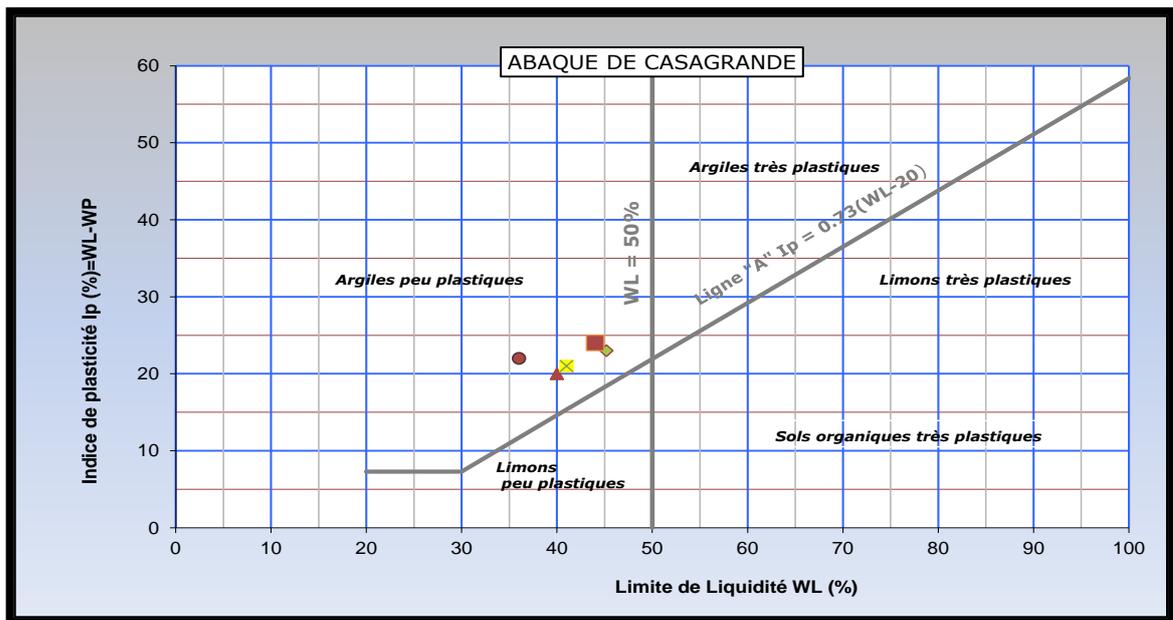


Figure III-1- Abaque de casagrande des mélanges marne et (2.4.6.8) % de ciment

	Marne brute
	Marne + 2% ciment
	Marne + 4 % ciment
	Marne + 6 % ciment
	Marne + 8 % ciment

D'après la figure III-1, Nous remarquons que le traitement au ciment améliore la plasticité du matériau.

III-4 l'influence de traitement au ciment sur les caractéristiques de compactage :

L'essai Proctor modifier a été effectué sur la marne traitée à différents dosages de ciment (2%, 4%, 6% et 8%). 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 (γ_{dmax}).

Les résultats de l'essai Proctor modifié sont représentés dans la figure (III-2). Les valeurs de la teneur en eau optimale et de la densité sèche maximale obtenus pour les différents dosage de ciment sont représentés dans le tableau III-3 .

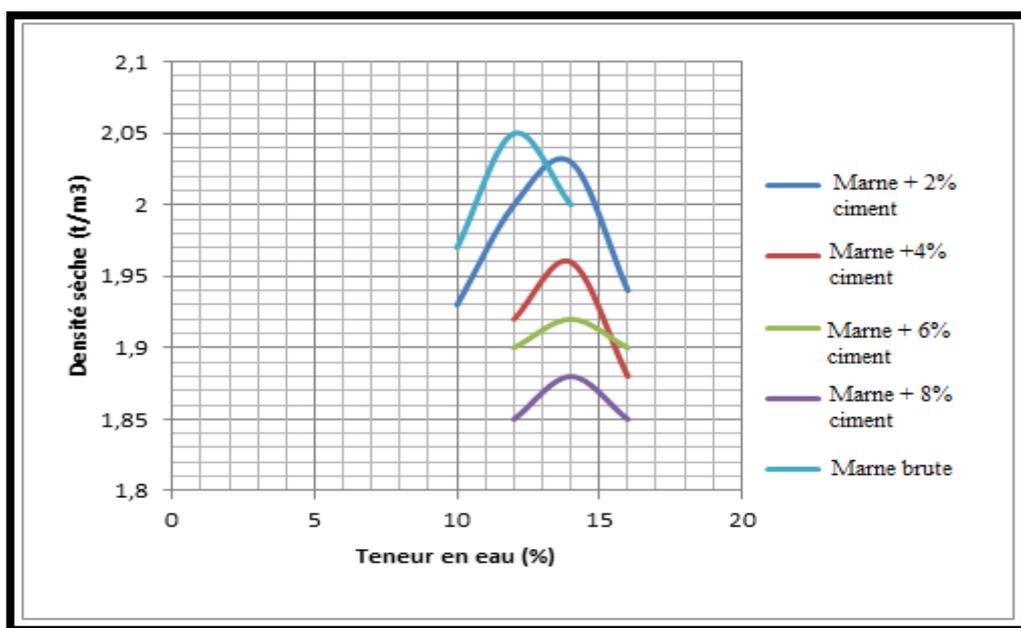


Figure III-2 : les courbe Proctor modifié des mélanges marne et ciment

Tableau III-2 : Caractéristiques de compactage avant et après le traitement de la marne traitée avec le ciment.

	γ_d max (t/m ³)	W _{opm} (%)
Marne brute	2.05	12.01
Marne + 2% ciment	2.03	13.5
Marne + 4% ciment	1.96	13.9
Marne + 6% ciment	1.92	13.95
Marne + 8% ciment	1.88	14.01

Interprétations :

D'après ces résultats, nous constatons que le traitement au ciment conduit à :

- Une augmentation de la teneur en eau optimale. Cette augmentation est proportionnelle avec le dosage des liants (tableau III-2), elle atteint son maximum (14%) dans le cas du traitement avec 8% de ciment. Ainsi les courbes sont décalées vers la droite ;
- Abaissement de la densité sèche maximale ;
- Aplatissement de la courbe Proctor (diminution de la sensibilité de la densité sèche maximale vis-à-vis de la teneur en eau optimale).

III-5 Etude de le traitement au ciment sur la stabilité immédiate :

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 III-3 ; III-4) représentent la variation de la pression du piston en fonction de son enfoncement (Immédiat et imbibé) de notre échantillon traité.

