

République Algérienne Démocratique 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 d'hydraulique et génie civil

Mémoire présenté en vue de l'obtention du diplôme de

**MASTER**

**Domaine :** *Sciences et Technologies*

**Filière :** Génie Civil

**Spécialité :** *Structure*

**Par :** Dahma Mahmoud  
Salmi Anes

**Thème**

Comportement d'un mélange Marne-Sable calcaire de la région  
de Ghardaïa : Application en construction routière saharienne

Soutenu publiquement le 30/09/2020

Devant le jury :

**ZERZOUR A.**

**Professeur**

Ghardaïa

**Président**

**Mr. DEMDOUM A.**

**Doctorant**

Laghouat

**Examineur**

**Mr. DAHEUR E.G.**

**M.C.B**

Ghardaïa

**Encadreur**

Année universitaire 2019/2020

# DEDICACE

*J'ai toujours pensé à faire ou offrir quelque chose à ma mère en  
signe de reconnaissance pour tout ce qu'elle a consenti comme efforts,  
rien que pour me voir réussir, et voilà, l'occasion est venue.*

*À celle qui m'a donné la vie, symbole de beauté, et de fierté, de sagesse  
et de patience.*

*À celle qui est la source de mon inspiration et de mon courage, à qui je dois de  
l'amour et de la reconnaissance.*

*À ma très chère Mère, qui me donne toujours l'espoir de vivre et qui n'a jamais  
cessé de prier pour moi. .*

*À mon exemple de vie mon très cher père pour son sacrifice, et encouragement  
durant toute période de mes études.*

*À mes chers frères et à Mes chères sœurs*

*À tous mes amis de l'université avec qui j'ai partagé les meilleurs moments de ma  
vie d'étude*

*À Tous Ceux que j'aime et je respecte.*

**DAHMA MAHMOUD**

**SALMI ANES**

# Remerciements

*Nous remercions tout d'abord notre Dieu qui nous a donné la force et la puissance pour terminer ce modeste travail.*

*Que la rédaction de ce mémoire soit pour nous l'occasion d'exprimer notre sincère gratitude à **Dr. daheur Elhadj Guesmia** pour son encadrement, son aide, son encouragement et son suivi avec bienveillance de ce travail. Veuillez, cher monsieur trouver dans ce rapport l'expression de notre profonde gratitude et nos respects le plus profond.*

*Notre profonde gratitude et reconnaissance s'adresse à **Mr. BOUDIAF Chikh** qui a accepté d'assurer nous encadrement au niveau de **LTPS GHARDAIA**, de nous avoir proposé le thème. On a largement bénéficié de sa démarche scientifique, ses précieux conseils et suggestions pendant ce projet. On ensuive reconnaissante pour son encouragement, il n'a pas cessé de nous guider et faciliter les notions tout en fournissant une atmosphère agréable pour le déroulement du stage.*

*Nous savons bien que vous avez toujours le cœur ouvert et plein de gentillesse, que Dieu vous protège. Les nouvelles générations ont besoin de votre empreinte professionnelle.*

*Nous tiens à remercier notre grande famille au LTPS, et surtout **Mme DAHMANE Hadjer**, **Mr. AMIEUR Abdel nacer** pour leurs conseils, leurs critiques et recommandations.*

*En effet, toutes les améliorations apportées à ce travail ne sont dues qu'à leurs qualités professionnelles.*

*Que tous ceux qu'on a oublié de citer ne nous en veillent pas et acceptent notre vif remerciement.*

**MERCI...**

## ملخص:

يبدو أن تميم المواد المحلية من أجل تلبية احتياجات المناطق الفقيرة من المواد النبيلة هو الحل الأنسب والاقتصادي لتقليل الاستهلاك المفرط للمواد النبيلة. حتى الآن، أتاحت الأبحاث التي أجريت في مختبرات وطنية مختلفة تحقيق أفضل استخدام للمواد المتاحة محلياً؛ لكن إدخال تقنيات جديدة لا يزال ضرورياً لاستكمال هذا البحث.

يقع عملنا ضمن هذا المنظور؛ أولاً، نقدم دراسة التعريف الجيوتقنية والمعدنية للمواد الأساسية (المارن والرمل الكلسي (3/0) من منطقة غرداية). تتكون المرحلة التجريبية الثانية من دراسة آثار إضافة الرمل الكلسي على الخواص الفيزيائية والميكانيكية للمارن (المرونة وخصائص الضغط والقدرة على التحمل وقوة الانضغاط). أظهرت النتائج المتحصل عليها أن الصيغة "80% مارن + 20% رمل كلسي" تؤخذ على أنها الصيغة المثلى التي تمنح أفضل الخصائص مقارنة بالمخاليط المدروسة.

**الكلمات المفتاحية:** مارن، المواد المحلية، تقنية الطرق، التثبيت، الجيوتقنيات للطرق الصحراوية، ...

## Résumé :

La valorisation des matériaux locaux en vue de répondre aux besoins des régions pauvres en matériaux nobles, semble la solution la plus adéquate et la plus économique pour réduire les consommations abusives des matériaux nobles. Jusqu'à présent, les recherches menées dans différents laboratoires nationaux ont permis d'utiliser au mieux les matériaux disponibles localement ; mais l'introduction des nouvelles techniques reste cependant nécessaire pour compléter ces recherches.

Notre travail rentre dans cette optique ; D'abord, on présente l'étude d'identification géotechnique et minéralogique des matériaux de bases (la Marne et le sable calcaire de fraction (0/3) de la région de Ghardaïa). La deuxième phase expérimentale consiste à étudier les effets de l'ajout de sable calcaire sur les propriétés physiques et mécaniques de la marne (l'élasticité, les caractéristiques de compactage et de portance et la résistance à la compression). Les résultats obtenus montrent que la formule « 80 % Marne + 20% sable calcaire » est prise comme une formule optimale qui confère les meilleures caractéristiques par rapport aux mélanges étudiés.

**Mots clés :** La Marne, matériaux locaux, technique routière, stabilisation ; géotechnique routière saharienne, ...

**Abstract:**

---

---

The valorisation of local materials in order to meet the needs of regions poor in noble materials seems the most adequate and economical solution to reduce the excessive consumption of noble materials. So far, research carried out in different national laboratories has made it possible to make the best use of locally available materials; but the introduction of new techniques is still necessary to complete this research.

Our work falls within this perspective; first, we present the geotechnical and mineralogical identification study of the basic materials (the Marne and the calcareous sand fraction (0/3) from the Ghardaïa region). The second experimental phase consists of studying the effects of the addition of calcareous sand on the physical and mechanical properties of the Marne (elasticity, the characteristics of compaction and bearing capacity and the compressive strength). The results obtained show that the formula “80% Marne + 20% limestone sand” is taken as an optimal formula which confers the best characteristics compared to the mixtures studied.

**Keywords:** Marne, local materials, road technique, stabilization; Saharan road geotechnics, ...

# SOMMAIRE

DEDICACE	
REMERCIEMENTS	
RESUME	
LISTES DES FIGURES	
LISTES DES TABLEAUX	
LISTES DES PHOTOS	

## INTRODUCTION GENERALE

### *Chapitre I : RECHERCHE BIBLIOGRAPHIQUE*

I.1 GENERALITES SUR LES MARNES.	3
I.1.1 Définition de la marne.	3
I.1.2 Développement de la marne.	3
I.1.3 Formation des marnes.	4
I.1.4 Classement des marnes en Algérie.	4
I.1.5 Genèse des marnes.	5
I.1.6 Dégradations qui peuvent engendrer par sols marneux.	5
I.2 DIFFERENTS ASPECTS DU CONTEXTE SAHARIEN.	7
I.2.1 Contexte climatique.	8
I.2.2 Sol support.	8
I.2.3 Trafic.	9
I.3 SYNTHÈSE DE QUELQUES SPECIFICATIONS POUR L'UTILISATION DES TUF D'ENCROUTEMENT	9
I.3.1 Technique routière saharienne (TRS).	12
I.3.1.1 Principes de la technique routière Saharienne.	12
I.3.1.2 Domaine d'application.	13
I.3.1.3 Critères de choix de matériaux pour couches de base et de fondation.	14
I.3.1.3.1 Matériaux à angle de frottement élevé.	14
I.3.1.3.2 Matériaux à « cohésion » élevée.	15
I.3.1.3.3 Matériaux intermédiaires.	16
I.3.1.4 Mode de construction des routes au Sahara.	16
I.3.1.4.1 Terrassements.	17
I.3.1.4.2 Couche de fondation.	17
I.3.1.4.3 Couche de base.	18
I.3.1.4.4 Couche de roulement.	18
I.3.2 Guide technique routière (GTR).	19
I.4 CONCLUSION.	21

### *Chapitre II : ETUDE D'IDENTIFICATION*

II.1 INTRODUCTION.	22
II.2 PRESENTATION DES MATERIAUX ETUDIES.	22
II.2.1 Marne.	22
II.2.2 Sable calcaire.	22
II.2.3 Climatologie de Ghardaïa.	25
II.3 ETUDE D'IDENTIFICATION GEOTECHNIQUE.	25
II.3.1 Analyse granulométrique.	26
II.3.1.1 Analyse granulométrique par tamisage.	26
II.3.1.2 Analyse granulométrique par sédimentométrie.	26
II.3.2 Qualité des fines.	29
II.3.2.1 Essai limites d'Atterberg.	34

II.3.2.2 Essai d'équivalent de sable.	36
II.3.2.3 Essai au bleu de méthylène.	39
II.3.3 Essai de compactage et de portance.	39
II.3.3.1 Essai Proctor Modifié.	41
II.3.3.2 Essai CBR.	44
II.3.4 Essai de compression simple.	46
II.3.5 Analyse chimique sommaire.	47
II.4 RECAPITULATIF DES ESSAIS D'IDENTIFICATION.	49
II.5 CLASSIFICATION.	49
II.6 CONCLUSION.	49

---

***CHAPITRE III : ETUDE D'OPTIMISATION***

---

III.1 INTRODUCTION.	50
III.2 ETUDE DE L'INFLUENCE DE L'AJOUT DE SABLE CALCAIRE AU LABORATOIRE.	50
III.2.1 Influence de l'ajout de sable calcaire sur les caractéristiques immédiates.	52
III.2.1.1 Limites d'Atterberg.	52
III.2.1.2 Essai Proctor modifié.	54
III.2.1.3 Essai CBR.	54
III.2.2 Influence de l'ajout de Sable calcaire sur les performances mécaniques.	57
III.2.2.1 Préparation des échantillons.	58
III.3 CONCLUSION.	60

---

***CONCLUSION GENERALE***

---

***REFERENCE BIBLIOTHEQUE***

---

***ANNEXES***

---

## **LISTE DES FIGURES**

<b>N°</b>	<b>Titre</b>	<b>Page</b>
<b>Figure I-1</b>	<i>Topographie du Maghreb (Hadjiat, 1997 cités par Goual, 2012).</i>	8
<b>Figure I-2</b>	<i>Fuseau de spécification de la technique routière saharienne (Fenzy, 1966).</i>	14
<b>Figure I-3</b>	<i>Coupe transversale type d'une chaussée saharienne (Morsli, 2007).</i>	17
<b>Figure I-4</b>	<i>Classification des sols fins selon GTR.</i>	20
<b>Figure II-1</b>	<i>Photo Google Earth de localisation de la carrière de marne.</i>	23
<b>Figure II-2</b>	<i>Photo Google Earth de localisation de la carrière de sable calcaire.</i>	24
<b>Figure II-3</b>	<i>Courbe granulométrique de marne et de sable calcaire</i>	28
<b>Figure II-4</b>	<i>Principe de la limite de plasticité</i>	31
<b>Figure II-5</b>	<i>représentation des limites d'Atterberg</i>	33
<b>Figure II-6</b>	<i>Abaque de Casa grande</i>	34
<b>Figure II-7</b>	<i>Schéma du dosage de l'essai du bleu méthylène</i>	38
<b>Figure II-8</b>	<i>Courbe Proctor du marne et sable calcaire</i>	40
<b>Figure II-9</b>	<i>Variation de la pression du piston en fonction de son enfoncement (Marne).</i>	42
<b>Figure II-10</b>	<i>Variation de la pression du piston en fonction de son enfoncement Sable calcaire.</i>	43
<b>Figure II-11</b>	<i>les étapes d'essai compression.</i>	45
<b>Figure II-12</b>	<i>Variation de la résistance à la compression en fonction de la compacité.</i>	46
<b>Figure III-1</b>	<i>Organigramme d'étude de traitement</i>	51
<b>Figure III-2</b>	<i>abaque de casagrande de chaque mélange</i>	53
<b>Figure III-3</b>	<i>Courbe Proctor modifié des mélanges (Marne + Sable calcaire).</i>	53
<b>Figure III-4</b>	<i>Courbes d'effort de poinçonnement en fonction de l'enfoncement pour CBR Immédiat.</i>	55
<b>Figure III-5</b>	<i>Courbes d'effort de poinçonnement en fonction de l'enfoncement pour CBR Imbibé.</i>	55
<b>Figure III-6</b>	<i>Variation des indices CBR immédiat et imbibé en fonction de pourcentage du Sable calcaire.</i>	57
<b>Figure III-7</b>	<i>Variation de la résistance à la compression en fonction de la compacité.</i>	59
<b>Figure III-8</b>	<i>Variation de la résistance à la compression (à 98% <math>\gamma_d</math>) en fonction de pourcentage de SC.</i>	60



## LISTE DES TABLEAUX

N°	Titre	Page
<b>Tableau I-1</b>	<i>Représente le classement des marnes en Algérie</i>	4
<b>Tableau I-2</b>	<i>Comparatif de quelques spécifications pour l'utilisation des tufs calcaires.</i>	11
<b>Tableau I-3</b>	<i>Classification GTR (SETRA-LCPC 1980).</i>	20
<b>Tableau II-1</b>	<i>Quelques valeurs des éléments climatologiques (Station métrologique de Ghardaïa).</i>	25
<b>Tableau II-2</b>	<i>Résultats récapitulatif de l'analyse granulométrique de marne et sable calcaire</i>	28
<b>Tableau II-3</b>	<i>Les tapes les essaies limites de liquidité (marne d'Oued Nechou ).</i>	30
<b>Tableau II-4</b>	<i>le principe de l'essai limites de plasticité (marne d'Oued Nechou ).</i>	32
<b>Tableau II-5</b>	<i>Valeur de limites d'Atterberg des matériaux</i>	33
<b>Tableau II-6</b>	<i>Classification indice de plasticité d'après (Cornell, 1951.et J.M. TCHOUANINANA1999).</i>	34
<b>Tableau II-7</b>	<i>Les étapes d'essais de l'Equivalent de sable ES.</i>	35
<b>Tableau II-8</b>	<i>Valeur de coefficient <math>V_B</math>.</i>	38
<b>Tableau II-9</b>	<i>Classification des sols selon la valeur de <math>V_B</math></i>	39
<b>Tableau II-10</b>	<i>Caractéristiques optimales de Proctor modifié.</i>	40
<b>Tableau II-11</b>	<i>Caractéristiques de compactage pour quelques matériaux routiers (Gandil P. 1988).</i>	41
<b>Tableau II-12</b>	<i>Résultats de l'essai de la portance.</i>	43
<b>Tableau II-13</b>	<i>Résultats de l'analyse chimique sommaire de la marne et de sable calcaire.</i>	46
<b>Tableau II-14</b>	<i>Caractéristiques géotechniques et mécaniques du marne d'Oued Nechou et de sable calcaire.</i>	48
<b>Tableau III-1</b>	<i>Valeur de limites d'Atterberg de chaque mélange</i>	52
<b>Tableau III-2</b>	<i>Résultats de l'essai Proctor modifié.</i>	54
<b>Tableau III-3</b>	<i>Résultats récapitulatifs de compactage et de portance.</i>	56
<b>Tableau III-4</b>	<i>Degré de compactibilité et de traficabilité.</i>	57

## **LISTE DES PHOTOS**

<b>Nº</b>	<b>Titre</b>	<b>Page</b>
<i>Photo I-1</i>	<i>Fissures diagonales (Derriche Z et al.).</i>	6
<i>Photo I-2</i>	<i>Fissure sur les murs (Zenkhrî ,2010).</i>	6
<i>Photo I-3</i>	<i>Cisaillement au niveau des nœuds (Derriche Z Et al.).</i>	6
<i>Photo I-4</i>	<i>Fissures dans les murs au niveau de la fenêtre (Derriche Z et al.).</i>	6
<i>Photo I-5</i>	<i>Dégradation de Chaussées</i>	7
<i>Photo I-6</i>	<i>Dégradation des routes</i>	7
<i>Photo II-1</i>	<i>Carrière de marne d'Oued Nechou</i>	22
<i>Photo II-2</i>	<i>Carrière de Sable calcaire (Metlili chaanba).</i>	22
<i>Photo II-3</i>	<i>Analyse granulométrique par tamisage.</i>	26
<i>Photo II-4</i>	<i>Analyse granulométrique par sédimentométrie.</i>	27
<i>Photo II-5</i>	<i>Appareil de CASAGRANDE Avec son équipement</i>	29
<i>Photo II-6</i>	<i>Auréole de bleu de Marne d'Oued Nechou.</i>	37
<i>Photo II-7</i>	<i>Auréole de bleu de sable calcaire.</i>	37
<i>Photo II-8</i>	<i>Matériel Proctor modifié.</i>	39
<i>Photo II-9</i>	<i>Presse CBR pour poinçonnement et écrasement Des éprouvettes de compression simple</i>	42
<i>Photo II-10</i>	<i>Préparation d'essai CBR imbibé</i>	42
<i>Photo III-1</i>	<i>les éprouvettes d'essai compression</i>	58
<i>Photo III-2</i>	<i>l'éprouvette à l'écrasement</i>	58

## ***INTRODUCTION GENERALE***

La valorisation des matériaux locaux reste un thème d'actualité ; il s'agit de mieux maîtriser leur comportement et leur mise en œuvre dans diverses situations afin d'arriver à une caractérisation qui facilitera leur classification et leur utilisation par les ingénieurs et les techniciens du domaine de Génie Civil (couches de chaussées, remblais ...).

Dans le domaine de la construction routière, au début de siècle, les seuls matériaux qui étaient acceptés, devaient répondre rigoureusement à certains critères géotechniques (dureté, propreté, granulométrie, etc.) ; mais la demande des projets routiers a dépassé ce que peut offrir la nature en graves « nobles ». Malheureusement dans certaines régions ces matériaux sont rares voire même inexistants. La nécessité de construire des routes à coût optimisé et les particularités qu'offrent les zones Sahariennes (faible pluviométrie, climat, forte portance du sol support, faible trafic,...etc) a poussé les ingénieurs et les techniciens à chercher d'ouvrir très largement l'éventail des matériaux utilisés en corps de chaussées. Par conséquent, l'utilisation et l'amélioration de matériaux locaux tels que la marne et le sable calcaire présente un grand intérêt et peut compenser cette carence.

Le Sahara Algérien a une richesse souterraine et superficielle qui ne peut être comptée, de sorte que l'état de Ghardaïa, situé au nord du sud de l'Algérie, dispose de terrains marneux qui affleurent à la surface. Il serait donc intéressant de connaître ce matériau dans le but de son utilisation dans d'éventuelles réalisations dans les corps de chaussées dans cette région. Cependant, la recherche de procédés de traitement physique, chimique et mécanique de ces matériaux en vue d'améliorer leurs caractéristiques physicomécaniques demeure l'une des approches la plus appropriée. Par ailleurs, et en raison de la forte teneur en fines des marnes, une technique a été élaborée et développée depuis plus de 40 ans. Elle consiste en l'association des matériaux riches en fines avec d'autres matériaux, riches en gros éléments, mais dépourvus totalement de fines (graves ou sables) (Hamrouni, 1975 ; Tagle, 1976 ; Dupas et Pecker, 1979 ; Colombier, 1988 ; Morsli, et al. 2005 et 2007 ; Goual, et al. 2012 et Cherrak, et al. 2015). Cette technique de mélange de matériaux semble ouvrir une autre voie. Elle peut porter soit sur une correction granulaire, soit sur une amélioration des caractéristiques géotechniques et mécaniques d'un matériau donné.

Dans l'objectif de valorisation des marnes de la région de Ghardaïa (Algérie), l'idée de les associer avec les sables calcaires issus des résidus des stations de concassage en vue

d'améliorer leurs caractéristiques géotechniques et mécaniques peut s'avérer intéressante, non seulement d'un point de vue économique mais également environnemental. C'est dans cette optique que se sont orientés nos travaux. Il s'agit d'étudier les effets de l'ajout de sable calcaire sur les caractéristiques géotechnique et le comportement mécanique de la marne.