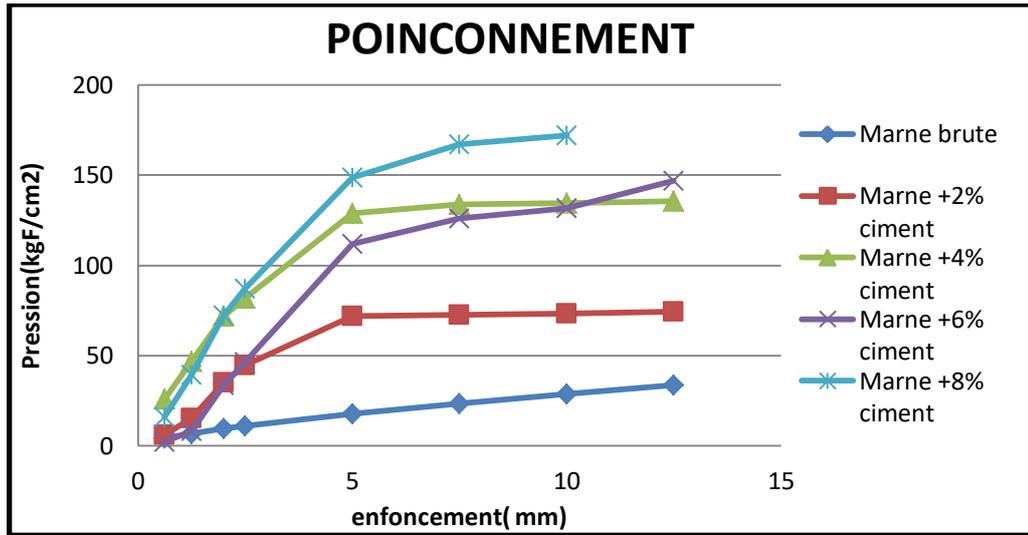


Figure III -3 : Variation de la pression en fonction de son enfoncement (imbibé) pour la marne traitée au ciment

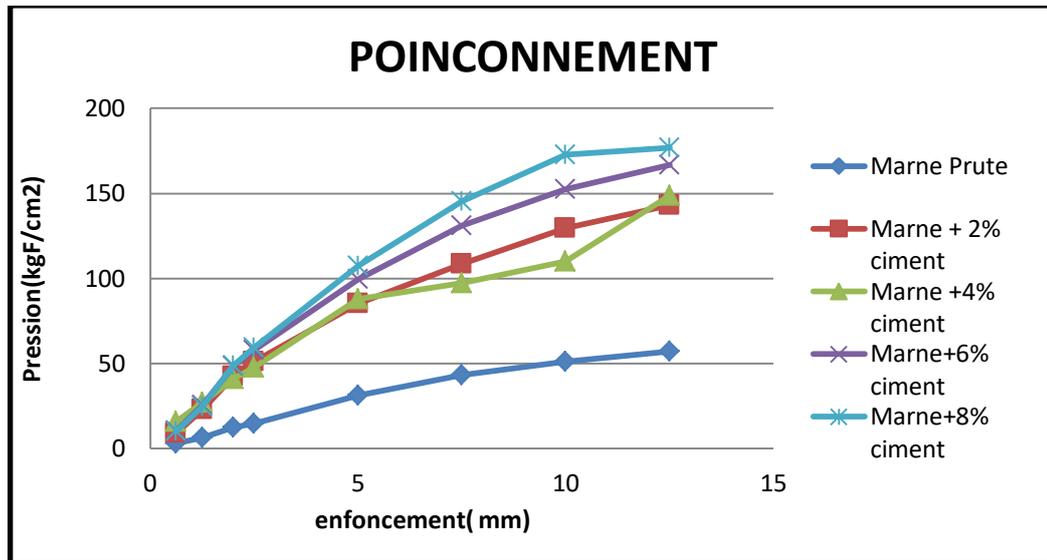
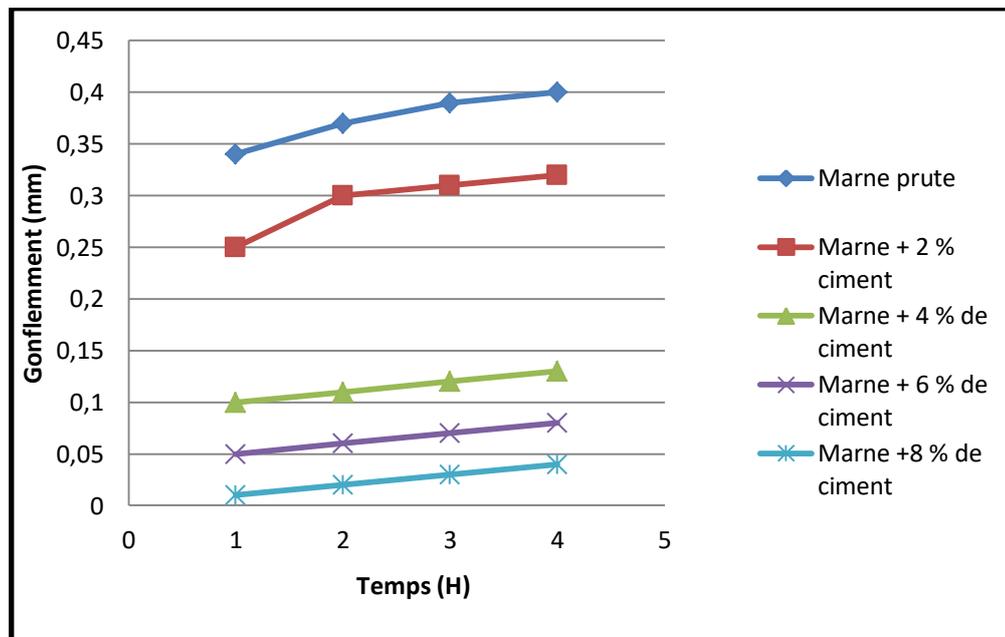


Figure III -4 Variation de la pression en fonction de son enfoncement (immédiat) pour la marne traitée au ciment

Les valeurs des indices CBR immédiat et imbibé pour les différents teneurs en ciment sont représentés dans le tableau III-4. la variation de gonflement de la marne avec et sans traitement ,en fonction de temps, est représentée dans la figure III-5 .

Tableau III 3- : Valeurs des indices portant avant et après le traitement de la marne traitée avec le ciment.

CBR	Immédiate	Imbibé 4H
Marne brute	29.9	16.9
2% de ciment	81.2	68.43
4% de ciment	83.7	122.7
6% de ciment	94.95	106.5
8% de ciment	102.38	141.61

**Figure III -5** : Variation de gonflement en fonction de temps.**Interprétations :**

Les résultats du tableau III-4 mettent en évidence que le dosage des stabilisants influence directement sur l'indice CBR ; notamment l'indice CBR après immersion. A titre d'exemple après traitement de notre matériau avec 8% de ciment l'indice CBR après immersion est multiplié par plus de 8 fois (un gain de 740%). Le gonflement est réduit suite à l'augmentation de dosage en ciment.

Si on compare ces résultats avec les valeurs du Tableau III-05, comportant le référentiel de l'indice de portance immédiat, nous constatons que le traitement améliore la compactibilité et la traficabilité.

L'amélioration considérable de la portance s'explique par la faible teneur de l'argile dans notre échantillon, ce qui permet aux constituants hydratés du ciment à enrober et relier les grains entre eux en formant des sortes de ponts de plus en plus nombreux et solides (plus le sol est argileux, plus le ciment a du mal à enrober et à lier ses particules).

Tableau III-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

Les figures III-6 et III-7 représentent les gains de l'ICBR immédiat et après immersion qui s'exprime par la relation $G = (ICBR_{ap} - ICB_{rav}) / ICB_{rav}$

Où : $ICBR_{rav}$: L'indice portance avant le traitement ;

$ICBR_{ap}$: L'indice portance après le traitement.