L'étude est subdivisée en deux parties : la première est consacrée à une revue bibliographique expose des généralités sur les marnes et une synthèse de quelques spécifications pour l'utilisation des matériaux fins dans le domaine routier.

La deuxième partie se rapporte à l'étude expérimentale. Le chapitre 2 présente une caractérisation physicomécanique et chimique des matériaux de base (marne et sable calcaire). Le troisième chapitre est consacré à la recherche d'une composition optimale du mélange Marne-sable calcaire.

Enfin, Sur la base des résultats obtenus, une conclusion générale et des recommandations ont été proposées.

# **CHAPITRE I**

## **Recherche bibliographique**

## **RECHERCHE BIBLIOGRAPHIQUE**

### **I.1 GENERALITES SUR LES MARNES :**

#### **I.1.1 Définition de la marne :**

Les marnes sont des roches meubles, dont les principaux constituants sont des argiles d'une part, des carbonates de chaux d'autre part. Les propriétés sont très variables selon les proportions de l'un et de l'autre. Elles forment une famille de sol qui se situe entre les argiles et les calcaires.

- Les argiles franches :  $0 < \% \text{ carbonates} < 10 \%$ .
- Argiles marneuses :  $10\% < \% \text{ carbonates} < 70\%$  ;
- Les marnes :  $30\% < \% \text{ carbonates} < 70\%$  ;
- Calcaire marneux :  $70\% < \% \text{ carbonates} < 90\%$ .

Les argiles marneuses et marnes ont de propriétés voisines de celles des argiles. Leur sensibilité à l'eau diminue lorsque la proportion de calcium augmente.

En géotechnique, les marnes sont dites évolutives. Elles présentent une résistance élevée à l'état sec, mais leur comportement est différent en contact avec l'eau ; elles deviennent gonflantes et non durables, ce qui limite leur utilisation comme matériaux de remblais dans les travaux de génie civil et infrastructures. Néanmoins, cette dernière demeure assez faible pour céder aux manipulations de mise en œuvre (K. Mehidi, 1997).

#### **I.1.2 développement de la marne :**

La marne se développe suivant deux processus :

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

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

##### **b- Par modification interne**

Les liaisons sont détruites au sien du matériau par dissolution du ciment ou par des phénomènes physico-chimiques.

L'évolution des marnes peut causer une modification des caractéristiques géotechniques du sol pouvant ne pas correspondre aux conditions dans lesquelles, elle est réutilisée (sensible à l'eau, compactage, propriétés mécaniques que requière la stabilité des remblais.).

En outre, la destruction progressive de la structure naturelle des blocs présents dans les remblais peut engendrer un réarrangement du matériau et par conséquent des tassements. Ces derniers résultent du remplissage des vides entre bloc ou alors du fait que la densité du matériau produite par la destruction des blocs est supérieure à celle des blocs eux même.

### I.1.3 Formation des marnes :

Les marnes contiennent des argiles provenant soit de l'altération des massifs émergés (des roches mère), ce sont des argiles héritées soit de la reprise des sols où se mêlant les argiles héritées et les argiles néoformées. Effet du climat les marnes auront une origine détritique ou l'héritage domine ou alors une origine chimique ou les minéraux argileux s'étaient, dans le cas, à partir d'ions en solution dans l'eau.

Pendant et après le dépôt, les phénomènes de diagenèse interviennent, aboutissant ainsi à la formation du matériau dit « Marne »

### I.1.4 Classement des marnes en Algérie

Le tableau I-1 Montre les différents types des marnes qui existent sur la paye d'Algérie par rapport à les caractéristiques minéralogiques, granulométriques et comportement des types de marnes :

*Tableau I-1 : Représente le classement des marnes en Algérie*

Ordre	Types de Marnes	Minéraux argileux Dominants	Texture	Sensibilité à la Battance	Sensibilité à la Fissuration
<b>1</b>	Vert-clair	Inters stratifiés (30 à 85%)	Limono-argileuse	Limité	Moyenne à excellente
	Grises		Limono-argileuse	Limité	Excellente
<b>2</b>	Vert-clair Armées	Inters stratifiés (30 à 85%)	Limono-argileuse	Limité	Moyenne à excellente
<b>3</b>	Brunes Épaisses	Inters stratifiés (45 à 85%)	Argilo-limoneuse	Limité	Moyenne
<b>4</b>	Bleues	Illite (35%) Inter stratifiés (25%) Inter stratifiés (45 à 85%)	Argileuse	Faible	Excellente
	Compactes		Argilo-limoneuse	Limité	Moyenne
	Brunes				
	Armées				

### **I.1.5 Genèse des marnes**

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

#### **a. Diagenèse des carbonates**

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

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

#### **b. diagenèse des minéraux argileux**

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

L'ensemble des phénomènes diagenétiques conduit à la formation d'un matériau dont les propriétés dépendront, en grande partie de l'intensité des phénomènes qui se sont produits

### **I.1.6 Les dégradations qui peuvent engendrer par sols marneux**

Le problème principal est le phénomène de retrait-gonflement qui cause des fissures apparaissant clairement sur les constructions et sur les routes. Ces fissures occasionnent des ouvertures dans les fenêtres et les portes et elles se propagent dans la maçonnerie et la structure de l'ouvrage.



- **Cas des bâtiments :**



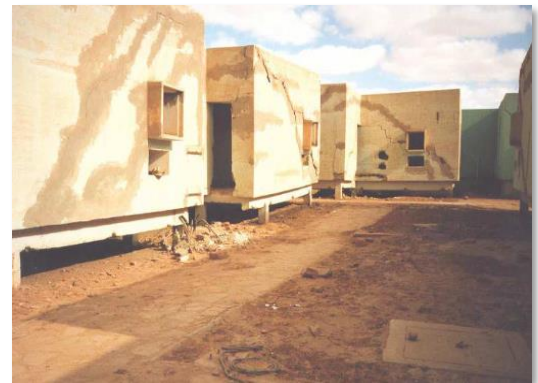
**Photo I-1 :** Fissures diagonales (Derriche Z et al.)



**Photo I-2** Fissure sur les murs (Zenkhril, 2010).



**Photo I-3 :** Cisaillement au niveau des nœuds (Derriche Z Et al.).



**Photo I-4 :** Fissures dans les murs au niveau de la fenêtre (Derriche Z et al.).

- **Cas des chaussées :**

Le gonflement peut provoquer des désordres importants à la structure de la chaussée. Ce phénomène est causé par des variations de teneur en eau du sous-sol. D'après (Jennings Et Evans G.A 1962), il peut être attribué au climat et à la surcharge. Voir les photos si dessous :



*Photo I- 5: Dégradation de Chaussées*



*Photo I-6: Dégradation des routes*

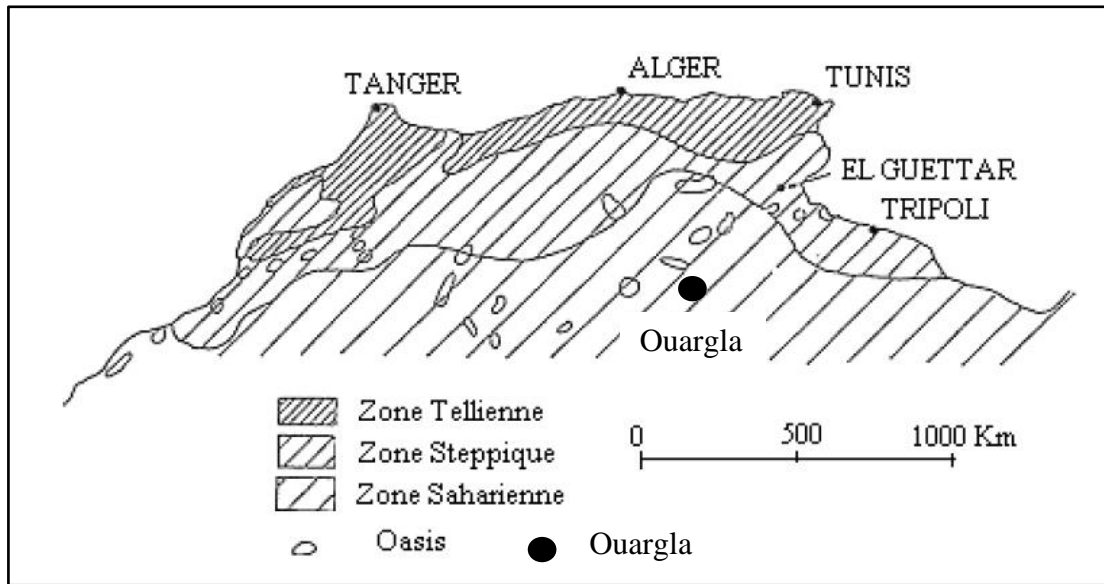
## **I.2 DIFFERENTS ASPECTS DU CONTEXTE SAHARIEN :**

L'Algérie se divise, en fonction de la géologie, de la lithologie et de la topographie, en trois grandes unités structurales : le Système Tellien, les Hautes Plaines Steppiques et le Sahara (Figure I-1).

**Le Système Tellien :** C'est un ensemble constitué par une succession de massifs montagneux, côtiers et sublittoraux, et de plaines.

**Les Hautes Plaines Steppiques :** Localisées entre l'Atlas Tellien au Nord et l'Atlas Saharien au Sud, à des altitudes plus ou moins importantes de 900 à 1200 m. Elles sont parsemées de dépressions salées, chotts ou sebkhas qui sont des lacs continentaux formés au Pléistocène sous l'effet des pluies torrentielles et du ruissellement important qui en découle.

**Le Sahara :** est un immense espace désertique, aride et peu peuplé, il couvre plus de 3/4 de la superficie du territoire algérien. Le Sahara forme une large plate-forme qui sépare le domaine méditerranéen au Nord du domaine tropical au Sud. Il est constitué de plateaux (hamadas et tassili) et des boucliers où le massif volcanique du Hoggar culmine à 3 000 m d'altitude, de plaines (regs et ergs) et de dépressions (sebkhas et gueltas).



*Figure I-1 : Topographie du Maghreb (Hadjiat, 1997 cités par Goual, 2012).*

### **I.2.1 Contexte climatique**

Le Sahara Algérien est caractérisé par un climat généralement sec, aride et très chaud durant près de cinq mois par an (températures entre 38 et 45°C en été) (Touati, 1994). On note aussi la rareté et l'irrégularité des pluies (une pluviométrie moyenne annuelle inférieure à 100 mm) (Touati, 1994). 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 du Sahara.

Ces conditions climatiques favorisent la bonne tenue des chaussées et permettent l'utilisation des matériaux locaux de diverses natures.

### **I.2.2 Le sol support**

La couverture de la zone saharienne est constituée dans sa quasi-totalité de matériaux du Quaternaire. On rencontre essentiellement des roches, des éboulis, des sables, des limons et des argiles (Ben Dhia, 1998).

Les sols sahariens ne se prêtent pas facilement aux classifications internationales et il est difficile de situer un sol plate-forme à l'égard de son comportement dans une classification descriptive précise. Exceptés les sables de dune qui présentent un indice portant relativement faible (compris entre 7 et 15), les sols sahariens sont caractérisés par une portance satisfaisante, l'indice CBR le plus fréquent est situé au voisinage de 40 ; ce qui, si on devait appliquer la méthode de dimensionnement des chaussées par la méthode des abaques CBR,

donnerait une structure minimale forfaitaire. En dehors des zones submersibles, les teneurs en eau sous-chaussée sont de l'ordre de 5 %, ce qui ne favorise pas les déformations plastiques.

### **I.2.3 Le trafic**

Le trafic des routes saharienne est très faible relativement à celui des routes du nord, néanmoins le trafic saharien possède la particularité d'être composé essentiellement de poids lourds en général supérieur à 40%. Pour les grands itinéraires, on considère une durée de service comprise entre 15 et 20 ans.

## **I.3 SYNTHÈSE DE QUELQUES SPECIFICATIONS POUR L'UTILISATION DES TUF D'ENCROUTEMENT**

La plupart des pays qui utilisent de façon courante les tufs d'encroûtement, ont établi des normes géotechniques à partir de l'expérience et des constatations faites sur chantiers. Ces normes sont empiriques et ne sont pas unifiées pour tous les pays qui utilisent ces matériaux. Pour un même objectif les spécifications peuvent être différentes par le type de caractéristiques retenues et par le niveau des exigences.

Les critères de sélection sont différents selon le pays et les auteurs et s'appliquent à des contextes variables. Par exemple, l'Algérie et l'Afrique du sud tiennent compte du trafic et la destination du matériau.

L'Algérie, en plus de ces paramètres a introduit la notion des zones climatiques qui se définissent suivant la hauteur moyenne des précipitations annuelles H comme suit :

Zone I : Méditerranéenne humide	$H \geq 600$ mm/an
Zone II : Méditerranéenne sub-humide	$350 \leq H < 600$ mm/an
Zone III : Semi-aride ou steppique	$100 \leq H < 350$ mm/an
Zone IV : Aride ou désertique	$H < 100$ mm/an

Où H désigne la hauteur moyenne des précipitations annuelles.

La Tunisie, tiens compte de la destination du matériau (en couche de base ou de fondation), et introduit comme l'Algérie la notion de zone climatique. Les spécifications de l'Argentine prennent en considération l'utilisation du tuf en couche de base ou de fondation avec un seuil de trafic fixé à une valeur maximale de 200 PL/J (> 5 T).

En Algérie, la Technique Routière Saharienne (TRS), a fait l'objet d'un certain nombre d'articles de synthèse et de proposition de spécifications (Inal, 1980 ; Struillou, et Alloul, 1984 ; Boularek, 1989 ; Larabi 1998 ; Morsli et al. 2001).

En 1984, sur la base des principes de la TRS, Struillou et Alloul (Struillou, et Alloul, 1984) ont proposé des spécifications définissant avec plus de précision les domaines d'application de chaque catégorie de tuf, les seuils à fixer en fonction du niveau d'utilisation du matériau et de la zone d'implantation de la route et du trafic. Les exigences portent sur la granulométrie, la dureté (coefficient Los Angeles), l'indice de plasticité, la portance (indice CBR) et le pourcentage des sulfates et des carbonates.

Le CTTTP en 2001 (CTTP, 2001) a joint, dans le Catalogue Algérien de Dimensionnement des Chaussées Neuves, des instructions relatives à l'utilisation des tufs d'encroûtement en corps de chaussées.

Les restrictions portent sur : la granulométrie, les limites d'Atterberg et le taux de carbonate et de sulfates. On y distingue quatre fuseaux granulaires :

- 0/40 et 0/20 pour les tufs calcaires désignés respectivement par Tuf 1 et Tuf 2 ;
- 0/5 et 0/2 pour les sables gypseux désignés respectivement par SG 1 et SG 2.

Une résistance minimale en compression simple est imposée pour les sables gypseux. Des indications sur les zones d'utilisation accompagnent les fiches techniques. Les seuils sont imposés en fonction du niveau de sollicitation auquel est soumis le matériau (Trafic et couche de base ou de fondation).

Le tableau I-2 récapitule les spécifications pour l'utilisation des tufs calcaires des différents pays utilisateurs.

La comparaison entre ces différentes spécifications n'est pas très aisée du fait que les caractéristiques retenues ne sont pas unifiées pour tous les pays. Le seuil fixé pour un paramètre commun de l'ensemble des pays cités, est différent (IP par exemple)

Pour l'établissement de spécifications communes et acceptables par la plupart des pays utilisateurs de tuf, il serait souhaitable d'introduire la notion de zone climatique proposée par Struillou et Alloul, compte tenu de la sensibilité de ce matériau à l'eau, et la prise en considération du niveau de trafic dans les spécifications tunisiennes.

Entre autres les spécifications devront élargir l'utilisation du tuf et non pas se limiter seulement en couche d'assises de chaussées (couche de base et fondation) en considérant les accotements, les couches de forme et les assises de route non revêtues ou protégées par un enduit superficiel.

**Tableau I-2 : Comparatif de quelques spécifications pour l'utilisation des tufs calcaires.**

Caractéristique	Couche	Algérie			Tunisie	Argentine	Afrique du sud
		TRS	Struillou et Alloul (1984)	CTTP 2001			
D max (mm)	B				< 40		19 - 53
	F	-	-	20 - 40	< 20	< 38	(dépend du trafic)
% < 0,425 mm		-	-	36 - 52	10 - 30 (lu sur Fuseau)	10 - 30	15 - 55
% < 80µm	B				< 20 (lu sur fuseau)	5 - 20	
	F	< 30	≤ 30	22 - 32		3 - 10	-
Limite de liquidité		-	-	< 40	-	< 30	25 - 40 (selon le trafic)
Indice de plasticité		< 13	<10 Zone II < 13 Zone III < 16 Zone IV	< 15	< 10	< 6	8 - 15 (selon le trafic)
La densité sèche maximale (kN/m <sup>3</sup> )		> 17	-	-	-	-	-
Indice CBR Après immersion	B		40 - 100 Zone II et III			> 40	60 - 100 (selon le trafic)
	F	-	30 - 90 Zone IV (selon trafic)	-	-	> 80	
ICBR Immédiat		> 40	-	-	-	-	-
Coefficient Los Angeles max	B		100				
	F	-	35 - 100 (selon trafic)	-	-	> 45	-
Rc (MPa) 28 j		> 1,5	-	-	-	-	-
% Carbonate CaCO <sub>3</sub>	B		> 60	45	> 40		
	F	-	> 70		> 50		
% Sulphates CaSO <sub>4</sub>		-	Trace Zone II 5 Zone III		< 3		

Concernant les exigences, les seuils imposés semblent assez bien cernés pour l'indice de plasticité et pour l'indice CBR après immersion. L'influence de la teneur en carbonate de calcium, la valeur du bleu ainsi que le minimum de résistance en compression simple après 4 jours de conservation à 55 °C, serait à prendre en compte par l'ensemble des pays et nécessite des études communes et des constatations sur chantier pour fixer ces seuils (Colombier, 1988).

### **I.3.1 La technique routière saharienne (TRS)**

Les premières routes sahariennes commencées vers 1955 (routes Ghardaïa – EL Goléa et Ghardaïa-Ouargla), ont été étudiées en adoptant les bases de la technique routière européenne. Les matériaux utilisés avaient la granulométrie la plus étalée possible et contenaient peu ou pas d'argile. Le matériau de base utilisé était le caillou dur, ramassé dans le reg. Très vite, les ingénieurs ont cherché à tenir compte les particularités qu'offre le Sahara :

1. L'immensité des territoires, dont la superficie totale avoisine 1 500 000 km<sup>2</sup> ;
2. Les très longues distances de parcours qui relient les agglomérations et centres de vie (énormes investissements que nécessite la construction des milliers de km) ;
3. Le caractère désertique et aride prédominant, les périodes humides étant courtes, l'imbibition de la chaussée n'est pas à craindre car trop improbable.
4. Les très faibles trafics automobiles recensés sur le réseau qui est composé essentiellement de camions gros-porteurs ;

et établir une propre spécification nommée la **Technique Routière Saharienne (TRS)** (établie en 1965, lors du 1er congrès de la route déroulé à Beni-Abbès).

La sécheresse ouvre beaucoup l'éventail des matériaux utilisables surtout en couche de base car en l'absence d'eau, la résistance des matériaux est obtenue soit par frottement entre grains, soit par cohésion. Parmi ces matériaux les tufs d'encroutement, ces matériaux présentent une cohésion notable après compactage et séchage.

#### **I.3.1.1 Principes de la technique routière Saharienne**

Les idées de base de cette technique, d'après Fenzy, sont les suivantes :

- à cause de faible trafic qui est composé essentiellement de camions gros-porteur ; les déflexions sous les pneus peuvent être grandes ; mais doivent être entièrement réversibles et ne pas laisser de trace de déformation permanente ;
- La forme et l'état de la surface doivent faciliter l'écoulement des eaux pluviales afin de réduire les risques d'imbibition ;

- Le problème des chotts et cuvettes doit être dissocié de la technique saharienne et considéré comme une exception.

Les conséquences pratiques des idées générales sont :

- La couche de roulement doit être suffisamment souple pour se plier sans se rompre ;
- Le matériau de la couche de base doit pouvoir supporter des déformations élastiques sans dommage, qui peuvent être relativement importantes à la seule condition qu'elles soient entièrement réversibles. Cette condition, la seule imposée est beaucoup moins rigoureuse que la précédente et permet d'utiliser de nombreux types de matériaux ;
- Le climat sec et la faible intensité du trafic favorisent l'utilisation des matériaux locaux même s'ils sont sensibles à l'eau, utilisation proscrite dans les régions humides notamment en couche de base ;
- L'épaisseur de la couche de base peut être faible, car le sol support étant sec et possède un indice CBR immédiat généralement supérieur à 20 ;
- L'utilisation des matériaux fins sensibles à l'eau en couche de base exige un bon écoulement des eaux de pluie.

### I.3.1.2 Domaine d'application

Cette technique n'est donc applicable que :

- Sous un climat très sec (moyenne annuelle des pluies < 100 mm) et dans les conditions telles que les risques d'imbibition des sols sous chaussées soient très réduits ;
- Pour un trafic prévisible relativement faible.

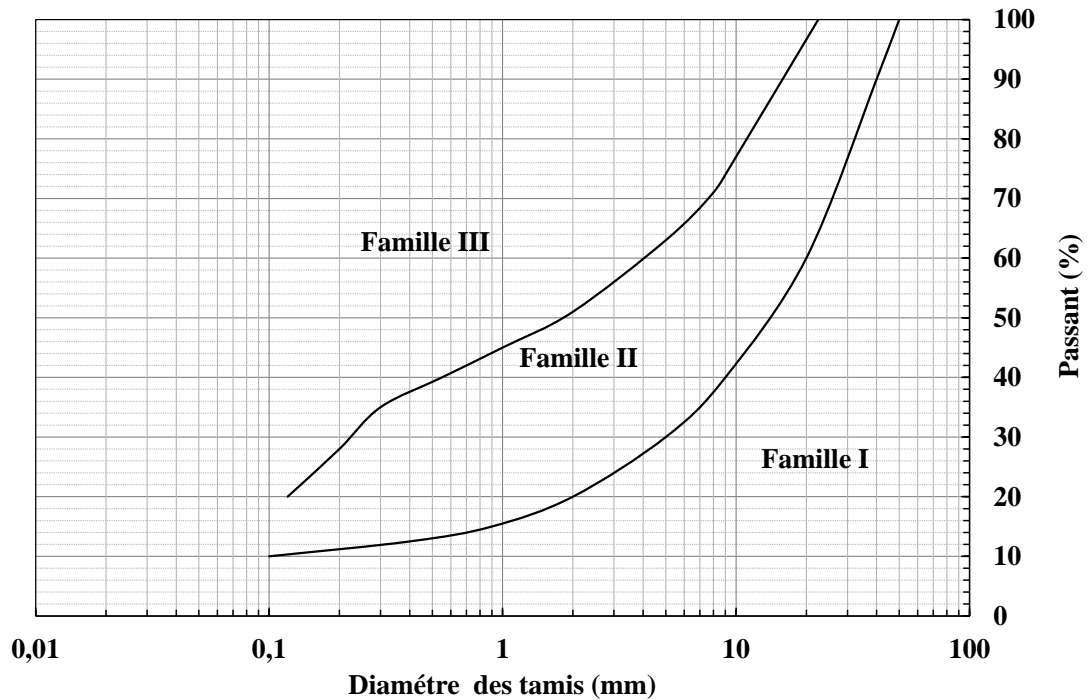
Cette technique, a permis d'établir un fuseau discriminant propre à ces matériaux : le fuseau dit « Saharien » ou « fuseau de Beni Abbés » (Figure I-2), qui est une adaptation locale du fuseau de référence AASHO. Le fuseau permet de partager l'espace granulométrique en trois zones, définissant ainsi trois familles de matériaux :

**Famille I :** matériaux dont la courbe granulométrique se trouve entièrement ou partiellement au-dessous du fuseau (zone I du graphique). Ce sont des matériaux à ossature à forte teneur en vide (ballast). L'emploi des matériaux de cette famille, en assise de chaussée, est envisageable ; mais chaque cas doit être étudié en fonction des risques de ségrégation et de compactage ; parfois la réalisation de planches d'essai est nécessaire avant de se prononcer.



**Famille II** : Les matériaux de cette famille présentent une courbe granulométrique qui s'inscrit entièrement dans le fuseau (zone II du graphique) ; ce sont les matériaux à ossature. On leur appliquera les critères relatifs aux matériaux à angle de frottement élevé.

**Famille III** : matériaux dont la courbe granulométrique se trouve au-dessus du fuseau, entièrement ou partiellement (zone III du graphique). Matériaux fins, le squelette est inexistant ou noyé dans les éléments fins. On appliquera les critères relatifs aux « matériaux à cohésion élevée ».



*Figure I-2 : Fuseau de spécification de la technique routière saharienne (Fenzy, 1966).*

### I.3.1.3 Critères de choix de matériaux pour couches de base et de fondation

Pour couche de base, on distingue principalement deux types de matériaux :

- D'une part ceux qui doivent leur tenue à l'enclassement des différents éléments les uns dans les autres et à l'angle de frottement important au contact grain-grain ;
- D'autre part ceux qui doivent leur tenue à la cohésion relativement élevée apportée par leurs éléments fins (Ben Dhia, 1983).

#### I.3.1.3.1 Matériaux à angle de frottement élevé

Ils sont appelés également : « matériaux à ossatures ». Ce sont des matériaux analogues aux matériaux dits : « classiques », utilisés dans les régions humides, ceux dont les courbes granulométriques doivent s'inscrire à l'intérieur des fuseaux-types de matériaux d'assises routiers.

En zone humide, outre la granularité, ces matériaux doivent remplir toutes les conditions pour obtenir un angle de frottement élevé après compactage, notamment :

- Une résistance suffisante aux chocs et à l'attrition ;
- Des éléments de bonne forme : arrêtés vives, faces rugueuses ;
- Un pourcentage de fines juste suffisant pour un bon compactage, etc.

Un tel matériau est aussi bon au Sahara ; mais lorsqu'il s'agit de tout-venant naturel, qui remplit souvent les conditions de granularité et de résistance au choc, on se trouve presque toujours en présence de matériaux à grains plus ou moins arrondis et lisses.

C'est pour cette raison qu'au Sahara, on exige que les matériaux de ce type aient une certaine « cohésion ». C'est ainsi que par rapport à ceux utilisés dans les zones humides, le pourcentage de fines est plus élevé et la plasticité est plus forte.

En résumé, les conditions demandées aux matériaux à ossature au Sahara, sont les suivantes (Domec, 1980) :

- La courbe granulométrique doit s'inscrire dans le fuseau choisi ;
- Le coefficient Los Angeles doit être inférieur à 40 (ou à la rigueur être inférieur à 45) cette valeur du Los Angeles est liée aux conditions climatiques et à la classe du trafic ;
- L'indice de plasticité doit être supérieur à 6 (on admet jusqu'à 10 ou 12 dans le nord du Sahara) ;
- Une résistance à la compression simple de 10 à 15 bars serait souhaitable.

#### **I.3.1.3.2 Matériaux à « cohésion » élevée**

Ces matériaux peuvent être divisés en deux grands groupes :

- D'une part ceux qui tirent leur cohésion de l'affinité réciproque des éléments pulvérulents de calcaire ou de gypse ;
- D'autre part, ceux dont la cohésion est obtenue intégralement par l'agglomération des éléments argileux.

Cette cohésion peut être appréciée en laboratoire par l'essai de compression simple (Fenzy, 1966), effectué sur des éprouvettes compactées à la teneur en eau de l'OPM et séchées à l'étuve jusqu'à une teneur en eau voisine de zéro.

La résistance minimale exigée doit être obtenue pour une compacité de 97 à 98% de l'OPM (compacité demandée généralement sur chantier) en ce qui concerne la couche de base. Cependant, si le matériau est difficile à compacter, on peut se référer à une compacité de 95% de l'OPM. Cette résistance minimale avait d'abord été fixée empiriquement à 15, puis à 20 bars ; mais Fenzy recommande une résistance de 25 bars pour plus de sécurité (Fenzy, 1966).

Dans le cas de l'emploi des matériaux à fines argileuses dans le corps de chaussée, certains nombres de précautions doivent être pris, notamment en ce qui concerne la granularité.

Parmi ceux répondant au critère de la résistance à la compression simple, il est recommandé d'utiliser les matériaux graveleux ou grenus, ayant une bonne courbe granulométrique (étalée et concave) (Domec, 1980).

D'autre part, le pourcentage des fines (<0,08 mm) est limité à 30% pour les matériaux fins, afin de faciliter leur humidification (homogénéisation de la teneur en eau de compactage) et compactage.

Résumons les conditions exigées pour l'emploi en couche de base des matériaux cohérents (Domec, 1980) :

- Résistance à la compression simple supérieure à 25 bars (pour une compacité de 97 ou de 98% de l'OPM) ;
- Teneur en fines < 30% ;
- Bonne granularité (cette condition à moins d'importance pour les matériaux d'encroûtements).

#### **I.3.1.3.3 Matériaux intermédiaires**

Dans la nature, il y a clairement des matériaux intermédiaires qui ont une cohésion moyenne et un angle de friction moyen.

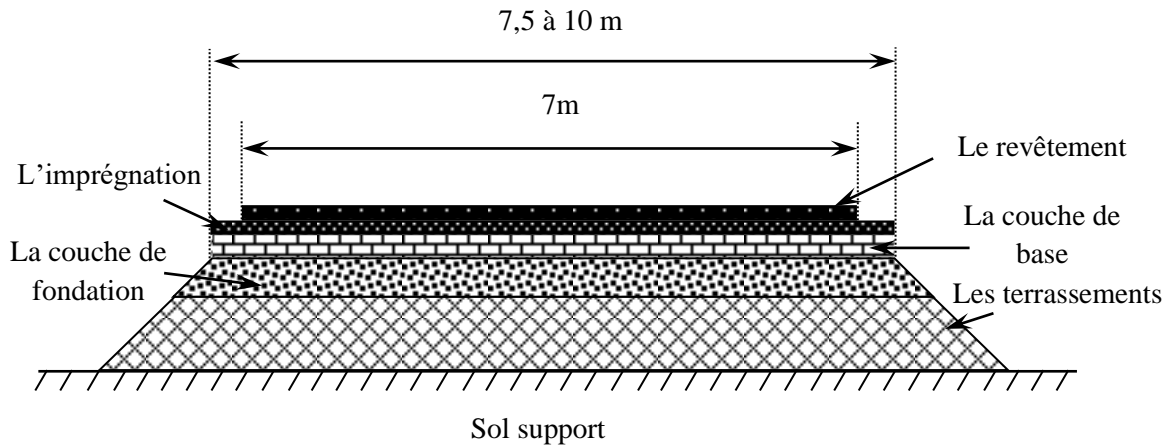
L'expérience a montré qu'il fallait se méfier de ces matériaux qui n'entrent pas nettement dans l'une des catégories indiquées ci-dessus, et bien étudier leur cas avant de les accepter dans la couche de base. Au niveau de la couche de fondation, la cohésion et la résistance aux chocs ont un peu moins d'importance. Les matériaux recherchés sont peu plastiques et susceptibles de bien se comporter (critères de granularité et pourcentage des fines) (Domec, 1980). Les matériaux utilisés pour la couche de fondation sont :

- Soit les mêmes matériaux choisis en couche de base, lorsque les gisements correspondants sont d'importance suffisante ;
- Soit des matériaux qui tout en ne convenant pas à la couche de base, présentent des qualités suffisantes pour la couche de fondation.

#### **I.3.1.4 Mode de construction des routes au Sahara**

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. 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-6.



**Figure I-3 :** Coupe transversale type d'une chaussée saharienne (Morsli, 2007).

#### **I.3.1.4.1 Terrassements**

Les routes en zones désertiques sont souvent réalisées en remblai à faible hauteur, cette disposition facilite le drainage et modifie favorablement la teneur en eau d'équilibre sous chaussée, les déblais sont à éviter car ils favorisent l'ensablement des chaussées. Pour les remblais, on se contente le plus souvent des matériaux se trouvant à proximité du tracé, en évitant les matériaux pulvérulents et le sable de dune. Toutefois, lorsque le sable de dune est pratiquement le seul matériau disponible, 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 d'épandage des matériaux d'assise de chaussée (Morsli, et al 2002 ; Abdelghani, 1980).

Les couches supérieures des terrassements sont compactées à sec de manière à atteindre des densités de l'ordre de 90% de l'OPM (Ameraoui, 2002).

Un choix judicieux des matériaux du remblai permet de réduire le corps de chaussée d'une simple couche de base d'environ 15cm (Boularak, 1989).

#### **I.3.1.4.2 Couche de fondation**

Cette couche est mise en place sur les terrassements terminés. Elle est exécutée sur toute la largeur de la plate-forme et à compacter avec humidification.

### **I.3.1.4.3 Couche de base**

La couche de base est également exécutée sur toute la plate-forme et compactée avec humidification. Lorsqu'elle est terminée, elle a une largeur de 7,50 à 10,50 m suivant les projets, avec des élargissements sur certaines sections (passages submersibles, remblais de grandes hauteurs, etc.) (Domec, 1980). Les matériaux utilisés en couche de base appartiennent soit à la famille I (matériaux à ossature), soit à la famille III (matériaux fins) (Morsli, 2002).

Pour les matériaux fins il est demandé que leur résistance à la compression simple doive être au moins de 25 bars sur des éprouvettes confectionnées sous les conditions suivantes :

- Compactage à la teneur en eau optimum Proctor Modifié ;
- Une compacité de 97% à 98% de l'OPM ;
- Séchage à une température de 60° maximum jusqu'à ce que la teneur en eau soit voisine de zéro (48h d'étuvage en générale).

### **I.3.1.4.4 Couche de roulement**

#### ➤ **Imprégnation**

Préalablement à la réalisation d'une couche de roulement, les matériaux d'encroûtements notamment, 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 des précipitations.

#### ➤ **Revêtement**

Actuellement 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, par les accotements, malgré le faible trafic.

La couche de roulement sera constituée, Selon l'intensité du trafic, soit par un enduit superficiel, soit un enrobé à froid, soit un enrobé à chaud. Toutefois, l'enrobé à froid est le plus souvent utilisé.

### **I.3.2 le guide technique routière (GTR) :**

Le GTR fournit une liste exhaustive des matériaux susceptibles d'être utilisés pour la réalisation d'une couche de forme. Ce sont :

- Les matériaux rocheux (classe R)
- Les sols (classe A, B, C, D)
- Certains sous-produits industriels (classe F).

Le choix des matériaux est avant tout basé sur un compromis technico-économique qui inclut notamment des critères de disponibilité, de coûts de traitement et de transport des matériaux.

- **Cas particulier des sols fins :**

La norme NF P 94-011 (LCPC) permet de regrouper une partie de ces classifications (voir Annexe D). Ainsi un sol peut être identifié selon :

- Sa granulométrie ;
- Sa teneur en matières organiques ;
- Sa granularité ;
- Sa plasticité ;
- Son argilosité ;

Dans le cadre de la réutilisation des sols pour la réalisation des remblais et des couches de forme, une autre classification est utilisée (NF P 11-300 et le GTR).

Le premier critère d'identification des sols est la granulométrie. En effet, pour des raisons techniques telles que le malaxage, un seuil à 50 mm a été établi. Il permet de distinguer :

- Les sols constitués de particules de diamètre inférieur ou égal à 50 mm ; il s'agit des sols de type A, B, D. Ces sols correspondent aux sols fins ;
- Les sols constitués de particules de diamètre supérieur à 50 mm qui correspondent aux sols C, D.

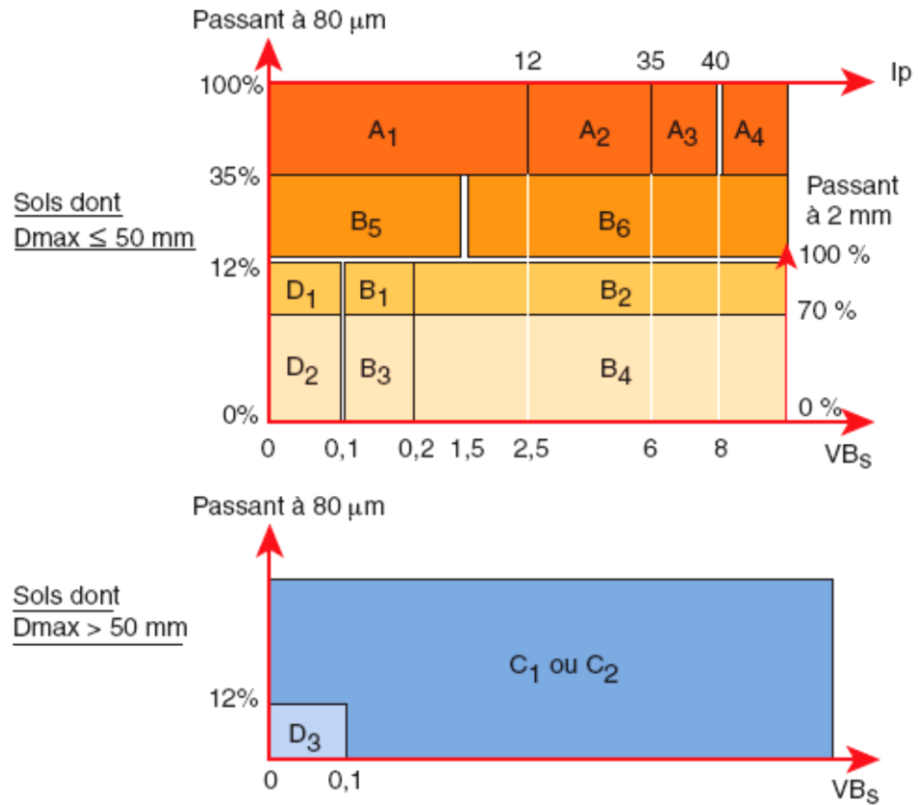


Figure I-4 : Classification des sols fins selon GTR.

Tableau I-3 : Classification GTR (SETRA-LCPC 1980).

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

La classification des sols fins est basée sur la teneur en argile et la granulométrie du sol :

- ✓ VBS : Capacité d'adsorption par le bleu de méthylène ;
- ✓ IP : Indice de plasticité par la méthode des limites d'Atterberg ;
- ✓ Passant à 80 μm et à 2 mm : pourcentage de particules fines passant aux tamis de 80 μm et 2mm.

## **I.4 CONCLUSION :**

La pauvreté de ressources en granulats dans les régions du sud, a conduit depuis plusieurs années les ingénieurs à étudier les possibilités d'utilisation des matériaux locaux tels que les tufs et les marnes, qui sont les matériaux les plus abondants au Sahara algérien.

Le contexte du Sahara Algérien (climatique notamment) ouvre largement la gamme des matériaux utilisable en technique routière saharienne.

L'utilisations des marnes en assises de chaussées dépend de ces caractéristiques géotechniques, on les compare aux spécifications des pays utilisent ces matériaux.

Dans le cas ou caractéristiques des marnes par rapport aux spécifications retenues sont insuffisant, Le traitement de ce matériau au liant hydraulique ou mélanger avec d'autres granulat est préconisé. Parmi les techniques de traitement les plus économiques, on les mélangeant avec d'autre granulats.

Des études en laboratoire seraient à faire pour bien connaitre le comportement de ces deux matériaux brutes et mixte, et ce dans des laboratoires de haut niveau technique pour la mise au point des conditions des essais exigés ; ceci permettra sans doute une utilisation optimale et par conséquent une économie importante en ce qui concerne les ressources en granulats nobles.



**CHAPITRE II**  
**Etude d'identification**

## ***ETUDE D'IDENTIFICATION***

### **II.1 INTRODUCTION :**

L'identification géotechnique telle qu'elle serait pratiquée actuellement dans les laboratoires routiers algériens s'effectue selon des modes opératoires établies par les normes françaises, dans ce chapitre notre intérêt était consacré à l'étude d'identifications géotechniques des matériaux de base (Marne d'Oued Nechou et Sable calcaire) à l'aide des essais géotechniques conventionnels de laboratoire.

### **II.2 PRESENTATION DES MATERIAUX ETUDIES :**

#### **II.2.1 La marne :**

Le matériau choisi provient de la carrière d'Oued Nechou située à 20 km au Nord-est de la ville de Ghardaïa, ce gisement se trouve à environ trois kilomètres à gauche de la RN°1 en allant vers le Nord. (Voir figure II-1).

#### **II.2.2 Sable calcaire :**

Le sable utilisé est un sable calcaire provient de Metlili (40 km au Sud de la wilaya de Ghardaïa) ce gisement se trouve à 50 m à droit de la RN°107 en allant vers Metlili. (Voir figure II-2).



**Photo II-1 - Carrière de marne d'Oued Nechou**



**Photo II-2 - Carrière de Sable calcaire (Mettili).**



Figure II-1 - Photo Google Earth de localisation de la carrière de marne.



Figure II-2 - Photo Google Earth de localisation de la carrière de sable calcaire.