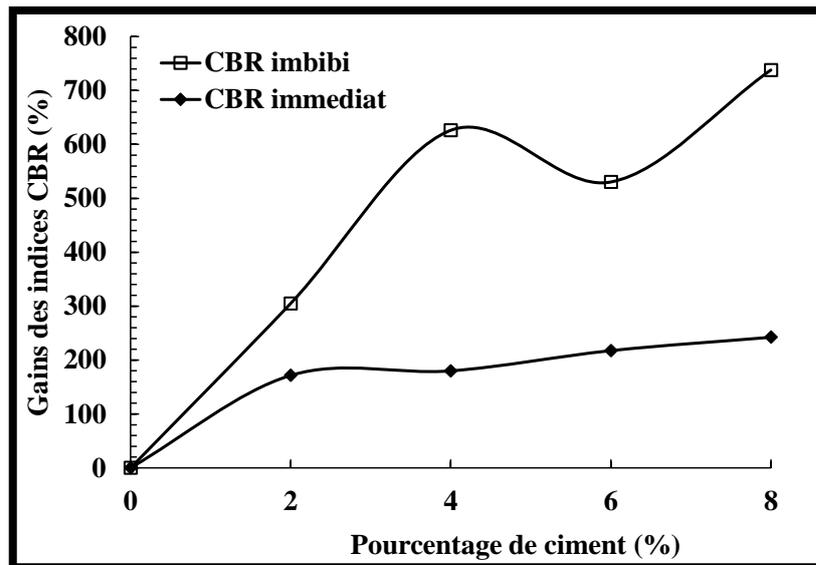


Figure III-6 : Gains de l'ICBR immédiat et imbibé de la marne traitée.

III-6 L'influence de traitement au ciment sur la résistance à la compression :

Les matériaux fins acquièrent, après compactage puis dessiccation prolongée, une forte cohésion, ce phénomène est appelé auto stabilisation ou durcissement ou encore effet de prise. Toutefois cette cohésion ne doit pas être considérée comme une stabilisation permanente du matériau, car elle baisse considérablement quand le degré de saturation augmente et disparaît quasi totalement par saturation totale.

C'est ainsi l'évolution des caractéristiques mécaniques avec l'âge des marnes compactés qui laisse penser à l'existence d'une prise, évidemment pas comme celle des liants tels que le ciment, la chaux et le plâtre, où se produisent des liaisons rigides, souvent irréversibles et durables.

- Après compactage et séchage, les couches d'encroûtements calcaires durcissent. C'est dans la partie supérieure de la couche que le phénomène est plus important. Sous réserve que la couche soit protégée de l'eau (couche de roulement étanche et drainage efficace), ce durcissement se conserve voire s'accroît dans le temps ;
- Le durcissement disparaît si, faute des dispositions constructives nécessaires, la couche de tufs voit sa teneur en eau fortement augmenter ;
- Le durcissement est très inégal selon le gisement utilisé ;

- L'importance de ce durcissement influence le comportement dans le temps et sous le trafic des chaussées réalisées. Les chaussées sur lesquelles ce durcissement est le plus net se comportant mieux ;

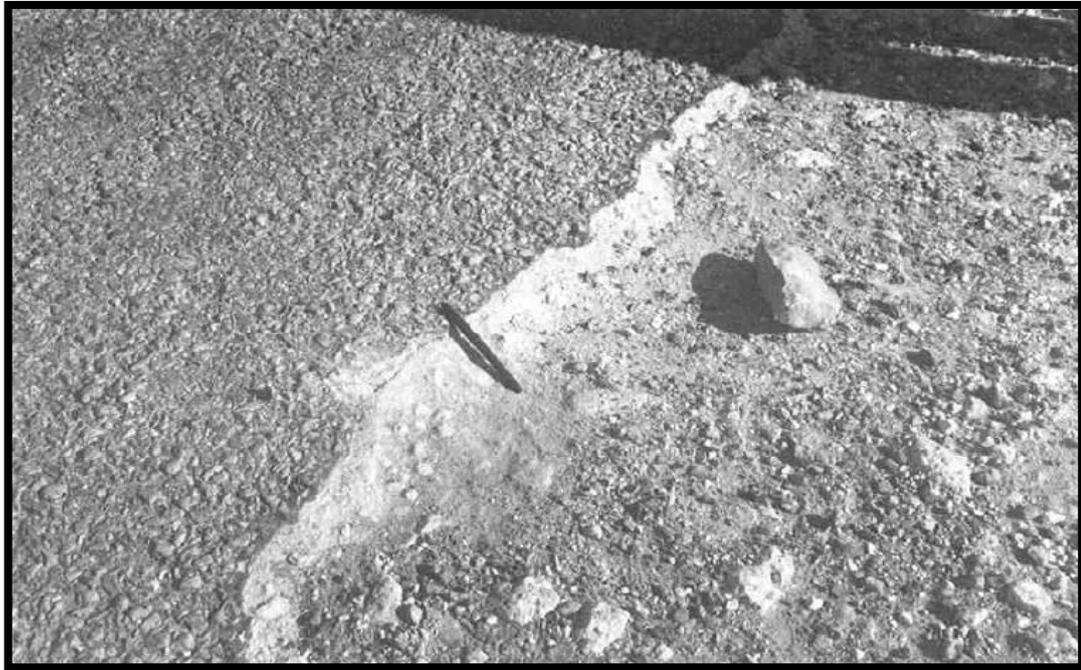


Photo III-2 : Constatation sur le bord de la chaussée, en enlevant la couche d'enduit, que la couche de tuf est devenue très dur en surface (route Gallela-sedouikech en Tunisie).

Ce phénomène de prise a été attribué par les premiers ingénieurs qui ont utilisé ces matériaux, à une dissolution partielle du calcaire et/ou du gypse dans l'eau de compactage, puis sa recristallisation lorsque l'eau s'évapore.

En effet, plusieurs travaux de recherches réalisés sont tenté d'expliquer ce phénomène, chacun par sa méthode et selon les moyens disponibles (Alloul B. 1981, Ben Dhia M. 1983, Morsli M. 2007) ; nous citons :

- **Poton :** Le durcissement est dû à une dissolution possible d'une partie de Calcite lors de l'imbibition et du compactage et recristallisation après séchage. (Cité par Boukezzi, 1997).
- **Alloul :** Le durcissement constaté est dû uniquement à un arrangement des grains lors de l'imbibition et du compactage. (Alloul, 1981).
- **Ben Dhia :** L'auto stabilisation est due à une dissolution partielle du carbonate de calcium sous l'action d'eau et du CO_2 et à sa recristallisation après dessiccation. (Ben Dhia M. 1983).

L'essai le plus courant pour produire ce phénomène consiste à mesurer les résistances à la compression en fonction du temps sur des éprouvettes compactées.

Cet essai est un indice permettant d'évaluer la cohésion des matériaux compactés (Fenzy E. 1966, Ben Dhia M. 1983, Morsli M. et al. 2007, Goual I. et al. 2012, Daheur E.G. et al. 2015), introduit pour les matériaux locaux la première fois par FENZY (1957), il est réalisé sur tous les matériaux sahariens sur la fraction $< 5\text{mm}$. Le compactage à l'OPM est effectué à la presse et les éprouvettes démoulées sont séchées à l'étuve à 55°C pendant 48h (éprouvettes de 5cm de diamètre et 10 cm de hauteur).

Dans notre cas, l'essai est effectué sur la fraction 0/5 de la marne. Une série d'éprouvettes cylindriques de dimensions ($\varnothing = 5\text{cm}, H = 10\text{cm}$), sont confectionnées dans les conditions de l'OPM (w_{opm} et γ_{dmax}). Le compactage est réalisé selon la norme NFP 98- 230-2. Les étapes de compactage ainsi que de l'écrasement des éprouvettes ont été déjà expliquées dans le chapitre précédent.