### II.2.3 Climatologie de Ghardaïa :

Le climat de la région de Ghardaïa est de type saharien, il se caractérise par des étés aux chaleurs torrides et des hivers doux surtout pendant la journée. Il est marqué par une grande amplitude entre les températures de jour et de nuit, à l'été et l'hiver. La période chaude commence au mois de mai et dure jusqu'au mois de septembre.

Pour avoir une idée sur la climatologie de Ghardaïa, on va présenter quelques éléments climatologiques de l'année 2019 sur le tableau II-1.

**Tableau II-1 : Quelques valeurs des éléments climatologiques (Station métrologique de Ghardaïa).**

<i>Mois</i>	<i>Inso (heures)</i>	<i>Evap (mm)</i>	<i>°Tmin (°c)</i>	<i>°Tmax (°c)</i>	<i>MM°t (°c)</i>	<i>MMU (%)</i>	<i>Moy vent (m/s)</i>
<i>Jan</i>	284	90	3	17,7	8,7	51	2,5
<i>Fév.</i>	243	90	3,6	23	12,2	44	2,3
<i>Mars</i>	280	176	5	33,6	18,8	33	4,4
<i>Avril</i>	300	301	12,6	39	23,8	22	5,2
<i>Mai</i>	289	301	13,5	40,3	28,3	27	4,9
<i>Juin</i>	371	335	15,3	45	31,7	27	4,4
<i>Juill.</i>	334	405	23	44,8	32,5	19	3,7
<i>Aout</i>	310	366	20,6	46	33,9	23	2,8
<i>Sept</i>	245	266	16	39	26,9	35	3,6
<i>Oct.</i>	217	122	16,1	35	24,8	60	3,7
<i>Nov.</i>	280	103	8,6	33,4	17,1	56	3,4
<i>Déc</i>	228	103	4,5	20,6	11,7	62	3,3

°Tmin : température minimale ; °Tmax : température maximale ; MM°t : moyenne mensuelle des températures ; MMU : moyenne mensuelle de l'humidité ; Moy vent : moyen mensuelle de la vitesse du vent ; Qt. Rr : hauteur de pluie ;

### II.3 ETUDE D'IDENTIFICATION GEOTECHNIQUE :

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.

### II.3.1 Analyse granulométrique :

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

- Par tamisage (tamis à maille carrée) pour les grains de diamètre supérieur à  $80\mu\text{m}$ ;
- Par sédimentométrie pour les grains plus fins  $< 80\mu\text{m}$ .

#### II.3.1.1 Analyse granulométrique par tamisage :

L'essai se fait selon la norme NFP 94-056. Il permet de déterminer la quantité respective des différents éléments constituant le sol (Graviers, Sables, Limons, Argiles). Pour cela l'analyse consiste à séparer et à classer à l'aide de tamis ces éléments selon leurs diamètres.



*Photo II-3 : Analyse granulométrique par tamisage.*

#### II.3.1.2 Analyse granulométrique par sédimentométrie :

La teneur en fines (éléments inférieurs à  $80\mu\text{m}$ ) ne joue pas toujours un rôle négatif pour le matériau surtout quand il s'agit de fines calcaires. L'analyse granulométrique des éléments de cette fraction est effectuée par sédimentation selon la norme NFP 94-057, où il n'est pas possible d'utiliser des tamis, et complète, donc, l'analyse granulométrique par tamisage.

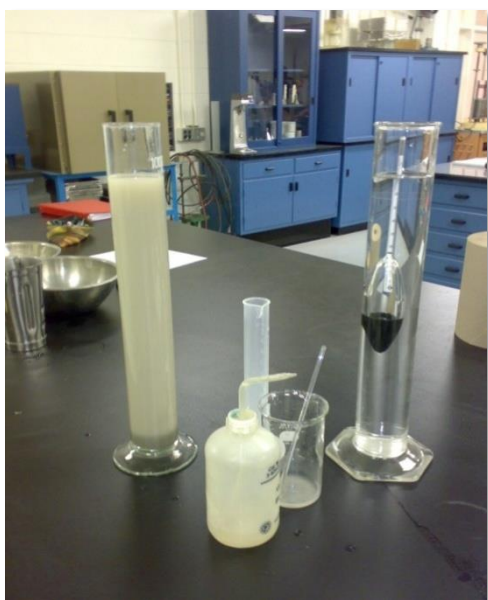
La figure II-3, présente les positions des courbes granulométriques des deux matériaux étudiés, par rapport aux fuseaux discriminants de la TRS (Fenzy, 1966) et du Catalogue de Dimensionnement des Chaussées Neuves (CTTP, 2001). Les paramètres les plus significatifs tirés de cette analyse, ainsi que les seuils préconisés par les spécifications de la TRS, CTTP et le guide technique routière GTR (GTR, 1992), sont regroupés dans le tableau II-2.

D'après ces résultats, on constate que :

Les courbes des deux matériaux se situent au-dessus du fuseau saharien dit fuseau de Beni-Abbès. Ils appartiennent à la famille des matériaux fins (famille III).

**La marne** : a une courbe granulométrique étalée ( $C_u > 20$ ), avec une grande fraction de fines ( $< 80\mu\text{m}$ ) de l'ordre de 55%, ce dernier est supérieur aux seuils préconisés par les spécifications citées dans le tableau II-3 (TRS, CTPP 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).

**Le sable calcaire** : possède une courbe granulométrique étalée, avec un taux des fines ( $< 80\mu\text{m}$ ) de l'ordre de 23%.



**Photo II-4** : Analyse granulométrique par sédimentométrie.

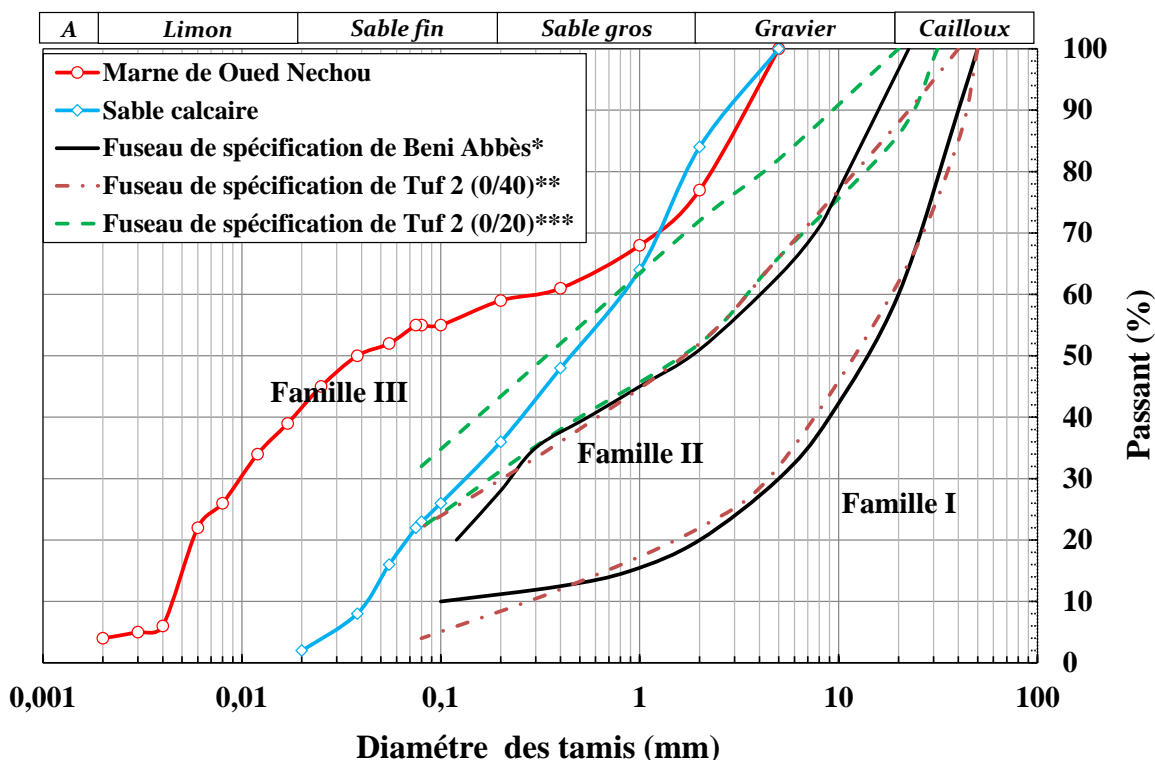


Figure II-3 : Courbe granulométrique de la marne et le sable calcaire

Tableau II-2 : Résultats récapitulatif de l'analyse granulométrique.

	Matériaux		Spécifications		
	Marne	Sable calcaire	TRS*	CTTP*	GTR*
$D_{max}$ (mm)	5	3	-	20-40	<50
Argile (%)	4	-	-	-	-
Limon (%)	38	-	-	-	-
Sable fin (%)	17	36	-	-	-
Sable gros (%)	18	48	-	-	-
Gravier (%)	23	16	-	-	-
Cailloux (%)	0	0	-	-	-
% < 0,425 mm	63	49	-	36-52	-
% < 80µm	55	23	< 30	22-32	≤ 35
$D_{10}$	0.0046	0.043	-	-	-
$D_{30}$	0.01	0.15	-	-	-
$D_{60}$	0.3	0.85	-	-	-
$C_u$	65.22	19.77	-	-	-
$C_c$	0.072	0.62	-	-	-

$C_u$  : coefficient d'uniformité dit de Hazzen.  $C_u = D_{60}/D_{10}$

$C_c$  : coefficient de courbure.  $C_c = (D_{30})^2/D_{60}.D_{10}$

\* Seuils préconisés par le TRS (Fenzly, 1966), le CTTP (CTTP, 2001) et le GTR (GTR, 1992).



### II.3.2 Qualité des fines :

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

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

#### II.3.2.1 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 lisse, Pour le sable calcaire il nous a été impossible de déterminer la limite de plasticité car les boudins se fragmentent avant d'atteindre un diamètre de 3mm.



*Photo II-5 : Appareil de CASAGRANDE Avec son équipement*

#### A) Limite de liquidité $W_L$ (NFP 94-051) :

Pour déterminer la limite de liquidité, on étend sur une coupelle une couche du matériau dans laquelle on trace une rainure au moyen d'un instrument en forme de V. on imprime à la coupelle des chocs semblables en comptant le nombre de chocs nécessaire pour fermer la rainure sur 1 cm, on mesure alors la teneur en eau de la pâte.

$$W_L = W (N/25)^{0,121}$$




$W_L$  : limite de liquidité

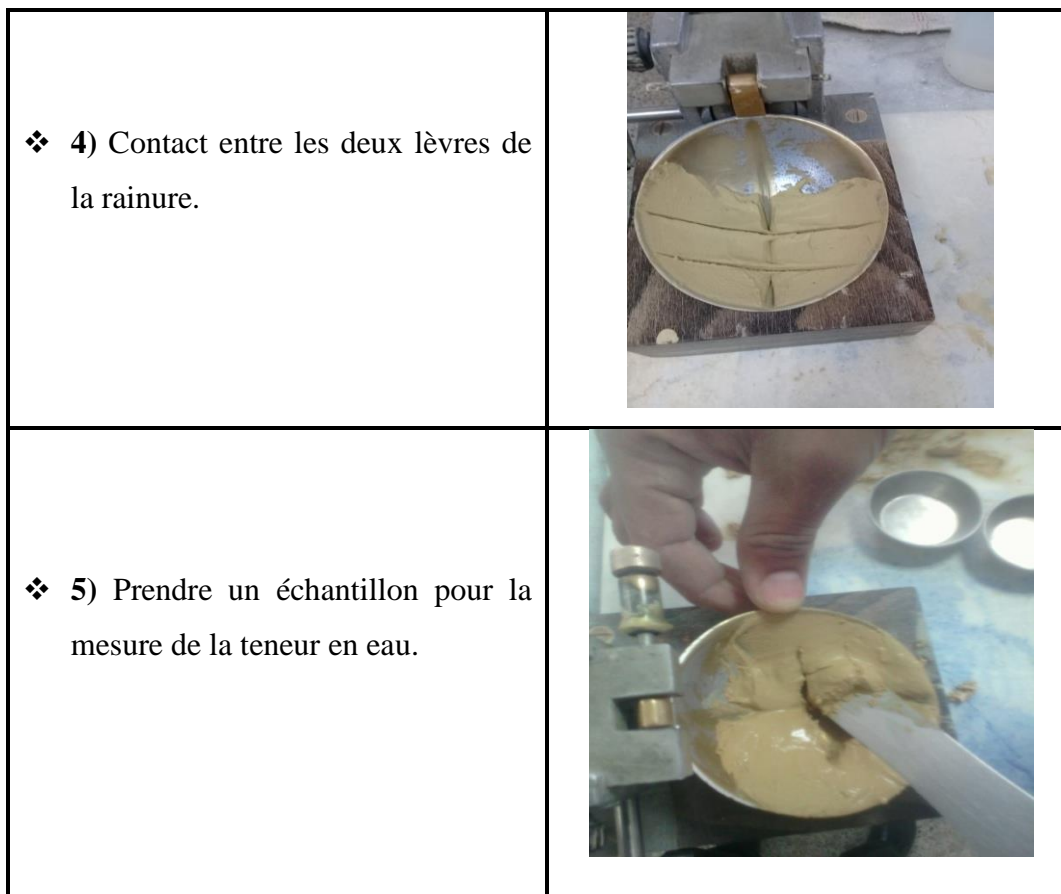
N : nombre de chocs

W : la teneur en eau

Les étapes de cet essai sont résumées dans le tableau suivant.

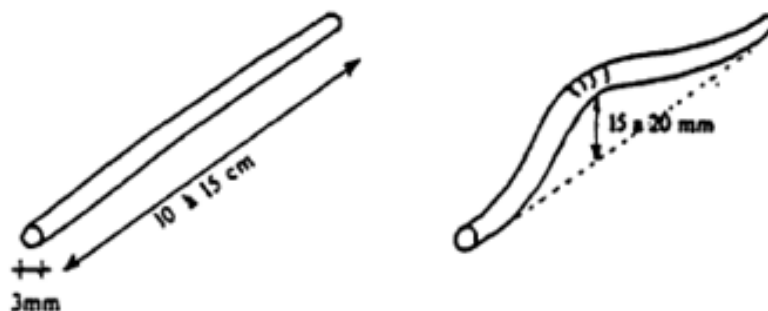
**Tableau II-3** : Les tapes de l'essais limites de liquidité (Marne d'Oued Nechou ).

<p>❖ 1) Siphonage de matériaux dans le tamis 0.4 mm</p>	
<p>❖ 2) Malaxer la totalité de la prise de telle sorte à obtenir une pâte homogène et presque fluide.</p>	
<p>❖ 3) divisez l'échantillon en deux moitiés</p>	






### B) Limite de plasticité $W_p$ : (norme N F P 94-051) :

Pour déterminer la limite de plasticité, on roule l'échantillon en forme de cylindre qu'on amincit progressivement. La limite de plasticité est la teneur en eau du cylindre qui se brise en petits tronçons de 1 à 2 cm de long au moment où son diamètre atteint 3 mm. Il faut donc réaliser des rouleaux de 3 mm de diamètre sans pouvoir faire de rouleaux plus fins. On exécute en général deux essais pour déterminer cette limite. La méthode suivie dans cet essai est résumée dans le tableau suivant.



*Figure II-4- Principe de la limite de plasticité*

**Tableau II-4** : Le principe de l'essai de limites de plasticité (Marne d'Oued Nechou ).

<p>❖ 1) Le sol est encore fluide et nous n'arrivons pas à confectionner le bâtonnet il faut sécher un peu le matériau.</p>	
<p>❖ 2) le bâtonnet commence à se fissurer trop tôt le matériau et sec .il faut l'humidifier un peu.</p>	
<p>❖ 3) conserver les échantillons dans l'étuve à 55° pendant 48 heures.</p>	

**C) L'indice de plasticité, noté  $I_p$  (norme N FP 94-051) :**

C'est le paramètre le plus couramment utilisé pour caractériser l'argilosité du sol, il s'exprime par la relation :

$$I_p = W_L - W_P$$

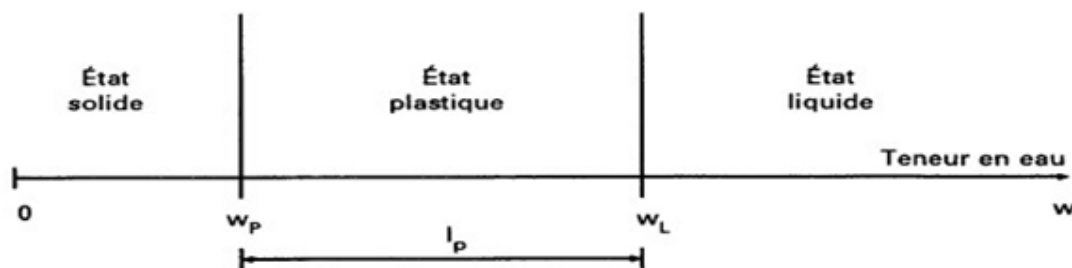


Figure II-5 – représentation des limites d'Atterberg

Les résultats des limites d'Atterberg sont résumés dans le tableau II-5.

Tableau II-5 : Valeur de limites d'Atterberg des matériaux

	Matériaux		Spécifications		
	Marne	Sable calcaire	TRS	CTTP	GTR
<b>Les limites d'Atterberg</b>					
$w_L$ (%)	32.64	19.88	-	< 40	-
$w_P$ (%)	20.42	N.M*	-	-	-
$I_P$ (%)	12.22	N.M*	< 13	< 15	≤ 12

\*N.M : non mesurable

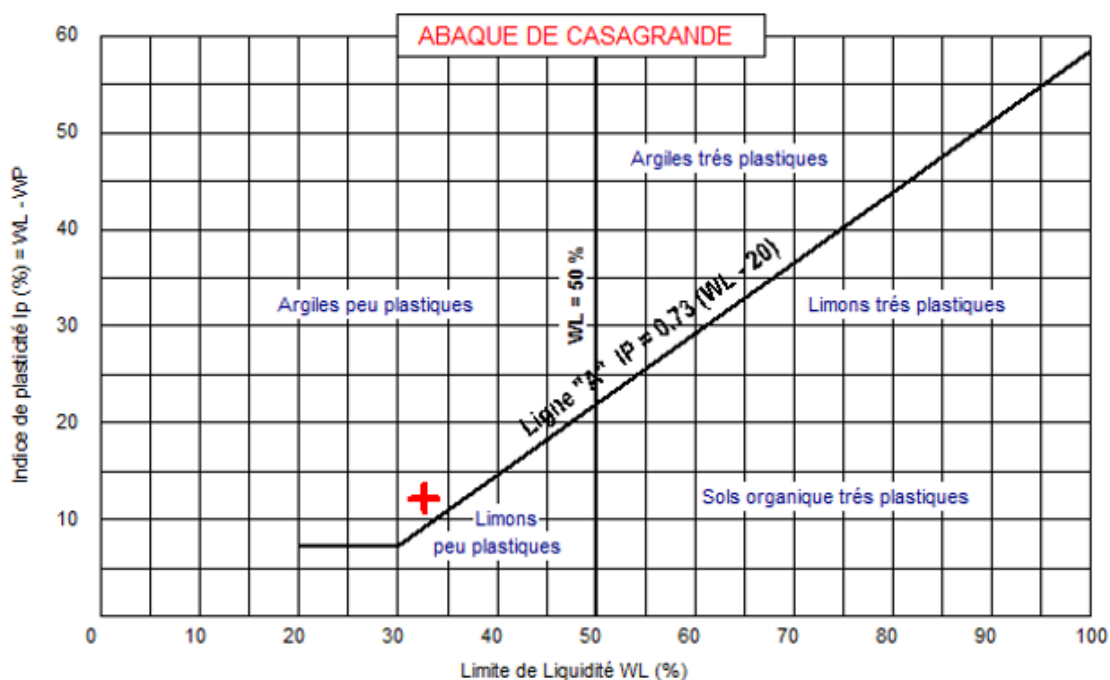
Les résultats du tableau coïncident avec les résultats de l'analyse granulométrique où nous avons trouvé un pourcentage des fractions inférieures à  $80\mu\text{m}$  de 55% pour la marne et 23% pour le sable calcaire ; ceci peut donner une indication intéressante sur la nature argileuse des fines de marne d'Oued Nechou. la limite de liquidité et l'indice de plasticité de la marne sont inférieurs aux seuils préconisés par les spécifications TRS, CTTP et GTR.

D'après la classification de Cornell (1951) (Tableau II-6), on trouve que la marne se classe comme un sol **plastique** et le sable calcaire comme **non plastique**.

La positionnement de la marne par rapport au diagramme de Casagrande (figure II-6) montre que notre matériau est positionné au-dessus de la ligne A (zone d'argile), se classe comme **argile peu plastique**.