La fabrication des éprouvettes comporte les trois phases suivantes :

- Fabrication d'un mélange homogène du Marne + ciment + eau ;
- Compactage statique à l'aide d'une presse hydraulique ;
- Démoulage et conservation à l'aire libre.

Le malaxage a été réalisé manuellement en plusieurs fois par criblage dans un tamis de 5 mm de diamètre, dans le but d'avoir un Mélange homogène.

Après le séchage en étuve à 55°C pendant 48heures, 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. La valeur de la résistance à la compression simple représentée, est la lecture moyenne de trois éprouvettes pour chaque compacité.

La figure III-7 représente l'influence de traitement au ciment sue la résistance à la compression.

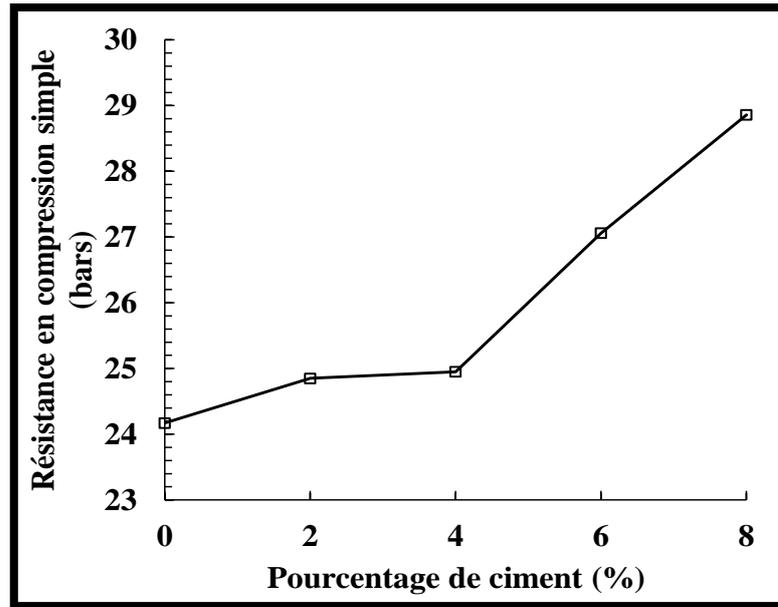


Figure III-7 : Influence de la teneur en ciment sur la résistance à la Compression.

La figure III-8 représente les gains de la résistance à la compression pour chaque durée de conservation à l'air libre qui s'exprime par la relation $G = (Rap - Rav) / Rav$.

Où : Rav : La résistance à la compression avant le traitement ;

Rap : La résistance à la compression après le traitement.

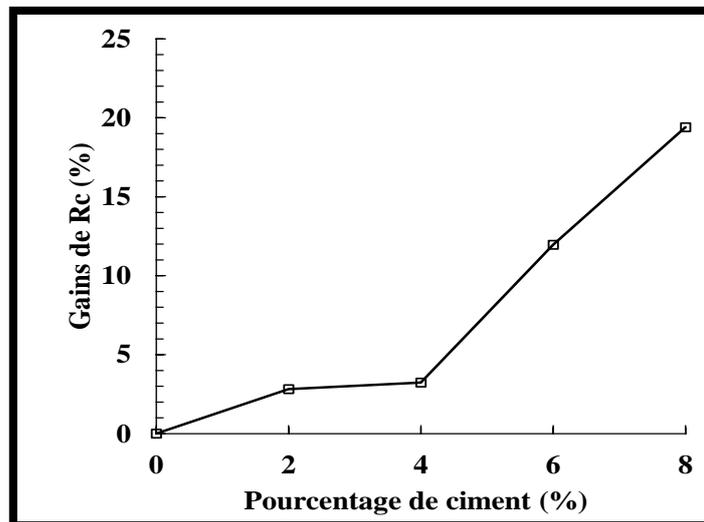


Figure III-8 : Gains de résistance à la compression en fonction de la teneur en ciment.

Interprétation :

Les résultats obtenus montrent que la résistance à la compression est améliorée considérablement suite au traitement. Par exemple, après le traitement par 8% de ciment, la

résistance augmente de 24,17 bars à 28,86 bars (un gain de 20%). Cette forte valeur s'explique par le durcissement du ciment et la naissance de certains nombres de constituants hydratés du ciment qui enrobent et relient les grains entre eux.

III-7 Conclusion :

Dans ce dernier chapitre nous avons vu l'influence du traitement au ciment, sur la plasticité, les caractéristiques de compactage et de portance et sur l'évolution de la résistance à la compression de notre échantillon. 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 réduit la plasticité et améliore la compactibilité et la traficabilité. En effet les indice CBR immédiat et imbibé sont augmentés considérablement.

L'étude de l'effet des traitements sur les performances mécaniques montrent que le dosage en stabilisants influe directement et positivement sur les qualités de notre échantillon. Mais ces améliorations restent limitées une fois comparées à celles des graves traités au ciment.

CONCLUSION GENERALE

CONCLUSION GENERALE

Nos travaux qui ont essentiellement portés sur l'étude de la possibilité d'intégration de la marne de la région d'Oued Nechou dans les corps de chaussées.

Une étude expérimentale déroulée au laboratoire des travaux public de sud (LTPS) à travers laquelle nous avons tenté, dans les limites de temps et de moyens qui nous ont été disponibles, de mieux connaître la nature et le comportement de notre matériau d'étude sans et avec le traitement au ciment.

L'identification géotechnique des matériaux de base nous à montrer que :

La marne est un matériau de nature chimique carbonaté, il a une courbe granulométrique très étalée avec un taux de fine important, sa plasticité est moyenne, elle caractérise une argile peu plastique. La densité sèche maximale de ce matériau est de 2.05 t /m³ pour une teneur en eau optimale de 12.01%. Les indices portant immédiat et après imbibition pendant 4 heures sont respectivement 29.91 et 16.93%, la résistance à la compression simple pour une compacité de 95% est de l'ordre de 1.7 MPa.

Nous avons vu 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 et la portance) par rapport aux matériaux routiers habituels.

Concernant l'étude de traitement, le but est la recherche d'une formule optimale (marne + ciment) pouvant être utilisé en couches de base et de fondation en assise des chaussées à faible, moyen et fort trafic.

Nous avons vu lors du compactage que l'ajoute du ciment a la marne, conduit à une diminution la densité sèche optimale, une augmentation de la teneur en eau optimale et une diminution de la sensibilité de la densité sèche maximale vis-à-vis de la teneur en eau optimale.

Les résultats de comportement mécanique montrent que la résistance à la compression est améliorée considérablement suite au traitement.

D'après notre étude, nous ne pouvons pas confirmer ou infirmer l'utilisation des marnes, traités ou non traités, dans la construction des routes à moyen et fort trafic. Pour cela il est évident que des études complémentaires doivent être réalisées :

Conclusion générale

- l'étude de comportement avec ou sans traitement à long terme ;
- dimensionnement des structures des chaussées avec les logiciels disponibles (Alize et Plaxis) ;
- la recherche d'autres procédés de traitement avec d'autres types de liants (laitiers, cendres volantes,...).

REFERENCES

BIBLIOGRAPHI

Les références bibliographie.

AFNOR NF P 18-573 : Granulats- Essai los Angeles.

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

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

AFNOR NFP 94-051 : sols : Reconnaissance et essai –Détermination des Limites d'Atterberg-de liquidité à la coupelle - Limite de plasticité au rouleau.