**Tableau II-6** : 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	Plastique







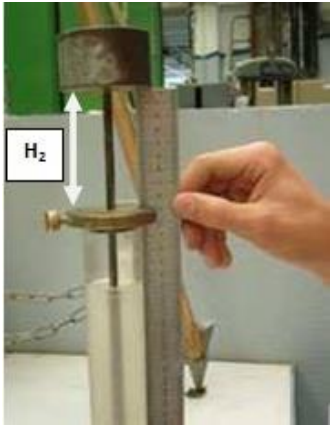
**Figure II-6** - Abaque de Casagrande.

**II-3-2-2 Essai d'équivalent de sable :**

L'essai est réalisé selon la norme NFP 18-598. Il consiste à séparer, dans une éprouvette, au moyen d'une « solution lavant », les éléments grossiers qui sédimentent et les éléments fins qui restent en suspension. L'essai est effectué sur 120g de sol. Le tableaux II-7 illustre les étapes de cet essai.

**Tableau II-7 : Les étapes d'essais de l'Equivalent de sable ES.**

<p>❖ 1) Remplissage chaque éprouvette avec une solution de lavage jusqu'au premier trait et ajoutez (<math>m = 120</math> g) de matériau sec.</p>	
<p>❖ 2) Imbibition du matériau pendant 20 minutes dans la solution lavante.</p>	
<p>❖ 3) Placer le tube dans la machine vibrante (90 vibres en 30 secondes).</p>	

<p>❖ 4) Lavage du matériau avec la solution lavant jusqu'au trait supérieur.</p>	
<p>❖ 5) Mesure de la hauteur <b>h2</b> et de la hauteur <b>h1</b> de l'ensemble sable plus flocculat après 20 minutes de décantation</p>	

Les valeurs de l'équivalent de sable trouvés sont :

- Pour la marne d'Oued Nechou : ES = 10.27%.
- Pour le Sable calcaire : ES = 54.74%.

La valeur de Es pour la marne, montre la pollution argileuse de notre échantillon. Cela s'explique peut-être, aussi, par les fines gypseuses et calcaires qui ont causé la faiblesse de la valeur de ES. Donc il faut compléter cette analyse par l'essai au bleu de méthylène pour étudier la qualité des fines. Le résultat du sable calcaire montre que notre échantillon est un matériau peu propre.

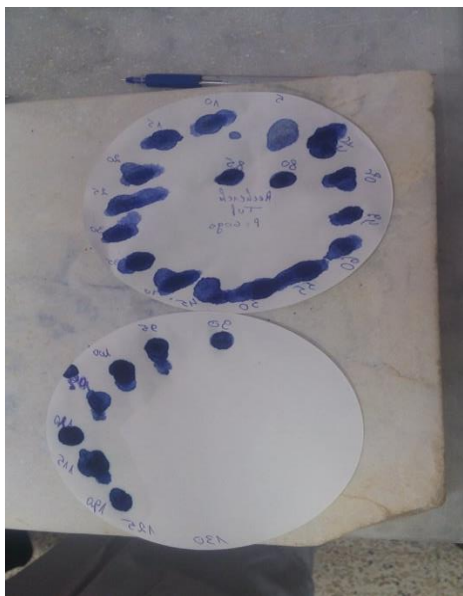
### II.3.2.3 Essai au bleu de méthylène :

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



La tache formée se compose d'un dépôt central du matériau, coloré d'un bleu soutenu, entouré d'une zone humide incolore. La saturation des fines en bleu de méthylène se traduit par la formation d'une auréole bleu clair persistante autour de dépôt central (voir les photos II-6 et II-7).

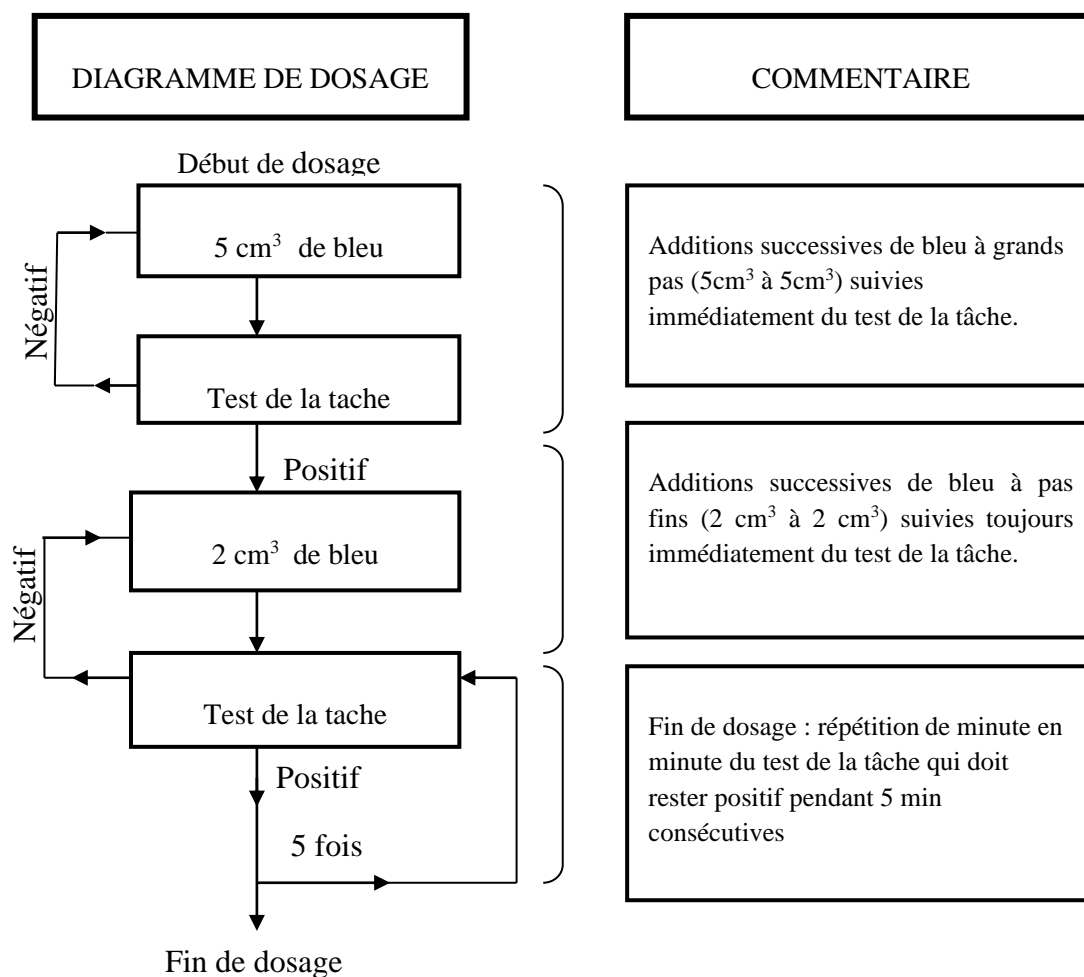
On appelle valeur de bleu de méthylène VB, la quantité exprimée en gramme de bleu de méthylène absorbée par 60 g de fines.



**Photo II-6 :** Auréole de bleu de Marne  
D'Oued Nechou



**Photo II-7 :** Auréole de bleu de sable  
calcaire



**Figure II-7 : Schéma du dosage de l'essai du bleu méthylène**

Le tableau II-8 représente les valeurs de bleu de nos échantillons.

**Tableau II-8 : Valeur de coefficient  $V_B$ .**

Matériaux	$V_B$	Spécifications		
		TRS	CTTP	GTR
Marne	1.27	-	-	< 1,5
Sable calcaire	0.05	-	-	< 1,5

Les résultats de ce essai montrent que la valeur de  $V_B$  de la marne est supérieure à celle exigée au GTR.

Si nous adoptons la classification du tableau II-9, nous trouvons que :

- La marne est un matériau **très pollué** ( $V_B > 1$ ).
- Le sable calcaire est un **matériau propre** ( $V_B < 0.2$ ).

**Tableau II-9** : Classification des sols selon la valeur de  $V_B$ . (GTR 92)

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
$1 < V_B$	Matériau très pollué

### II.3.3 Essai de compactage et de portance :

#### II.3.3.1 Essai Proctor Modifié :

L'essai a été réalisé selon les prescriptions de la norme NFP 94-093. Il a pour but de déterminer les conditions optimums de compactage des sols, pour obtenir la meilleure densité avec une énergie d'intensité normalisée. L'essai consiste à compacter un certain nombre d'échantillons à différents teneurs en eau et à même niveau d'énergie de compactage ( $4540\text{kJ/m}^3$ ). Cette énergie est appliquée au sol en 5 couches de 25 coups de la dame Proctor modifié (sols dans les plus gros éléments ont un diamètre inférieur à  $5\text{mm}$ ). A chaque teneur en eau on utilise un nouvel échantillon de matériau pour déterminer la densité sèche maximale.



**Photo II-8** : Matériel de Proctor modifié

Les résultats de cet essai sont représentés dans la figure II-8.

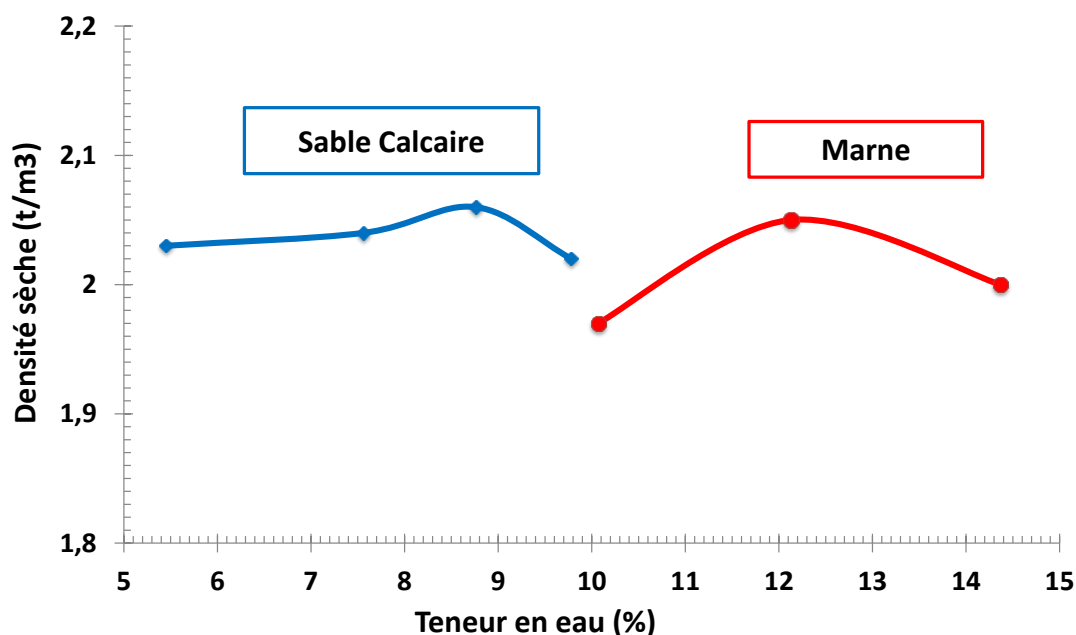


Figure II-8 : Courbe Proctor du la marne et du sable calcaire.

Tableau II-10 : Caractéristiques de compactage des matériaux utilisés.

	Marne	Sable calcaire	TRS
Poids volumique sec maximal $\gamma_{dmax}$ (g/cm <sup>3</sup> )	2.05	2.06	> 1,7
Teneur en eau optimale $w_{opt}$ (%)	12.5	8.5	-

D'après la Figure II-8 on remarque que :

Pour la marne

- La densité sèche maximale est de l'ordre de 2.05 t/m<sup>3</sup> qui est obtenue pour une teneur en eau optimale de 12.5%,
- 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-11.

- Donc ce matériau est relativement sensible à la variation de la teneur en eau.

Pour le sable calcaire la densité sèche maximale est de l'ordre de  $2.06 \text{ t/m}^3$  qui est obtenue pour une teneur en eau optimale 8.5%. La courbe Proctor est légèrement aplatie par rapport à la courbe de la marne, cela signifie que la densité sèche est peu sensible à la teneur en eau jusqu'à l'optimum Proctor. Ce qui veut dire que les fines existantes est peu sensible à l'eau.

Les valeurs de la densité sèche maximale de la marne et le sable calcaire sont inférieurs à celles exigées par la TRS.

**Tableau II-11 : Caractéristiques de compactage pour quelques matériaux routiers (Gandil P. 1988).**

<i>Nature de matériaux</i>	$\gamma_{dmax}$ ( $\text{t/m}^3$ )	$\omega_{opt}$ (%)
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.3.3.2 Essai CBR :

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

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

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

On trace les courbes qui représentent la pression du piston en fonction de son enfoncement, puis on détermine l'indice CBR ( $\text{CBR} = \text{Sup} (P(2,5) / 0,7, P(5) / 1,05)$ ).

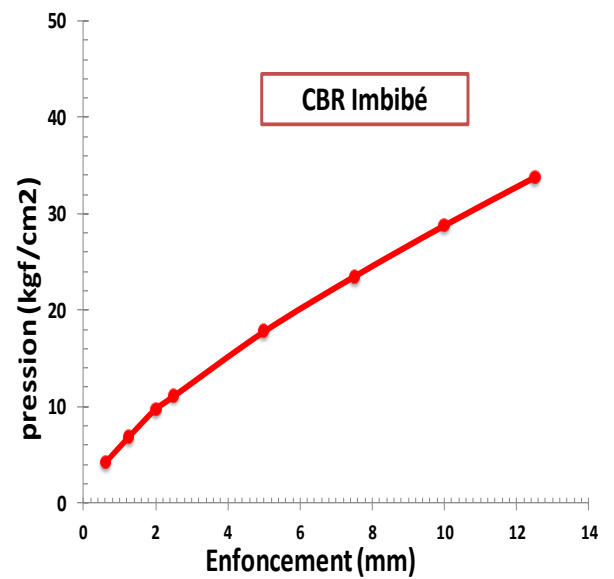
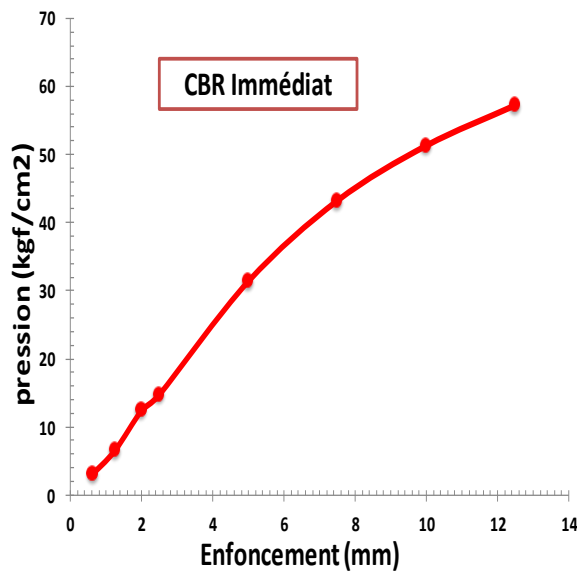
La Variation de la pression du piston en fonction de son enfoncement pour les essais CBR immédiat et imbibé est représenté dans les figures II-9 et II-10 respectivement.



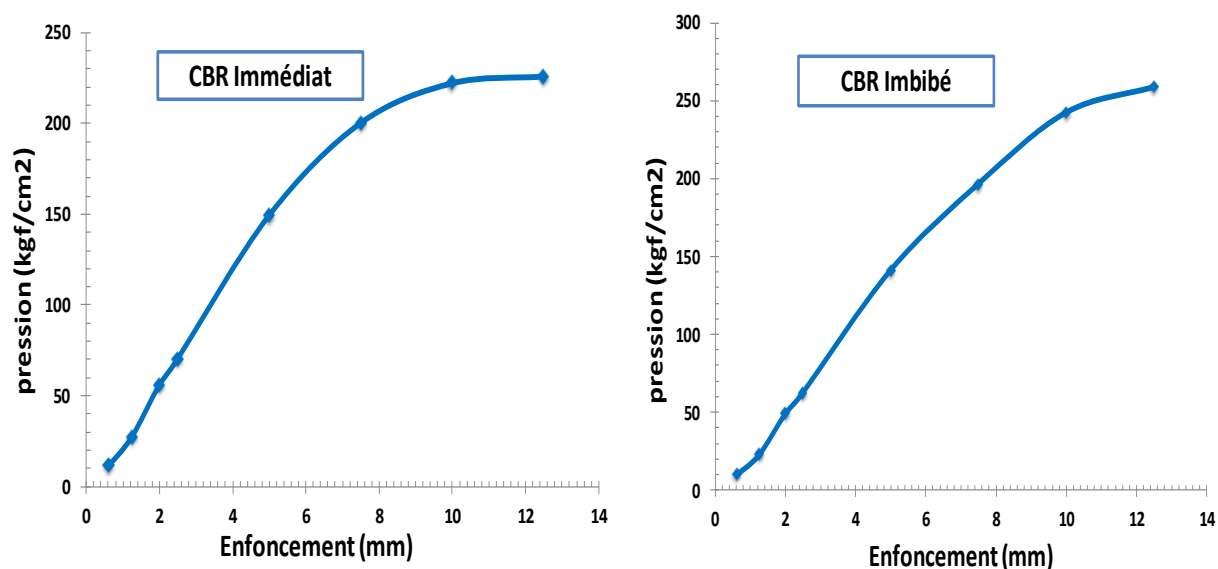
*Photo II-9 : Presse CBR pour poinçonnement et écrasement Des éprouvettes de compression simple*



*Photo II-10 : Préparation d'essai CBR imbibé*



*Figure II-9 :Variation de la pression du piston en fonction de son enfoncement (Marne)*



**Figure II-10 :** Variation de la pression du piston en fonction de son enfoncement (Sable calcaire ).

Le tableau II-12 représente les valeurs de la portance de nos échantillons. D'après ces résultats on remarque que l'indice CBR immédiat et imbibé de la marne sont inférieurs au seuil préconisé par la TRS. Par contre, ceux de sable calcaire sont largement supérieurs. Les indices portants après 4 heures d'immersion, sont plus faibles que les indices immédiats. En effet, On constate, une réduction de 45 % pour la marne et de 5% pour celle du sable calcaire. Ces valeurs montrent la sensibilité de la marne et l'insensibilité de sable calcaire à l'eau.

**Tableau II-12 :** Résultats de l'essai de la portance.

	Matériaux		Spécifications		
	Marne	Sable calcaire	TRS	CTTP	GTR
<i>I CBR Immédiat (%)</i>	29.91	142.13	> 40	-	-
<i>I CBR Imbibé (4h) (%)</i>	16.93	134.36	-	-	-

### II.3.4 Essai de compression simple :

Dans cet essai sur une série d'éprouvettes cylindriques de dimensions ( $\varnothing = 5\text{cm}$ ;  $H = 10\text{cm}$ ), confectionnées à la teneur en eau optimale du Proctor modifié et à différentes compacités théoriques (100%, 98% et 95%) afin d'étudier la relation entre la résistance et la compacité.

Les principales étapes de préparation des échantillons sont :

1. Après le séchage de nos échantillons à l'air, la marne a été passée sur un tamis de 5 mm pour éliminer les grosses particules ;
2. Une quantité d'eau correspondant à l'OPM, a été ajoutée au matériau, en les mélangeant soigneusement à la main pour obtenir un mélange homogène ;
3. Stockage des matériaux dans un sac en plastique scellé pendant au moins 24 h pour obtenir des conditions d'humidité uniformes ;
4. Compactage statique selon la norme NFP 98- 230-2, à l'aide d'une presse CBR à une vitesse de 1,27 mm/mn et des moules à double piston ( $\varnothing = 5\text{cm}$ ,  $H = 10\text{cm}$ ) (Figure II-11). Le matériau est compacté en une seule fois dans le moule. Cette méthode de compactage conduit à une répartition homogène de la contrainte de compactage (Romero 1999; Ghembaza et al. 2007; Gueddouda et al. 2010).
5. Démoulages des éprouvettes compactées à l'aide d'une presse CBR à une vitesse de 1,27 mm/mn.

Le séchage des éprouvettes démoulées se fait à l'étuve à 55°C pendant 48h. Les résultats exprimés pour chaque essai sont les moyennes de 3 valeurs.





*Figure II-11 : les étapes d'essai compression.*

La figure II-12 présente la relation entre résistance à la compression ( $R_c$ ) et la compacité ( $C$ ). Nous remarquons que la résistance à la compression augmente d'une manière linéaire avec l'augmentation de la compacité, cela avec la relation suivante :

*Pour la marne :*

$$R_c = 1.6766 (c) - 140,77 \quad (R^2 = 0,9965) \quad (\text{II-1})$$

*Pour le sable calcaire :*

$$R_c = 0.1245 (c) - 9.7203 \quad (R^2 = 0,9117) \quad (\text{II-2})$$

Avec :  $R_c$  en bars.