AFNOR NFP 94-056 : sols : Reconnaissance et essai-Analyse granulométrique -Méthode par Tamisage à sec après lavage.

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

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 à la tâche.

AFNOR NFP 94-078 : sols : Reconnaissance et essai-Indice CBR après immersion-Indice CBR immédiate-Indice portant immédiat mesure sur échantillon compacte dans le moule CBR.

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

Ben Dhia M. 1983 : «Les tufs et encroûtements calcaires en Tunisie et dans le monde » **Tunisien**

Boukezzi, 1997 : « Etudes des calcaires utilisation en construction routière » **USTOMB.**

Caban Nicolas (2004), « Sols traités à la chaux et aux liants hydrauliques : Contribution à l'identification et à l'analyse des éléments perturbateurs de la stabilisation »,

Claude Hugo Koubikana Pambou « Développement d'un catalogue de conception des chaussées pour les pays sub –saharien» Montréal ,le 14 juin 2013

DAHEUR El hadj Guesmia ; CHERIF Miloud « Comportement mécanique d'un mélange Tuf -Sable calcaire sans et avec traitement à la chaux et/ou ciment », thèse de magistère de l'université de Amar Telidji Laghouat.

DELAHAYE, Daniel et MALET, Jean-Philippe, «Les "glissements de type écoulement" dans les marnes noires des Alpes du Sud. Morphologie, fonctionnement et modélisation hydromécanique», Géomorphologie : relief, processus, environnement, vol. 10, n°4, 2004, p. 317-319 .

Domce.M. (1980) : « construction des chaussées au Sahara », Rapport technique du laboratoire centrale des travaux publics, Alger, septembre.1980.

Dupain R., Lanchon R., Arroman J-C., 1995 « Granulats, Sols, Ciments et Bétons: caractérisation des matériaux de génie civil par les essais au laboratoire ». Collection A. Capliez, EDUCATIVE.

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

Fumet P. (1959), « Chaussées en sable gypseux et en sables stabilisés chimiquement », Revue générale des routes et aérodromes, Numéro spécial «Sahara »

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

Jeuffroy G. « Conception et construction des chaussées », Tome II, cours de LNPC Edition EYROLLES, 1985.

M. Gunther GIDEL « COMPORTEMENT ET VALORISATION DES GRAVES NON TRAITÉES CALCAIRES UTILISÉES POUR LES ASSISES DE CHAUSSÉES SOUPLES»
27 septembre 2001 l'université de Bordeaux I

Mellal Fatima. (2009) : « Etude du comportement physicochimique et mécanique d'un remblai routier marneux amélioré par la chaux éteinte Cas de l'autoroute Est-Ouest tronçon Oued Fodda /Khemis Miliana», Mémoire de Magister .Université H assiba Ben-Bouali - Chlef.

SETRA-LCPC (1992), « Guide technique : Réalisation des remblais et des couches de forme (GTR) ».

SETRA-LCPC (1994), « Guide technique : Conception et dimensionnement des structures de chaussées ».

SETRA-LCPC (2000), « Guide technique : Traitement des sols à la chaux et /ou aux liants hydrauliques », jan. 2000.

Taibi R., (1985) « Stabilisation des sols par des liants hydrauliques : Modélisation du comportement mécanique ». Thèse de D^r. Ing, INSA de Lyon.

Touat. T. (1994) : « Particularité de dimensionnement des chaussées dans le contexte saharien », IIème séminaire : les techniques routières sahariennes, Beni Abbés.

Venuat M., (1980) « Le traitement des sols à la chaux et au ciment ». Paris, 1^{ère} Edition.

Les articles en lignes :

Larbi Abid , La couverture sanitaire de la wilaya de Ghardaïa [en ligne]

http://www.santemaghreb.com/algerie/documentations_pdf/docu_69.pdf

ANNEXES

ANNEXE 01 : Analyses sédimentométrie

Durée de chute	Temps	Lecture de Densimètre R' R'=R-1000	t (°C)	Correction (c)	Lecture corrigée $R_1=R'+C$	% des éléments (D) sur l'ensemble de l'échantillon	D (mm)
30	8H20	20	26.4	+1.116	21.116	55	0.075
01	8H21	19	26.4	+1.116	20.116	52	0.055
02	8H22	18	26.4	+1.116	19.116	50	0.038
05	8H25	16	26.4	+1.116	17.116	45	0.025
10	8H30	14	26.4	+1.116	15.116	39	0.017
20	8H40	12	26.4	+1.116	13.116	34	0.012
40	9H00	09	26.4	+1.116	10.116	26	0.008
80	9H40	04	24.4	+0.664	4.664	22	0.006
160	10H40	02	24.4	+0.664	2.664	05	0.004
320	12H20	01	23.8	+0.748	1.748	04	0.003
1440	24H	0.5	28	+1.614	2.040	04	0.002
-	48H	00	-	-	-	00	0.001
-	-	-	-	-	-	-	0.0005

$R_1=R'+C$ SI $T > \text{à } 20 \text{ }^\circ\text{C}$

$R_1=R'-C$ SI $T < \text{à } 20 \text{ }^\circ\text{C}$

Annexe 02 :L'IMITE D'ATTERBERG

Marne brute :

Limite de liquidité :

Nombre de coups	20		24		30	
	t	q	h	x	B	s
N° de la tarre						
poids total humide	25,12	26,69	24	26,36	27,12	26,55
Poids total sec	21,2	21	21,86	22,4	22,66	22,86
Poids de la tarre	12	12,63	13,09	13,64	12,54	13,2
Poids de l'eau	3,92	5,69	2,14	3,96	4,46	3,69
Poids du sol sec	9,2	8,37	8,77	8,76	10,12	9,66
Teneur en eau (%)	42,61	67,98	24,40	45,21	44,07	38,20
Moyenne	55,29		34,80		41,13	
WL =	43,50					

N° de la tarre	Essai 1		Essai 2		Essai 3	
	b		t		f	
poids total humide	9,63		8,96		9,1	
Poids total sec	9,4		8,76		8,87	
Poids de la tarre	8,48		8,4		8,2	
Poids de l'eau	0,23		0,2		0,23	
Poids du sol sec	0,92		0,36		0,67	
Teneur en eau	25,00		55,56		34,33	
Teneur en eau (%)	12,50		27,78		17,16	
Moyenne	19,15					

LP **19,15**

Resultats LL = **43,50**

IP = **24,35**

LP = **19,15**

ANNEXE 03 : Essai Equivalent de sable .

Tableaux A1 : Résultats des essais

		Essai n° 1	Essai n° 2	Moyenne
Marne de ouad Nechou	h ₁ (cm)	30.5	28	10.71
	h ₂ (cm)	3	3	
	$ES = \frac{h_2}{h_1} * 100$	9.83	10.71	

ANNEXE 04: Essai volume au bleu de méthylène (marne)

Tableaux b1 : Résultats de volume au bleu de méthylène

Prise D'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 injecte dans la prise d'essai V = 125 cm³
 Valeur au bleu de la prise d'essai passant a :
 $V_b = V/Ms = 125 / 59.32 = 2.11$
 $VBt = VB * 100 / 100 = 1.27$

ANNEXE 05 : Essai Proctor modifié

Tableau b2 : Résultats echantillon N°01 –Marne ouad nechou

% d'eau	10		12		14	
Poids d'eau ajouté (g)	-		-		-	
Poids total humide (g)	3792		3909		3904	
Poids du moule(g)	1717					
Poids du sol humide(g)	2075		2192		2187	
Poids du sol sec (g)	1885		1955		1913	
Volume du moule (cm ³)	955					
N° de la tare	15	10	13	6	55	zt
Poids total humide (g)	103.7	107.1	29.22	85.19	77.5	79.94
Poids total sec (g)	95.9	99.02	23.16	78.01	70.05	72.17
Poids de la tare (g)	18.56	18.68	18.87	18.64	17.83	18.35
Poids de l'eau (g)	7.8	8.08	5.61	7.18	7.45	7.77
Poids du sol sec (g)	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
W _{moyenne} (%)	10.07		12.13		14.36	
Densité sèche (t / cm ³)	1.97		2.05		2.00	

$$[(P_{th} - P_{ts}) : P_s] \times 100 = \text{Teneur en eau (W)}$$

ANNEXE 06 : CBR Immédiat marne

Tableaux: Résultats de CBR Immédiat

enfoncement		LECTURE	VALEUR	PRESSION
0,625		0,609	62,118	3,165
1,25		1,268	129,336	6,590
2		2,401	244,902	12,479
2,5		2,845	290,19	14,787
5		6,043	616,386	31,408
7,5		8,316	848,232	43,222
10		9,869	1006,64	51,294
12,5		11,007	1122,71	57,208
A(2,5mm)	p2,5/0,7		21,12	
A(5mm)	p5/1,05		29,91	

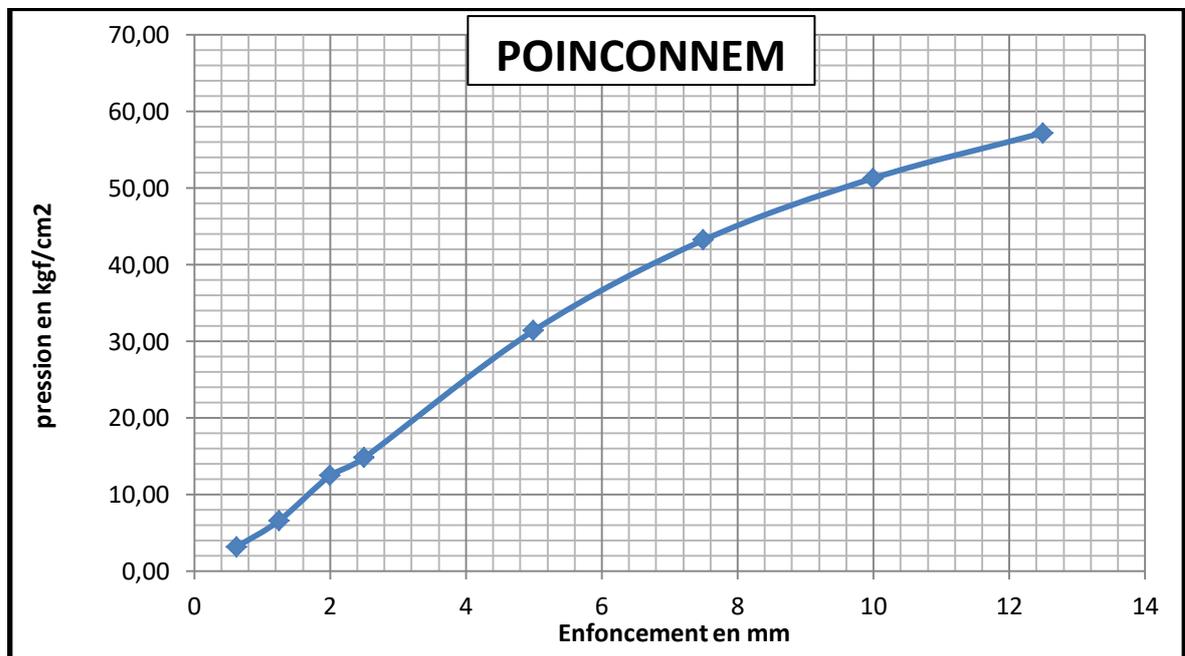


Figure 1 : Variation de la pression en fonction de son enfoncement (immédiat) pour marne

CBR Imbibé

Tableaux: Résultats de CBR Imbibé

enfoncement	LECTURE	VALEUR	PRESSION
0,625	0,818	83,436	4,252
1,25	1,313	133,926	6,824
2	1,875	191,25	9,745
2,5	2,131	217,362	11,076
5	3,42	348,84	17,775
7,5	4,519	460,938	23,487
10	5,540	565,08	28,794
12,5	6,5	663	33,783
A(2,5mm)	p2,5/0,7		15,82
A(5mm)	p5/1,05		16,93

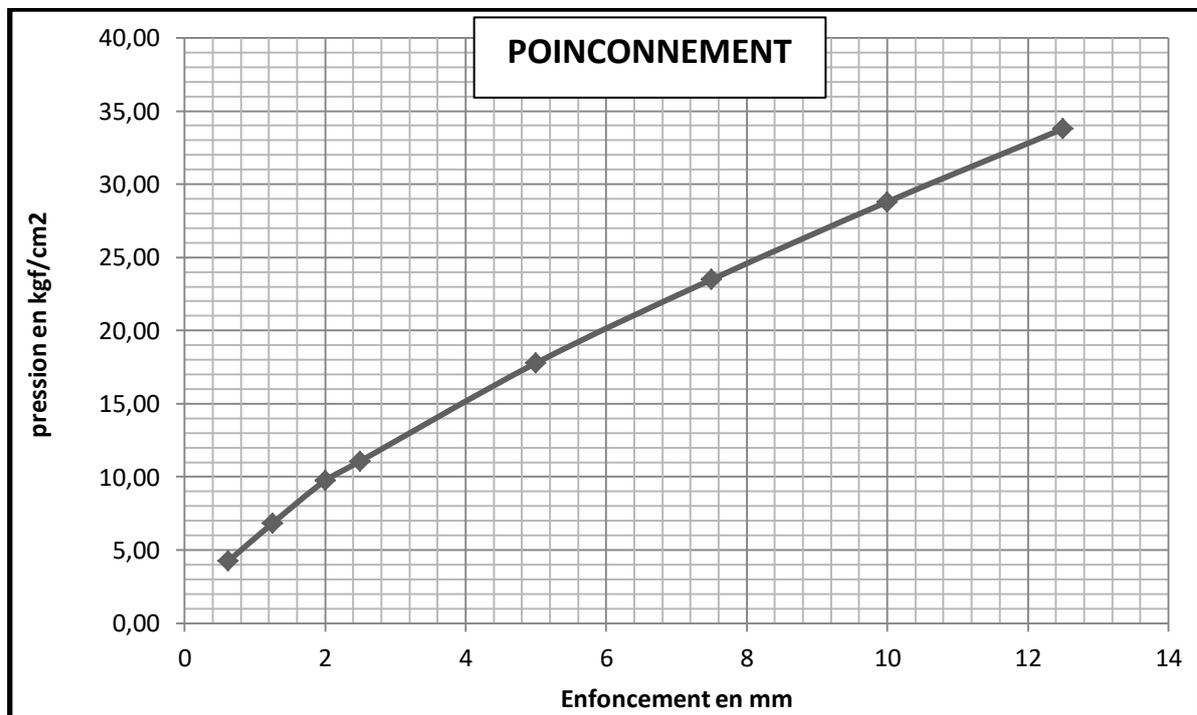


Figure 2: Variation de la pression en fonction de son enfoncement (imbibé) pour marne

ANNEXE 07 : Essai Los Angeles .