La résistance à la compression correspondante à 98% de compacité, est de l'ordre de 23 bars pour la marne et 2.5 bars pour le sable calcaire. Tandis que la résistance à la compression correspondante à 95% de compacité, est de l'ordre de 18 bars pour la marne et 2 bars pour le sable calcaire. Donc, lorsque la compacité passe de 98% à 95%, la chute est de 22% pour la marne et 20% pour le sable calcaire.

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 ( $R_c = 1,8 \text{ MPa} > 1,5 \text{ MPa}$ ).

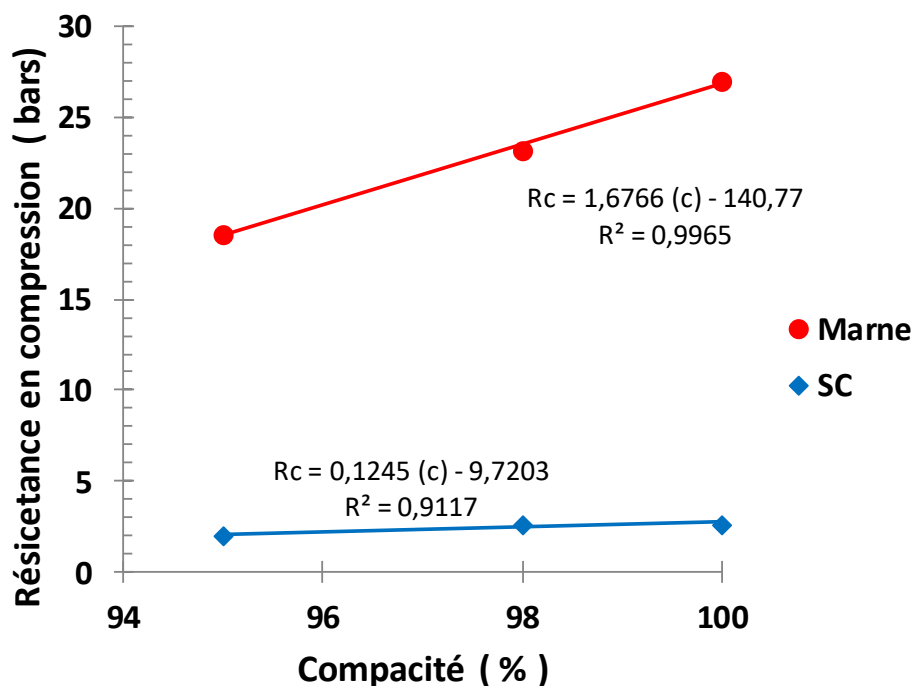


Figure II-12 : Variation de la résistance à la compression en fonction de la compacité.

### II.3.5 Analyse chimique :

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

Le Tableau II-13 résume les résultats de cet essai.

Tableau II-13 : Résultats de l'analyse chimique sommaire de la marne et du sable calcaire.

	Matériaux		Spécifications		
	Marne	Sable calcaire	TRS	CTTP	GTR
<i>Analyse chimique</i>					
Insolubles (%)	24.3	1.3	-	-	-
$\text{CaCO}_3$ (%)	68	90	-	$\geq 45$	-
$\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ (%)	1.71	-	-	-	-

D'après ces résultats on remarque que la marne est de nature chimique calcaire avec une teneur en  $\text{CaCO}_3$  de l'ordre de 68%. Le taux de  $\text{CaCO}_3$  pour le sable calcaire est élevé de l'ordre de 90%.

#### **II.4 RECAPITULATIF DES ESSAIS D'IDENTIFICATION :**

Le tableau II-16 résume les caractéristiques géotechniques et mécaniques de la marne d'Oued Nechou et de sable calcaire. Nous constatons que certaines caractéristiques de la marne et de sable calcaire ne répondent pas aux exigences de la technique routière saharienne TRS (Fenzy, 1966), catalogue de dimensionnement des chaussées neuves (CTTP, 2001) et le guide technique routière GTR (GTR, 1992). Donc les deux matériaux ne peuvent pas être utilisés à l'état brut dans les corps de chaussées.

**Tableau II-14 : Caractéristiques géotechniques et mécaniques de la marne d'Oued Nechou et de sable calcaire.**

	<b>Matériaux</b>		<b>Spécifications</b>		
	<b>Marne</b>	<b>Sable calcaire</b>	<b>TRS</b>	<b>CTTP</b>	<b>GTR</b>
<b>Analyse granulométrique</b>					
$D_{max}$ (mm)	5	3	-	20 - 40	< 50
% < 0.425 mm	63	49	-	36 - 52	-
% < 80 $\mu$ m	55	23	< 30	22 - 32	$\leq$ 35
$C_u$	65.22	19.77	-	-	-
$C_c$	0.072	0,62	-	-	-
<b>Les limites d'Atterberg</b>					
$w_L$ (%)	32.64	19.88	-	< 40	-
$w_p$ (%)	20.42	N.M*	-	-	-
$I_P$ (%)	12.22	N.M*	< 13	< 15	$\leq$ 12
<b>Equivalent de sable <math>E_s</math> (%)</b>	10,27	54,74	-	-	-
<b>Valeur de bleu VB</b>	1,27	0,05	-	-	< 1,5
<b>Compactage</b>					
$\gamma_{dmax}$ ( $kN/m^3$ )	2.05	2.06	> 17	-	-
$w_{OPM}$ (%)	12.5	8.5	-	-	-
<b>Portance</b>					
$I$ CBR Immédiat (%)	29.91	142.13	> 40	-	-
$I$ CBR Imbibé (4h) (%)	16.93	134.36	-	-	-
<b>Essai de compression simple à 98% de <math>\gamma_{dmax}</math> (MPa)</b>	2.3	2.59	> 1,5	-	-
<b>Analyse chimique</b>					
Insolubles (%)	24.3	1.3	-	-	-
$CaCO_3$ (%)	68	90	-	$\geq$ 45	-
$CaSO_4, 2H_2O$ (%)	1.71	-	-	-	-

## II.5 CLASSIFICATION :

Selon la classification USCS (*Unified Soil Classification System*), la Marne se classe comme : **GA (GC) (Grave Argileuse)** et le sable calcaire comme : **SL (SM)** il se classe parmi les sables propres bien gradués (**SW**).

Selon le GTR (Guide des terrassements routier), la marne se classe comme A2 sachant que la classe A2 est « sables fins argileux, limons, argiles et marnes plastiques. » et le sable calcaire est Classe B5 sols sableux et graveleux avec fines : sables et grave très silteux.

## II.6 CONCLUSION :

Les essais d'identification géotechnique et minéralogique ont pour but de situer les matériaux routiers par rapport aux spécifications et normes retenues pour leurs emplois en corps de chaussée, pour une éventuelle sélection.

Les essais réalisés nous ont permis de conclure que :

La marne est un matériau qui se compose essentiellement de calcaire ( $\text{CaCO}_3 = 68\%$ ), il a une courbe granulométrique très étalée, La fraction 0/80 $\mu\text{m}$  est de l'ordre de 55%. La courbe granulométrique montre que ce matériau appartient à la famille III qui englobe les matériaux fins dont la résistance est obtenue principalement par cohésion.

Dans les essais de compactage, nous avons vu que la teneur en eau optimale de la marne est assez élevée par rapport à celle des matériaux routiers habituels. La densité sèche maximale de notre matériau est sensible à la teneur en eau ainsi que sa portance.

Concernant le sable calcaire, ce dernier a une courbe granulométrique uniforme très sériée, la fraction des fines (< 80 $\mu\text{m}$ ) de l'ordre de 23%. Ce matériau est propre et ne présente aucune plasticité. Sa densité sèche égale est insensible à la teneur en eau ainsi que sa portance CBR.

Nous avons vu dans ce chapitre que certaines caractéristiques de nos matériaux 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.

**CHAPITRE III**  
**Etude d'optimisation**

## **ETUDE D'OPTIMISATION**

### **III.1 INTRODUCTION :**

Dans le chapitre précédent, nous avons effectué une identification géotechnique et minéralogique de la marne et le sable calcaire, permettant de les classer et d'identifier son utilisation potentielle dans la construction des chaussées. Afin de profiter au mieux de ces deux sols, ce chapitre est consacré à la correction des caractéristiques qui ne répondent pas aux exigences des critères, avec une technique de stabilisation économique permettant de valoriser à la fois la marne et le sable calcaire. En effet, on va étudier les effets de l'ajout de sable calcaire sur les caractéristiques physico-mécaniques de la marne.

Ce chapitre est divisé en deux parties :

La première est consacrée à l'étude des effets de l'ajout de sable calcaire sur les caractéristiques immédiates de la marne, telles que : les limites d'Atterberg, la densité sèche maximale, la teneur en eau optimale et C.B.R immédiat et imbibé.

Dans la deuxième partie, on caractérise le comportement mécanique des différents mélanges Marne-sable calcaire à l'aide de l'essai de compression simple.

L'objectif est d'obtenir des mélanges qui confèrent des caractéristiques meilleures par rapport aux matériaux de base, et de sélectionner une formule optimale marne-sable calcaire (nommé M-SC) qui offre les meilleures caractéristiques géotechnique et performances mécaniques, par rapport aux mélanges choisis.

Plusieurs mélanges de Marne-sable calcaire (M-SC) ont été choisis : 100% M + 0% SC, 90% M + 10% SC, 80% M + 20% SC, 70% M + 30% SC, 60% M + 40% SC, 50% M + 50% SC et 0% M + 100% SC.

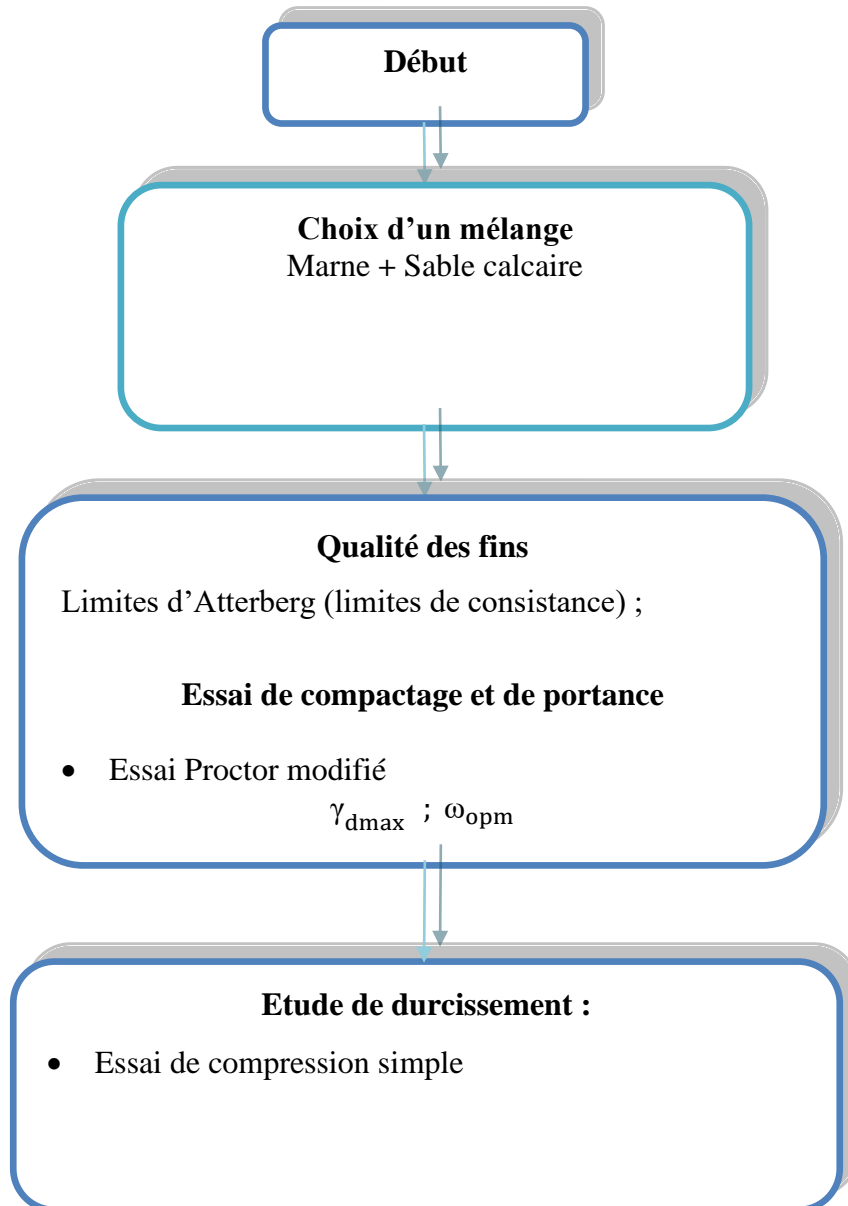
### **III.2 ETUDE DE L'INFLUENCE DE L'AJOUT DE SABLE CALCAIRE AU LABORATOIRE :**

Notre étude au laboratoire est composée des investigations suivantes :

- Influence de l'ajout de sable calcaire sur les limites d'Atterberg ;

- Influence de l'ajout de sable calcaire sur les caractéristiques immédiates (densité sèche, teneur en eau optimale et la portance immédiat et imbibé) ;
- Influence de l'ajout de sable calcaire sur les caractéristiques mécaniques : Essais de compression simple.

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



*Figure III-1-Organigramme d'étude de traitement*



### III.2.1 L'influence de l'ajout de sable calcaire sur les caractéristiques immédiates

#### III.2.1.1 limites d'Atterberg :

Une série d'essais avec différent pourcentage de sable calcaire a été effectuée pour déterminer l'effet de l'ajout de sable calcaire sur les limites d'Atterberg. Les essais sont réalisés selon la norme NFP 94-051. Les étapes des essais sont faites de la même manière que dans le chapitre II.

Le tableau III-1 présente la variation de la limite de liquide, la limite de plasticité et l'indice de plasticité en fonction de la teneur en sable calcaire. Nous remarquons que les limites d'Atterberg décroissent avec l'augmentation de la teneur en sable calcaire. Selon les normes TRS, CTP et GTR, l'ajout d'une quantité de sable calcaire supérieure ou égale à 10% satisfait aux exigences des critères.

Le positionnement des différents mélanges dans l'abaque de Casagrande (figure III-2) montre que les points se décalent d'argile plastique vers argile non plastique suite à l'augmentation de pourcentage de sable calcaire. Tous les points se trouvent au-dessus de la ligne A.

**Tableau III-1 : Valeur de limites d'Atterberg de chaque mélange**

Matériaux	w <sub>L</sub> (%)	w <sub>p</sub> (%)	IP (%)
<b>100 % Marne</b>	32.64	20.42	12.22
<b>90% Marne + 10% SC</b>	30.40	18.59	11.81
<b>80%Marne + 20% SC</b>	29.50	18.22	11.28
<b>70%Marne + 30% SC</b>	28.53	18.22	10.31
<b>60%Marne + 40% SC</b>	26.57	17.07	9.50
<b>50%Marne + 50% SC</b>	25.23	16.66	8.57

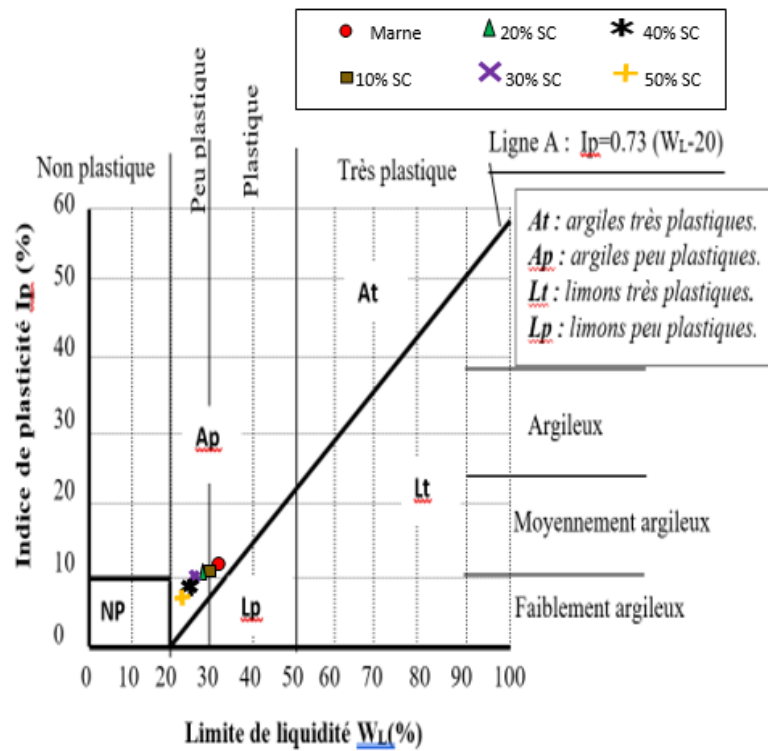


Figure III-2- abaque de casagrande de chaque mélange

III.2.1.2 Essai Proctor modifié :

Les résultats de l'essai Proctor modifié sont représentés dans la figure III-3.

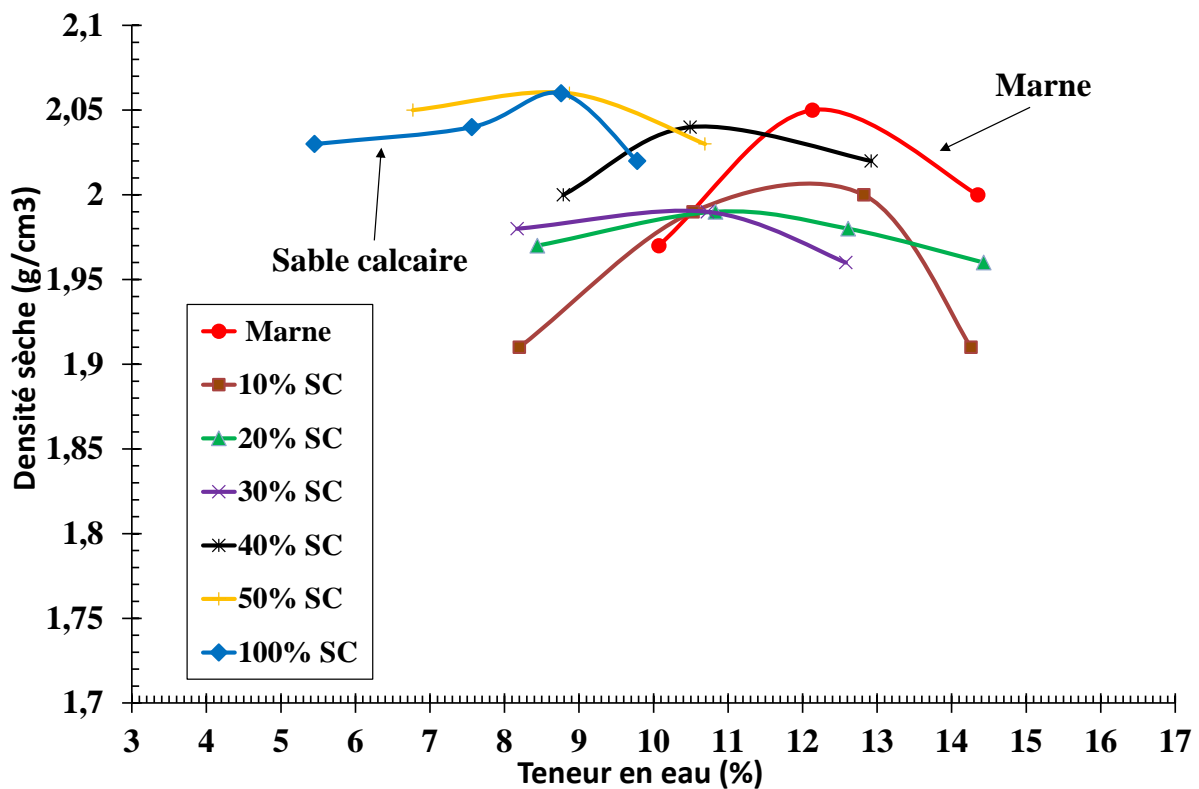


Figure III-3 : Courbe Proctor modifié des mélanges (Marne + Sable calcaire).

D'après la figure III-3, on remarque que plus qu'on ajoute le sable calcaire, les courbes Proctor modifié se déplacent vers la gauche. Suite à l'ajout de sable calcaire, l'allure des courbes se converge vers aplatissement, ce qui traduit la diminution de la sensibilité de la densité sèche vis-à-vis de la teneur.