Tableaux A2 : Résultats des essais

Classe granulaire	Tamis Intermédiaire	Proportions %		Poids totale de mélange des proportions M(g)	Refus de Tamis 1.6mm M(g)	LA=100 *(M-m/M)
		Fraction 1	Fraction 2			
		16/25	25/31.5			
16/31.5	25	60%	40%	5000	2121	57.58%

la quantité : $\frac{100 m}{M}$

Où : m : Masse des éléments inférieurs à 1.6 mm.

M : Masse du matériau soumis à l'essai

Annexe 08 : LIMITE D'ATTERBERG

Avec 2% de ciment :

Limite de liquidité

Nombre de coups	19		26		30	
	C	ff	cz	c6	G	J
N° de la tarre						
poids total humide	12,03	12,7	12,64	13,08	13,85	13,46
Poids total sec	11,58	11	11	11,5	12,05	11,78
Poids de la tarre	7,8	7,81	7,79	8,46	8,52	8,5
Poids de l'eau	0,45	1,7	1,64	1,58	1,8	1,68
Poids du sol sec	3,78	3,19	3,21	3,04	3,53	3,28
Teneur en eau (%)	11,90	53,29	51,09	51,97	50,99	51,22
Moyenne	32,60		51,53		51,11	
WL =	45,19					

Limite de plasticité :

	Essai 1	Essai 2	Essai 3
N° de la tarre	89	v4	73
poids total humide	8,92	8,04	8,09
Poids total sec	8,79	7,94	7,98
Poids de la tarre	8,46	7,73	7,75
Poids de l'eau	0,13	0,1	0,11
Poids du sol sec	0,33	0,21	0,23
Teneur en eau	39,39	47,62	47,83
Teneur en eau (%)	19,70	23,81	23,91
Moyenne	22,47		

LP **22,47**

IP = 22.72

Liste des annexes

Avec 4% de ciment :

Limite de liquidité :

Nombre de coups	19		26		33	
	X1	FF	MS	5H	A1	N3
N° de la tarre						
poids total humide	14,67	14,43	14,97	16,64	16,81	14,83
Poids total sec	12,91	12,58	13,04	14,36	14,52	13,5
Poids de la tarre	8,46	7,81	7,95	8,4	8,31	8,44
Poids de l'eau	1,76	1,85	1,93	2,28	2,29	1,33
Poids du sol sec	4,45	4,77	5,09	5,96	6,21	5,06
Teneur en eau (%)	39,55	38,78	37,92	38,26	36,88	26,28
Moyenne	39,17		38,09		31,58	
WL =	36,27					

Limite de plasticité :

N° de la tarre	Essai 1		Essai 2		Essai 3	
	C		D		CZ	
poids total humide	8,53		8,72		8,51	
Poids total sec	8,38		8,52		8,34	
Poids de la tarre	7,8		7,83		7,78	
Poids de l'eau	0,15		0,2		0,17	
Poids du sol sec	0,58		0,69		0,56	
Teneur en eau	25,86		28,99		30,36	
Teneur en eau (%)	12,93		14,49		15,18	
Moyenne	14,20					

LP **14,20**

Résultats LL = **36,27**

IP = **22,07**

LP = **14,20**

Avec 6 % de ciment

Limite de liquidité

Nombre de coups	19		24		31	
	t	q	h	x	B	s
N° de la tarre						
poids total humide	12,36	13,55	13,17	12,65	14,86	13,4
Poids total sec	11,22	11,86	11,72	11,16	13,1	12,2
Poids de la tarre	7,7	8,46	8,53	8,56	7,78	8,41
Poids de l'eau	1,14	1,69	1,45	1,49	1,76	1,2
Poids du sol sec	3,52	3,4	3,19	2,6	5,32	3,79
Teneur en eau (%)	32,39	49,71	45,45	57,31	33,08	31,66
Moyenne	41,05		51,38		32,37	
WL =	41,35					

Limite de plasticité :

N° de la tare	Essai 1		Essai 2		Essai 3	
	b	m	t	h	f	k
poids total humide	9,63		8,96		9,1	
Poids total sec	9,4		8,76		8,75	
Poids de la tare	8,52		8,41		7,83	
Poids de l'eau	0,23		0,2		0,35	
Poids du sol sec	0,88		0,35		0,92	
Teneur en eau	26,14		57,14		38,04	
Teneur en eau (%)	13,07		28,57		19,02	
Moyenne	20,22					

LL = 41.35

Résultats

IP = 21,13

LP = 20,22

Avec 8% de ciment

Limite de liquidité

Nombre de coups	18		26		32	
	C6	BW	W1	73	V4	A
N° de la tare						
poids total humide	16,41	17,39	17,82	18,32	16,38	16,05
Poids total sec	14,08	14,83	15,18	15,27	14,02	13,94
Poids de la tare	8,46	8,53	8,52	7,74	7,72	8,4
Poids de l'eau	2,33	2,56	2,64	3,05	2,36	2,11
Poids du sol sec	5,62	6,3	6,66	7,53	6,3	5,54
Teneur en eau (%)	41,46	40,63	39,64	40,50	37,46	38,09
Moyenne	41,05		40,07		37,77	
WL =	39,54					

Limite de plasticité :

	Essai 1		Essai 2		Essai 3	
N° de la tare	V6		H3		PS	
poids total humide	9,73		9,32		9,15	
Poids total sec	9,19		9,19		9,01	
Poids de la tare	8,46		8,49		8,29	
Poids de l'eau	0,54		0,13		0,14	
Poids du sol sec	0,73		0,7		0,72	
Teneur en eau	73,97		18,57		19,44	
Teneur en eau (%)	36,99		9,29		9,72	
Moyenne	18,66					

LP 18,66

Résultats LL = 39,54

IP = 20,88

ANNEXE 09 : Essai Proctor modifié

Echantillon–MARNE +2 % DE CIMENT

% d'eau	10		12		14		16	
Poids d'eau ajouté (g)	255		306		357		402	
Poids total humide (g)	3725		3830		3893		3850	
Poids du moule(g)	1717							
Poids du sol humide(g)	2008		2113		2176		2133	
Poids du sol sec (g)	1846		1912		1944		1855	
Volume du moule (cm ³)	956							
N° de la tare	MS	XXL	S1	C6	A	B1	C9	15
Poids total humide (g)	141.82	147.76	144.88	148.77	104.83	81.81	152.51	161.19
Poids total sec (g)	132.09	137.17	132.7	136.62	95.39	75.03	135.09	142.41
Poids de la tare (g)	19.03	19.56	18.73	18.87	17.86	16.82	18.36	18.08
Poids de l'eau (g)	9.73	10.59	12.18	12.15	9.44	6.78	17.42	18.78
Poids du sol sec (g)	113.06	117.61	113.97	117.75	77.53	58.21	116.73	124.33
Teneur en eau (%)	8.61	9	10.69	10.32	12.18	11.65	14.92	15.10
W _{moyenne} (%)	8.81		10.50		11.91		15.01	
Densité sèche (g / cm ³)	1.93		2		2.03		1.94	

Echantillon–MARNE +4 % DE CIMENT

% d'eau	12		14		16	
Poids d'eau ajouté (g)	312		364		416	
Poids total humide (g)	3772		3833		3782	
Poids du moule(g)	1717					
Poids du sol humide(g)	2055		2116		2065	
Poids du sol sec (g)	1838		1877		1800	
Volume du moule (cm ³)	956					
N° de la tare	W4	XL	M1	Cz	A1	N4
Poids total humide (g)	144.33	143.57	156.69	135.06	154.68	126.51
Poids total sec (g)	131.05	130.23	141	122.06	137.14	112.72
Poids de la tare (g)	18.25	18.07	18.87	18.88	18.89	18.56
Poids de l'eau (g)	13.28	13.34	15.69	13	17.54	13.79
Poids du sol sec (g)	112.8	112.16	122.13	103.18	118.26	94.16
Teneur en eau (%)	11.77	11.89	12.85	12.6	14.83	14.65
W _{moyenne} (%)	11.83		12.72		14.74	
Densité sèche (g / cm ³)	1.92		1.96		1.88	

Echantillon –MARNE +6 % DE CIMENT

% d'eau	12		14		16	
Poids d'eau ajouté (g)	318		371		424	
Poids total humide (g)	3804		3859		3772	
Poids du moule(g)	1717					
Poids du sol humide(g)	2011		2066		2055	
Poids du sol sec (g)	1818		1838		1813	
Volume du moule (cm ³)	956					
N° de la tare	W41	XL	S5	Cz	zt	E7
Poids total humide (g)	141.1	129.12	127.61	142.55	121.08	108.22
Poids total sec (g)	129.51	118.38	115.54	128.93	109.32	97.49
Poids de la tare (g)	18.65	18.2	18.62	18.77	20.1	18.37
Poids de l'eau (g)	11.59	10.74	12.07	13.62	11.76	10.73
Poids du sol sec (g)	110.86	100.18	96.92	110.16	89.22	79.12
Teneur en eau (%)	10.45	10.72	12.45	12.36	13.18	13.56
W _{moyenne} (%)	10.59		12.41		13.37	
Densité sèche (g / cm ³)	1.90		1.92		1.90	

Echantillon–MARNE +8 % DE CIMENT

% d'eau	12		14		16	
Poids d'eau ajouté (g)	324		378		432	
Poids total humide (g)	3694		3756		3749	
Poids du moule(g)	1717					
Poids du sol humide(g)	1977		2039		2032	
Poids du sol sec (g)	1767		1799		1771	
Volume du moule (cm ³)	956					
N° de la tare	xxl	zt	S5	N4	fx	S1
Poids total humide (g)	137.22	156.66	131.68	130.75	154.68	126.51
Poids total sec (g)	124.26	142.4	118.08	117.8	137.14	112.72
Poids de la tare (g)	18.62	18.78	18.19	18.88	18.89	18.56
Poids de l'eau (g)	12.96	14.26	13.6	12.95	17.54	13.79
Poids du sol sec (g)	105.64	123.62	99.89	98.92	118.26	94.16
Teneur en eau (%)	12.27	11.54	13.61	13.09	14.83	14.65
W _{moyenne} (%)	11.90		13.35		14.74	
Densité sèche (g / cm ³)	1.85		1.88		1.85	

Annexe 10: CBR Immédiat marne et ciment

Avec 2% de ciment

enfoncement		LECTURE	VALEUR	PRESSION
0,625		1.735	178.81	9.11
1,25		4.403	449.11	22.88
2		8.2	836.4	42.62
2,5		9.871	1006.84	51.30
5		16.403	1673.11	85.25
7,5		20.904	2132.21	108.65
10		24.905	2540.31	129.44
12,5		27.522	2807.24	143.04
A(2,5mm)	p2,5/0,7		73.3	
A(5mm)	p5/1,05		81.2	

Avec

enfoncement		LECTURE	VALEUR	PRESSION
0,625		3.075	313.65	16
1,25		5.273	534.174	27.22
2		7.9	805.8	41.06
2,5		9.16	934.32	47.61
5		16.903	1724.11	87.85
7,5		18.734	1910.87	97.37
10		21.19	2161.4	110.13
12,5		28.59	2916.86	148.63
A(2,5mm)	p2,5/0,7		68	
A(5mm)	p5/1,05		83.7	

4% de
ciment :

Liste des annexes

Avec 6 % de ciment :

Enfoncement (mm)	lecture	valeur	Pression (kgF/cm ²)
0.625	2.08	212.16	10.81
1.25	4.92	502.04	25.581
2	9.33	951.66	48.492
2.5	11.16	1138.32	58
5	19.18	1956.36	99.7
7.5	25.2	2570.4	130.98
10	29.36	2994.72	152.6
12.5	32.08	3272.16	166.73
A(2.5 cm)	P(2.5)/0.7	82.86	
A(5cm)	P(5)/1.05	94.95	

Avec 8 % de ciment :

Enfoncement (mm)	lecture	valeur	Pression (kgF/cm ²)
0.625	1.98	201.96	10.3
1.25	4.80	489.80	24.96
2	9.4	958.8	48.86
2.5	11.46	1168.92	59.56
5	20.68	2109.46	107.5
7.5	27.98	2853.96	145.42
10	33.21	3387.42	172.61
12.5	34.06	3474.12	177.02
A(2.5 cm)	P(2.5)/0.7	85.09	
A(5cm)	P(5)/1.05	102.38	

CBR imbibition marne et ciment

Avec 2 % de ciment :

Enfoncement (mm)	lecture	valeur	Pression (kgF/cm ²)
0.625	1.17	119.34	6.08
1.25	2.989	304.88	15.36
2	6.74	687.48	35.03
2.5	8.627	879.95	44.84
5	13.826	1410.25	71.86
7.5	14.013	1429.33	72.83
10	14.122	1440.44	73.4
12.5	14.3	1458.6	74.32
A(2.5 cm)	P(2.5)/0.7	64.06	
A(5cm)	P(5)/1.05	68.43	

Avec 4 % de ciment :

Enfoncement (mm)	lecture	valeur	Pression (kgF/cm ²)
0.625	4.998	509.8	25.98
1.25	9.003	918.31	46.79
2	13.820	1409.64	71.83
2.5	15.732	1604.66	81.77
5	24.701	2519.50	128.82
7.5	25.75	2626.5	133.83
10	25.881	2639.86	134.51
12.5	26.09	2661.28	135.61
A(2.5 cm)	P(2.5)/0.7	116.81	
A(5cm)	P(5)/1.05	122.7	

Liste des annexes

Avec 6 % de ciment :

Enfoncement (mm)	lecture	valeur	Pression (kgF/cm ²)
0.625	0.46	46.92	2.4
1.25	1.56	159.12	8.108
2	6.48	660.96	33.7
2.5	8.952	913.104	46.53
5	21.51	2193.82	111.79
7.5	24.27	2475.54	126.14
10	25.36	2586.72	131.81
12.5	28.21	2877.42	146.62
A(2.5 cm)	P(2.5)/0.7	66.47	
A(5cm)	P(5)/1.05	106.5	

Avec 8 % de ciment :

Enfoncement (mm)	lecture	valeur	Pression (kgF/cm ²)
0.625	3.1	316.2	16.11
1.25	7.58	773.5	39.41
2	13.911	1418.82	72.3
2.5	16.72	1705.54	87
5	28.61	2918.12	148.7
7.5	32.15	3279.09	167.09
10	33.08	3374.16	171.93
12.5	-	-	-
A(2.5 cm)	P(2.5)/0.7	124.3	
A(5cm)	P(5)/1.05	141.61	