L'influence de l'ajout de sable de dune sur les caractéristiques optimales déduites des courbes Proctor est présentée dans le tableau III-2. Nous constatons que l'ajout de sable calcaire conduit à :

- Une diminution de la densité sèche optimale suite à l'augmentation du pourcentage de sable calcaire, Cette diminution atteint un minimum ( $1,99 \text{ g/cm}^3$ ) dans le cas des mélanges avec 20% et 30% de sable calcaire, puis elle augmente à  $2.06 \text{ g/cm}^3$ .
- Une diminution de la teneur en eau optimale, elle atteint 8.5% dans le cas de l'ajout de 50% de sable de dune, soit une diminution de 30% par rapport à la marne brute. Cela est un avantage concernant le manque d'eau dans les régions sahariennes ;

*Tableau III-2 : Résultats de l'essai Proctor modifié.*

Formule	W <sub>opm</sub>	Y <sub>dmax</sub>
<b>100% Marne</b>	12.5	2.05
<b>90% Marne +10% SC</b>	12.0	2.01
<b>80% Marne +20% SC</b>	11.1	1.99
<b>70% Marne +30% SC</b>	10.9	1.99
<b>60% Marne +40% SC</b>	10.5	2.04
<b>50% Marne +50% SC</b>	8.8	2.06
<b>100% Sable calcaire</b>	8.5	2.06

### III.2.1.3 Essai CBR :

C'est un essai dont le but est d'apprécier la portance routière des matériaux. Il est réalisé de même manière que celle décrite au chapitre. Les figures III-4 et III-5 représentent la variation de l'effort de poinçonnement en fonction de l'enfoncement pour les différents mélanges.

Le Tableau III-3 représente les différentes caractéristiques de compactage et de portance des différents mélanges à différents états et celles de leur état de référence.

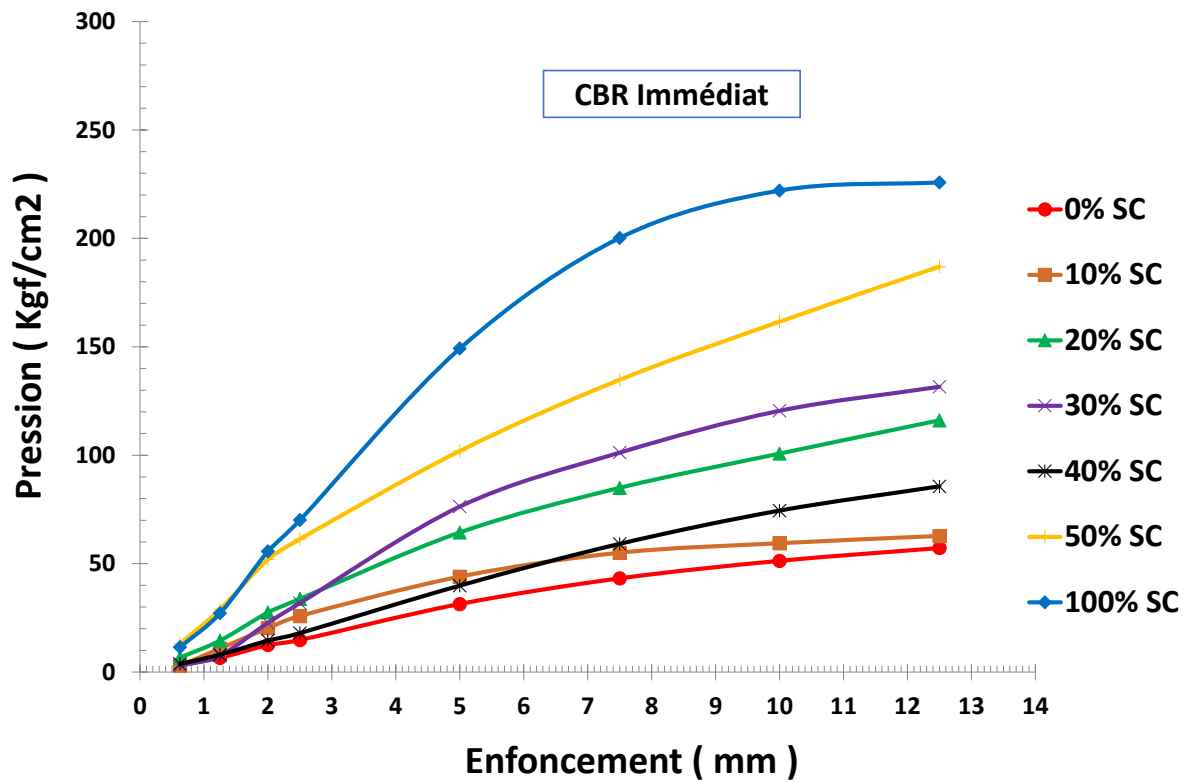


Figure III-4 : Courbes d'effort de poinçonnement en fonction de l'enfoncement pour CBR Immédiat.

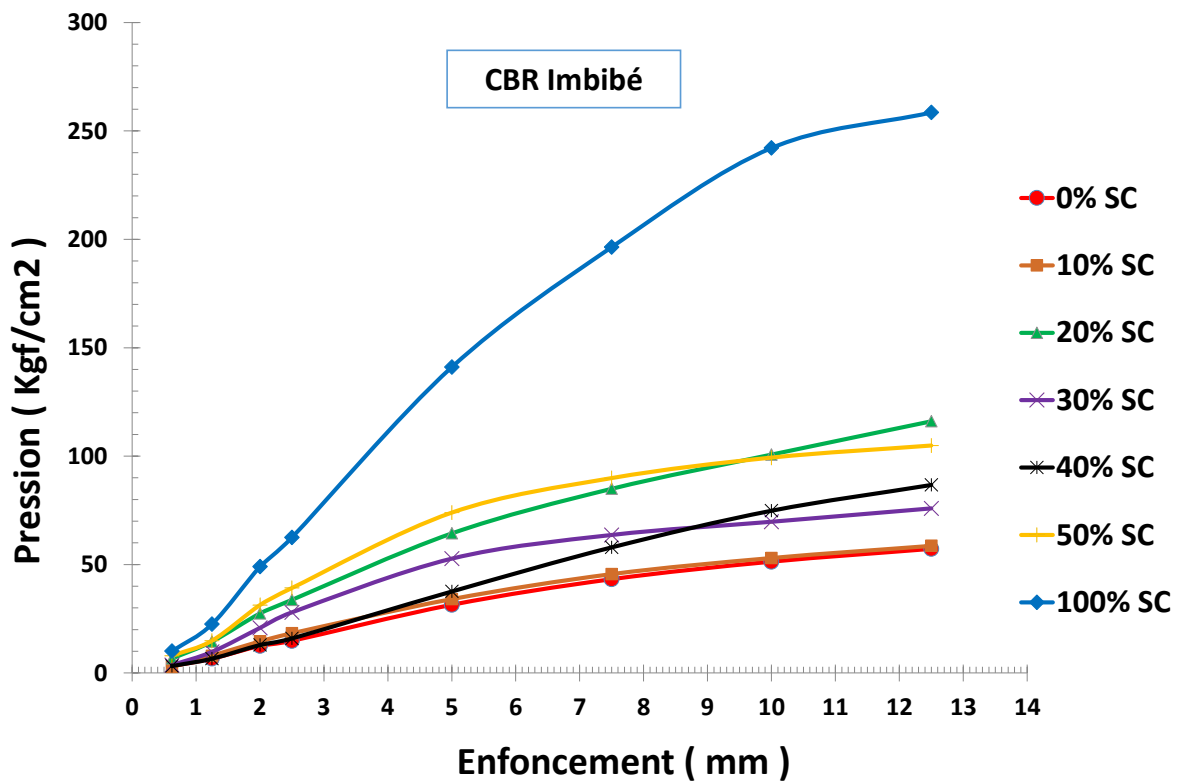


Figure III-5 : Courbes d'effort de poinçonnement en fonction de l'enfoncement pour CBR Imbibé.

**Tableau III-3 : Résultats récapitulatifs de compactage et de portance.**

Essais	Proctor modifié		Portance	
	$w_{opt}$ (%)	$\gamma_{dmax}$ (t/m <sup>3</sup> )	I CBR Immédiat	4 heures d'immersion
<b>100% Marne</b>	12.5	2.05	29.91	16,93
<b>90% Marne + 10% SC</b>	12.0	2.01	41,926	32,447
<b>80% Marne + 20% SC</b>	11.1	1.99	61.330	45.683
<b>70% Marne + 30% SC</b>	10.9	1.99	72.725	50.207
<b>60% Marne + 40% SC</b>	10.5	2.04	37.976	35.80
<b>50% Marne + 50% SC</b>	8.8	2.06	97.128	70.403
<b>100% Sable calcaire</b>	8.5	2.06	142.125	134.362

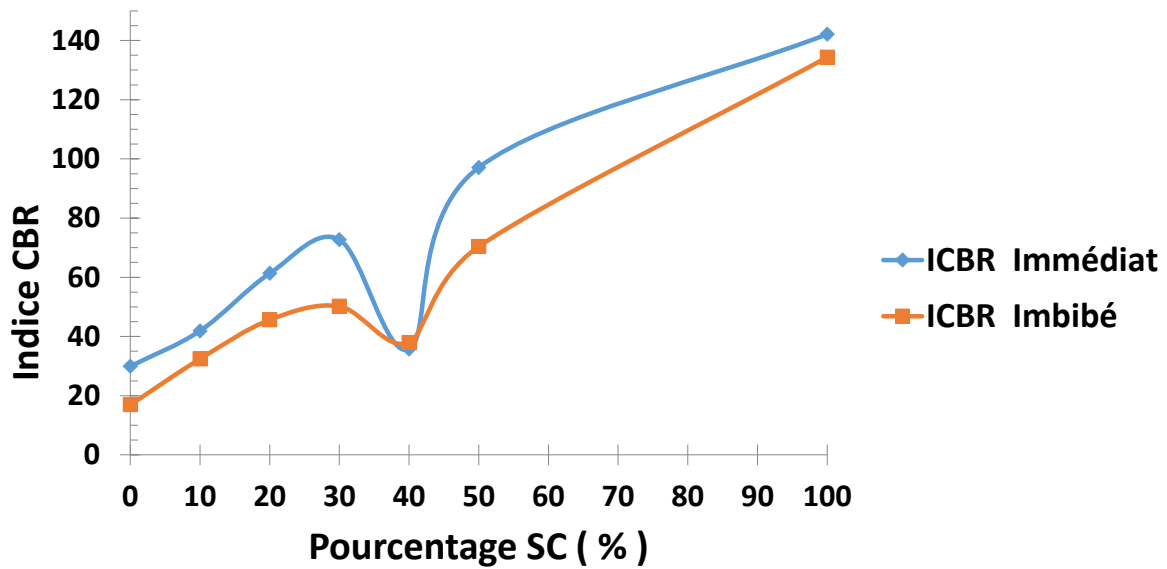
D'après ces résultats, on constate que :

- L'ajout de sable calcaire influe positivement sur les indices CBR immédiat et imbibé ;
- Les valeurs des indices CBR imbibé sont inférieures à celles immédiat. Cela est dû à la sensibilité de la marne à l'eau.
- Les indices CBR immédiat et imbibé augmente d'une façon significative. Les maximums sont atteints avec l'ajout de 50% de sable calcaire, avec ce pourcentage, on note un gain d'environ 225% et 315% pour ICBR immédiat et imbibé respectivement.

Les valeurs du tableau III-4, comportant le référentiel de l'indice de portance immédiat, montrent que :

- Les mélanges M-SC représentent une compactibilité élevée et une bonne traficabilité par rapport à la marne brute. D'autres auteurs (Goual, et al 2012, Cherrak, et al 2015, Daheur, et al. 2012, 2015) ont obtenu des résultats similaires.
- L'ajout de 20% de SC conduit à une compactibilité moyenne à élever, Compactage aisé et traficabilité correcte dans des conditions normales de sollicitations.

D'après ces résultats, on peut admettre a priori le pourcentage de 20% de sable calcaire, comme un pourcentage optimal satisfait les conditions technique et économique pour avoir une meilleure stabilité immédiate.



*Figure III-6 : Variation des indices CBR immédiat et imbibé en fonction de pourcentage du Sable calcaire.*

*Tableau III-4 : 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 difficulté.	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.

### III.2.2 Influence de l'ajout de Sable calcaire sur les performances mécaniques

Cette partie rentre toujours dans le cadre de la recherche d'une formulation optimale. En effet, on va caractériser le comportement mécanique des mélanges Marne-sable calcaire (M-SC) sous l'essai de résistance à la compression simple.

### III.2.2.1 Préparation des échantillons

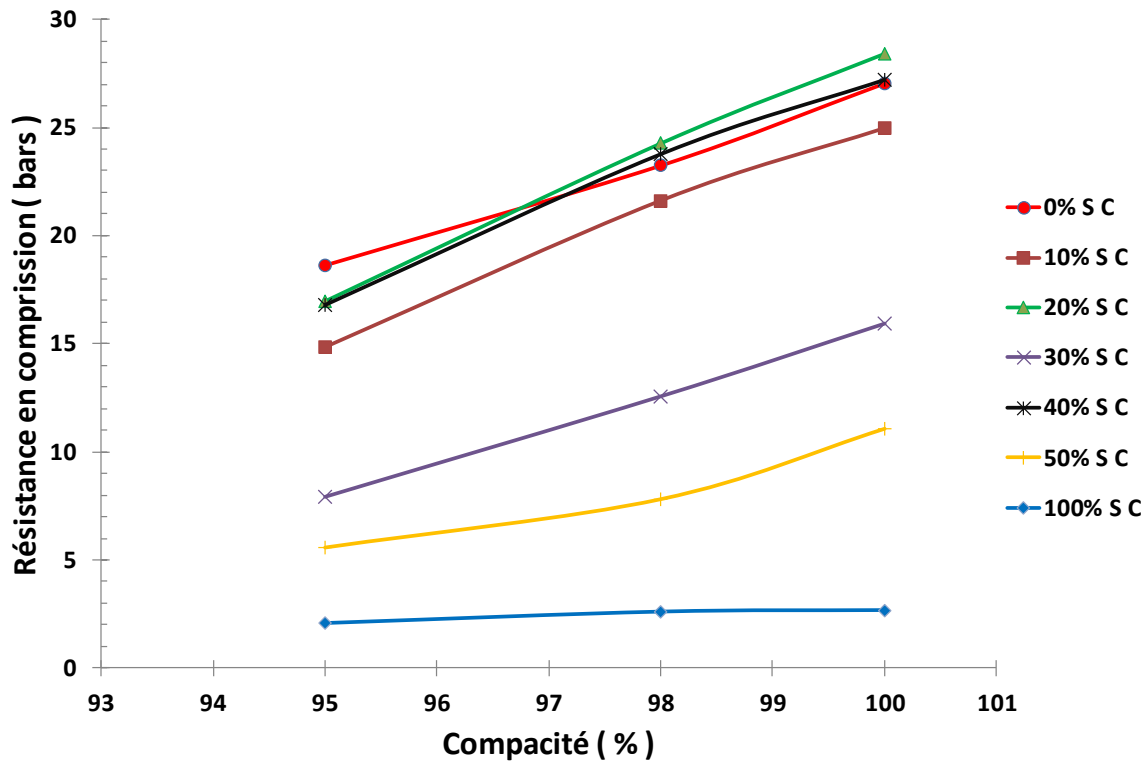
La préparation des échantillons se fait en quatre étapes principales :

- (1) Elimination des grosses particules de la marne par tamisage au tamis de 5mm ;
- (2) Les deux sols (Marne et sable calcaire) sont séchés à l'air, puis les différentes fractions de sable calcaire et de la marne ont été mélangées (jusqu'à l'obtention d'une couleur uniforme) pour obtenir différents mélanges M-SC.
- (3) Une quantité d'eau correspondante à la teneur en eau optimale de chaque mélange, est ajoutée. Puis, le mélange est malaxé soigneusement manuellement à travers un tamis ( $\varnothing = D_{\max}$ ), afin d'éviter la formation de grumeaux et d'obtenir un mélange homogène. Ensuite, Le mélange a été stocké dans un sac en plastique scellé pendant au moins 24 h pour obtenir des conditions d'humidité uniformes.
- (4) En fin, le mélange M-SC est compacté statiquement à différents compacité (95%,98%, 100%) dans un moule à double piston, à une vitesse de 1,14 mm/min.



*Photo III-1 : les éprouvettes d'essai compression*      *Photo III-2 : l'éprouvette à l'écrasement*

La figure III-7 représente l'évolution de la résistance à la compression en fonction de la compacité, pour les différents mélanges M-SC. Les points présentés sont les moyennes de trois valeurs.

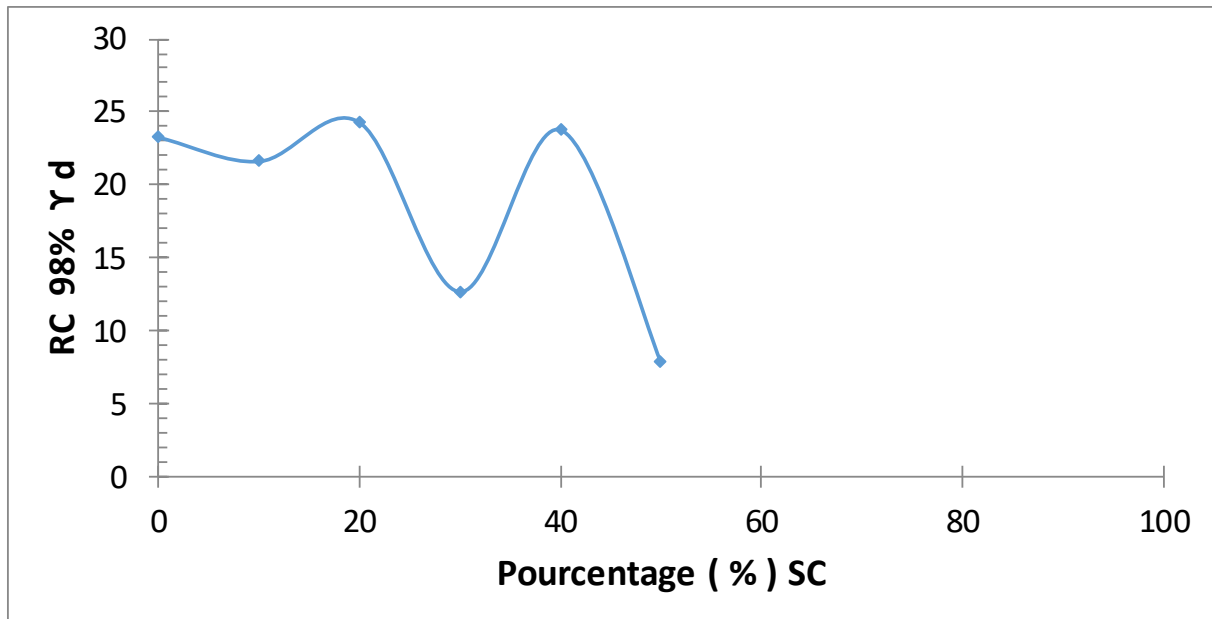


**Figure III-7 :** Variation de la résistance à la compression en fonction de la compacité.

La variation de la résistance à la compression à 98%  $\gamma_{dmax}$  pour les différents mélanges est représentée dans la figure III-8. On remarque que l'évolution de la résistance à la compression ne conserve pas la même allure. Elle diminue légèrement à 10% de la teneur en SC, puis à 20% elle augmente et elle garde une valeur supérieure à celle de la marne brute. A 30% et 50% de SC la résistance subit une chute considérable. La valeur maximale de RC est atteinte pour le mélange avec 20% de SC (25 bars)

Cet essai montre que le pourcentage 20% SC est le pourcentage optimal pour voir la meilleure résistance à la compression.





**Figure III-8 :** Variation de la résistance à la compression (à 98%  $\gamma_d$ ) en fonction de pourcentage de SC.

Comme nous avons vu dans la première partie, la formule la plus appropriée est celle contenant une quantité de sable calcaire de 20.

Basant sur les essais réalisés et tenant compte de l'aspect économique, la formule 80 % Marne + 20% sable calcaire est prise comme une formule optimale.

### III.3 CONCLUSION

Ce chapitre a été consacré à l'étude d'optimisation, où nous avons étudié l'influence de l'ajout de sable calcaire à la marne, dans le but de tirer un pourcentage optimal de sable calcaire. Cette influence se voit en premier lieu les caractéristiques immédiates, puis le comportement mécanique des différents mélanges M-SC.

Sur la base des résultats obtenus, on peut tirer les conclusions suivantes :

- L'ajout de sable calcaire diminue les limites d'Atterberg des mélanges ;
- La teneur en eau optimale diminue, au fur et à mesure que le pourcentage de sable calcaire augmente, tandis que le poids volumique sec maximal diminue jusqu'à atteindre un minimum pour une teneur en sable calcaire comprise entre 20 et 30%. Au-delà de 30 % il augmente.
- Les indices CBR immédiat et imbibé sont considérablement augmentés suite à l'ajout de sable calcaire.

Les résultats obtenus à partir de l'étude de la résistance en compression simple des différents mélanges M-SC, montrent que la résistance en compression maximale est atteinte pour une teneur en SC de 20 %.

La formule optimale retenue et qui satisfait les conditions technique et économique est « 80% de la Marne et 20% de sable calcaire ».

## CONCLUSION GENERALE

Notre étude entre dans le cadre de valorisation des matériaux locaux afin de généraliser leurs utilisations en techniques routières saharienne, avec l'exploitation des déchets de station de concassage dans le but de protéger l'environnement, et pour réduire l'épaisseur des structures de chaussées proprement dites, et éviter le recours à des transports onéreux et gênants, les deux contribuant de manière sensible à l'économie des projets routiers.

Nous avons vu que certaines caractéristiques de nos matériaux (le taux et la qualité des fines, la plasticité, et la portance) 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 CTTTP et le guide technique routière GTR.

L'étude d'optimisation a révélé que l'ajout du sable calcaire diminue les limites d'Atterberg des mélanges. La teneur en eau optimale diminue en fonction de l'augmentation de pourcentage de sable calcaire, tandis que le poids volumique sec maximal diminue jusqu'à atteindre un minimum pour un taux de sable calcaire comprise entre 20 et 30%. Au-delà de 30 % il augmente. Les indices CBR immédiat et imbibé sont considérablement augmenter suite à l'ajout de sable calcaire.

Les résultats obtenus à partir de l'étude de la résistance en compression simple des différents mélanges M-SC, montrent que la résistance en compression maximale est atteinte pour une teneur en SC de 20 %.

La formule optimale retenue et qui satisfait les conditions technique et économique est « 80% de la Marne et 20% de sable calcaire ».

Les démarches expérimentales proposées et les résultats obtenus mettent en évidence la possibilité de valorisation des matériaux locaux à base de marnes et de sable calcaire pour la mise au point d'un matériau routier saharien mécaniquement performant, économique et répondant aux exigences de la politique du développement durable.

La technique de stabilisation par incorporation de sable calcaire ouvre des perspectives qui permettront de valoriser les matériaux locaux dans des régions dépourvues de matériaux classiques. En effet, leur utilisation permet de réduire les coûts de projet, d'éviter le recours à des transports onéreux et gênants et préservation des ressources en matériaux de qualité.

Afin d'appliquer les résultats du laboratoire sur le terrain, on propose la réalisation de sections expérimentales (plateforme réelle) de type « plot d'essais » basé sur de modèles de calcul adaptés (ex : Alize III) et avec des procédures de compactage par engins dans le but d'étudier les problèmes posés par l'exécution sur chantier.

## **REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES**

**Abdelghani Inal (1980)** : « *Route en milieu désertique* », IV conférence routière africaine.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

**Ameraoui Z. (2002)** : « *Tufs d'encroûtements : utilisation dans la géotechnique routière* », Thèse de magistère de l'université de Mohamed Boudiaf Oran.

**Ben Dhia M. (1983)** : « *les tufs et encroûtements calcaires dans la construction routière* », Thèse de docteur de 3ème cycle de l'université de paris VI, oct.

**Ben Dhia.M.H. (1998)** : « *Quelques particularités de l'utilisation du sable de dune en construction routière en milieu saharien* » bulletin des laboratoires des ponts et chaussées.

**Boularak M. (1989)** : « *Mode de construction et contrôle des routes sahariennes* », Rencontre Maghrébine sur les techniques routières, Tunis, 20-23nov.

**Cherrak M. (2015)** : *Valorization of the use of calcareous tuff and dune sand in Saharan road design. J Civil Eng Archit 9(2015):665–676*

**Colombier, G. (1988) :** «Tufs et encroûtements calcaires. Utilisations routières» Synthèse, *ISTED*.

**CTTP (2001) :** «Catalogue de Dimensionnement des Chaussées neuves [Catalogue Dimensionnement des chaussées neuves] » . Organisation nationale des travaux publics, Algérie 2001.

**Derriche Z. et Iguechtal L., (2002) :** « Comportement de quelques ouvrages dans les argiles expansives d'In-Amenas », journées d'étude, Université de

**Domec M. (1980) :** « construction des chaussées au Sahara », Rapport technique de laboratoire central des travaux publics, Alger, septembre 1980.

**Dupas JM, Pecker A (1979) :** *Static and dynamic properties of sand–cement. J Geotech Eng* 105:419–436

**Daheur EG, Goual I, Taïbi S (2015) :** *Effect of immersion on the mechanical behaviour of gypsum-calcareous tuff treated with hydric or organically binders. In: 3th International conference on unsaturated soils. Batna, Algeria*

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

**Gandil, P :** « Cours de routes, ENPC, 1988 ».

**Ghembaza, M.S., Taïbi, S., Fleureau, J.-M., 2007 :** « Effet de la température su le comportement des sols non saturés sur les chemins de drainage et d'humidification» *Canadian Geotechnical Journal* 44, 1064-1081.

**Goual.I. (2012) :** « Amélioration des propriétés d'un tuf naturel utilisé en technique routière saharienne par ajout d'un sable calcaire ». *European Journal of Environmental and Civil Engineering*.16, 6, 744-763.

**GTR (1992) :** «Guide technique. Réalisation des remblais et des couches de forme [Technical guide. Realization of embankments and layers] ». LCPC-SETRA (Paris-Bagneux), Sept 1992, p 204.

**Gueddouda, M. K; Lamara, M; Abou-bekr, N; Taïbi, S. , 2010 :** « Hydraulic behaviour of dune sand–bentonite mixtures under confining stress». *Geomechanics and Engineering*, Vol. 2, No. 3, pp 213-227.

**Hamrouni .A (1975) :** « routes économique et routes à faible circulation XVème congrès mondial de la route MEXICO».

**Jennings J.E., et Evans G.A., (1962) :** « Practical procedures for building in expansive soil areas», *South Africa Builder*.

**Larabi, (1998) :** « *Comportement des assises en matériaux granulaires en zones désertiques. Séminaire International -La route transaharienne-, Tamanrasset, Algérie*».

**Mehidi .K.(1997) :** « *Contribution à l'étude du comportement mécanique des marnes remaniées de Kabylie* »,Mémoire de magister de l'Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, Algérie.

**Morsli M., Bali A., Fleureau J M., (2002) :** « *Conception et réalisation des chaussées en milieu désertique* », Journées Nationales de Géotechnique et de Géologie de l'ingénieur, Nancy.

**Morsli Meriem (2007) :** « *Contribution à la valorisation des tufs d'encroûtements en techniques routière saharienne* », Thèse de doctorat d'état, ENP Alger.

*Ouargla les 29 et 30/10/2002.*

**Romero, E.,(1999) :** « *Characterisation and thermo-hydro-mechanical behaviour of unsaturated Boom clay: An experimental study*». Thèse de Doctorat, Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelone, Espagne. 1999.

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

**Struillou, A., & Alloul, B. (1984) :** *Valorisation routière des tufs d'encroûtements en Algérie. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, Symposium International sur les Granulats, 465-469*

**Tagle,(1976) :** « *nouveaux concepts et matériaux dans la conception et la construction de chaussées anaales flexibles*». Acad. Buenos aires 1976.

**TCHOUANINANA J. M., (1999) :** « *“Coure mécanique de sol”, tome I, Propriétés des sols*».

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

**Zenkhri A.,(2010) :** « *Solutions de construction sur sol potentiellement gonflant application à la région d'In-Aménas* », Thèse présentée pour obtenir le diplôme de magister en Génie Civil spécialité géotechnique, Université Houari Boumediene.

## ANNEXE A

### ANNEXE A<sub>1</sub> : Analyse granulométrique par tamisage

#### Echantillon N°1 Marne d'Oued Nechou

Masse sec de l'échantillon à analyser (après étuvage) : M= 1200 g,

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

### ANNEXE A<sub>2</sub> : Analyse sédimentométrie

Durée de chute	Temps	Lecture de Densimètre R'	t (°C)	Correction (c)	Lecture corrigée R <sub>1</sub> = R' + C	% des éléments (D) sur l'ensemble de l'échantillon	D (mm)
26.4°C	8H20	30 "	20	+1.116	21.116	0.075	55
26.4°C	8H21	01'	19	+1.116	20.116	0.055	52
26.4°C	8H22	02'	18	+1.116	19.116	0.038	50
26.4°C	8H25	05'	16	+1.116	17.116	0.025	45
26.4°C	8H30	10'	14	+1.116	15.116	0.017	39
26.4°C	8H40	20'	12	+1.116	13.116	0.012	34
26.4°C	9H00	40'	09	+1.116	10.116	0.008	26
24.4°C	09H40	80'	04	+0.664	4.664	0.006	22
24.4°C	10H40	160'	02	+0.664	2.664	0.004	05



### ANNEXE A<sub>3</sub> : Analyse granulométrique par tamisage

#### Echantillon N°2 Sable Calcaire

Masse sec de l'échantillon à analyser (après étuvage) : M= 1500 g,

Poids de l'échantillon	Diamètre (mm)	Refus partielle (g)	Refus cumulé (g)	Refus (%)	Complément à 100	Tamisât (%)
1500	5	0,00	0,00	0,00	100,00	100
	2	234,20	234,20	15,61	84,39	84
	1	298,90	533,10	35,54	64,46	64
	0,4	252,10	785,20	52,35	47,65	48
	0,2	173,60	958,80	63,92	36,08	36
	0,1	156,90	1115,70	74,38	25,62	26
	0,08	34,00	1149,7	76,65	23,35	23

### ANNEXE A<sub>4</sub> : Analyse sédimentométrie

Durée de chute	Temps	Lecture de Densimètre R'	t (°C)	Correction (c)	Lecture corrigée R <sub>1</sub> =R'+C	% des éléments (D) sur l'ensemble de l'échantillon	D (mm)
30	8 h 30	4,5	28,8	+ 2,013	5,513	23	0,08
1	8 h 31	3	28,8	+ 2,013	5,013	22	0,075
2	8 h 32	2	28,4	+ 1,614	3,614	16	0,055
5	8 h 35	1	28	+ 1,770	2,770	8	0,038

## ANNEXE A<sub>5</sub> : Limites d'Atterberg

### Liquidité- Plasticité

#### Echantillon N°1 : Marne d'Oued Nechou

<b>Limite de liquidité</b>						
	1 Essai		2 Essai		3 Essai éventuellement	
Nombre de coups	<b>19</b>		<b>24</b>		<b>34</b>	
N° de la tare	055	139	125	355	108	294
Poids total humide	18.48	18,27	20.29	19,55	18.20	18.00
Poids total sec	16.93	16.75	18.38	17,8	17.10	16.83
Poids de la tare	13,79	13,71	14.09	13.94	13,87	13,79
Poids de l'eau	1,55	1,52	1,91	1,75	1,10	1,17
Poids du sol sec	3.14	3,04	4.29	3.86	3.23	3.04
Teneur en eau (%)	49.363	50.00	44.522	45.337	34.056	38.487
Moyenne	<b>49.68</b>		<b>44.93</b>		<b>36.27</b>	
Limite de liquidité	<b>44,22</b>					

<b>Limite de plasticité</b>			
	1 Essai	2 Essai	3 Essai
N° de la tare	X9	T3	X2
Poids total humide	9.73	9.47	9.62
Poids total sec	9.49	9.27	9.39
Poids de la tare	8.48	8.44	8.37
Poids de l'eau	0.24	0.20	0.23
Poids du sol sec	1.01	0.83	1.02
Teneur en eau (%)	23.76	24.09	22.54
Limite de plasticité	23.46		

## ANNEXE A<sub>6</sub> : Limites d'Atterberg

### Liquidité- Plasticité

#### Echantillon N°2 : Sable Calcaire

#### Limite de liquidité

	1 Essai		2 Essai		3 Essai éventuellement	
Nombre de coups	18		25		35	
N° de la tare	187	378	124	055	047	125
Poids total humide	22.75	22.22	23.49	24.45	24.52	22.89
Poids total sec	21.24	20.82	21.88	22.69	22.88	21.51
Poids de la tare	14.01	14.05	13.82	13.78	14.08	14.09
Poids de l'eau	1.51	1.4	1.61	1.76	1.64	1.38
Poids du sol sec	7.23	6.77	8.06	8.91	8.8	7.42
Teneur en eau (%)	20.885	20.679	19.975	19.753	18.636	18.598
Moyenne	20.78		19.86		18.62	
Limite de liquidité	<b>19.88</b>					

**ANNEXE A7 : Essai Equivalent de marne d'Oued Nechou**

		Essai n° 1	Essai n° 2	Moyenne
Marne d'Oued Nechou	h <sub>1</sub> (cm)	30.5	28	10.27
	h <sub>2</sub> (cm)	3	3	
	$ES = \frac{h_2}{h_1}$	9.83	10.71	

**ANNEXE A8 : Essai Equivalent de Sable Calcaire**

		Essai n° 1	Essai n° 2	Moyenne
Sable Calcaire	h <sub>1</sub> (cm)	14.60	15.00	54.74
	h <sub>2</sub> (cm)	8.10	8.10	
	$ES = \frac{h_2}{h_1}$	55.48	54.00	

**ANNEXE A9 : Essai volume au bleu de méthylène - Marne d'Oued Nechou**

Prise D'essai Mh =60 g		
Calcul de la Teneur en Eau		
Tare N°	2	3
PT	120	126.74
Ph+T	256.51	232.3
PS+T	254.95	231.12
ps	134.81	104.38
W (%)	1.15	1.13
W <sub>moy</sub>	1.14	
$Ps = ph \times 100 / (100 + w (\%))$ $PS = 59.32$		

Volume de bleu injecte dans la prise d'essai  $V = 125 \text{ cm}^3$   
 Valeur au bleu de la prise d'essai passant a :  
 $V_b = V/M_s = 125 / 59.32 = 2.11$   
 $V_{Bt} = V_b \times \% t / 100 = 1.27$

### ANNEXE A<sub>10</sub>: Essai volume au bleu de méthylène - Sable Calcaire

Prise d'essai Mh =200 g		
Calcul de la Teneur en Eau		
Tare N°	L2	S1
PT	114.89	118.17
Ph+T	261.12	240.32
PS+T	260.82	240.04
ps	145.93	121.87
W (%)	0.21	0.23
W <sub>moy</sub>	0.22	
$Ps = \frac{ph \times 100}{100 + w} (\%)$ $PS = 199.56$		

Volume de bleu injecté dans la prise d'essai  $V = 10 \text{ cm}^3$   
 Valeur au bleu de la prise d'essai passant a :  
 $V_b = V/M_s = 10 / 199,56 = \mathbf{0,05}$

### ANNEXE A<sub>11</sub> : Essai Proctor modifié

#### Echantillon N°01 –Marne d'Oued Nechou

pois de l'eau ajoutée	<b>10%</b>		<b>12%</b>		<b>14%</b>	
Poids total humide	3792		3909		3904	
pois du moule	1717		1717		1717	
pois du sol humide	2075		2192		2187	
pois du sol sec	1885		1955		1913	
volume du moule	955		955		955	
densité sèche	<b>1,97</b>		<b>2,05</b>		<b>2,00</b>	
N° de la tarre	I53	S9	F19	W24	F10	S1
pois total humide	103,7	107,1	79,77	85,19	77,5	79,94
Poids total sec	95,9	99,02	73,16	78,01	70,05	72,17
Poids de la tarre	18,56	18,68	18,87	18,64	17,83	18,35
Poids de l'eau	7,8	8,08	6,61	7,18	7,45	7,77
Poids du sol sec	77,34	80,34	54,29	59,37	52,22	53,82
Teneur en eau	10,09	10,06	12,18	12,09	14,27	14,44
Moyenne	<b>10,07</b>		<b>12,13</b>		<b>14,365</b>	

## ANNEXE A<sub>12</sub> : Essai Proctor modifié

### Echantillon N°02 –Sable Calcaire

poids de l'eau ajoutée	<b>6%</b>		<b>8%</b>		<b>10%</b>		<b>12%</b>	
Poids total humide	3760		3808		3852		3841	
poids du moule	1717		1717		1717		1717	
poids du sol humide	2043		2091		2135		2124	
poids du sol sec	1937		1944		1963		1933	
volume du moule	955		955		955		955	
densité sèche	<b>2,03</b>		<b>2,04</b>		<b>2,06</b>		<b>2,02</b>	
N° de la tarre	15	10	13	6	55	Z30	F1	MT
poids total humide	78,48	80,06	84,68	75,63	91,45	79,4	87,52	83,05
Poids total sec	75,49	77,13	80,43	71,74	85,7	74,53	81,26	77,09
Poids de la tarre	20,72	23,19	23,81	20,63	19,98	19,04	17,87	16,83
Poids de l'eau	2,99	2,93	4,25	3,89	5,75	4,87	6,26	5,96
Poids du sol sec	54,77	53,94	56,62	51,11	65,72	55,49	63,39	60,26
Teneur en eau	5,46	5,43	7,51	7,61	8,75	8,78	9,88	9,89
Moyenne	<b>5,45</b>		<b>7,56</b>		<b>8,76</b>		<b>9,88</b>	

**ANNEXE A13 : CBR immédiate**

**Echantillon N°01 –Marne d'Oued Nechou**

**1- Etat initial de l'échantillon 0%**

Teneur en eau de compactage w0 (%)			Densité sèche $\gamma_d$ (t/m3)	
T° de séchage (g)	48h		p. Total humide (g)	8429
N° de la tare (g)	z30	w31	p. du mol (g)	3920
p. Total humide (g)	78,66	74,85	p. du sol humide (g)	4509,00
p. total sec (g)	72,53	68,96	Teneur en eau w0	11,59
p.de la tare (g)	19,04	18,73	p. du sol sec (g)	4040,57
p.de l'eau (g)	6,13	5,89	Volume du mole (cm3)	2104,00
p. du sol sec (g)	53,49	50,23	Densité sèche $\gamma_d$	1,92
Teneur en eau w0	11,46	11,73		
Moyenne	11,59			

temps	Enfoncement (mm)	Fonce totale (kgf)		pression (kgf/cm2)
		Lecture	Valeur	
0-30	0,625	0,609	62,118	3,165
1-00	1,250	1,268	129,336	6,590
1 40	2,000	2,401	244,902	12,479
2-00	2,500	2,845	290,190	14,787
4-00	5,000	6,043	616,386	31,408
6-00	7,500	8,316	848,232	43,222
8-00	10,000	9,869	1006,638	51,294
10-00	12,500	11,007	1122,714	57,208

Calculs de l'indice portant

A 2,5 mm :  $p(2,5)/0,70 = 21,124$

A 5 mm :  $p(5)/1,05 = 29,913$

## ANNEXE A14 : CBR immédiate

### Echantillon N°02 –Sable Calcaire (Metlili)

#### 1- Etat initial de l'échantillon 100% SABLE

Teneur en eau de compactage w0 (%)			Densité sèche $\gamma_d$ (t/m <sup>3</sup> )	
T° de séchage (g)	48h		p. Total humide (g)	10795,00
N° de la tare (g)	----	---	p. du mol (g)	6153,00
p. Total humide (g)	4327,00	4327,00	p. du sol humide (g)	4642,00
p. total sec (g)	3994,20	3994,20	Teneur en eau w0	8,33
p.de la tare (g)	0,00	0,00	p. du sol sec (g)	4284,97
p.de l'eau (g)	332,80	332,80	Volume du mole (cm <sup>3</sup> )	2104,00
p. du sol sec (g)	3994,20	3994,20	Densité sèche $\gamma_d$	2,04
Teneur en eau w0	8,33	8,33		
Moyenne	8,33			

temps	Enfoncement (mm)	Fonce totale (kgf)		pression (kgf/cm <sup>2</sup> )
		Lecture	Valeur	
0-30	0,625	2,213	225,726	11,502
1-00	1,250	5,223	532,746	27,146
1 40	2,000	10,723	1093,746	55,732
2-00	2,500	13,489	1375,878	70,108
4-00	5,000	28,713	2928,726	149,234
6-00	7,500	38,507	3927,714	200,138
8-00	10,000	42,731	4358,562	222,092
10-00	12,500	43,456	4432,512	225,860

Calculs de l'indice portant

$$A_{2,5 \text{ mm}} : p(2,5)/0,70 = 100,155$$

$$A_{5 \text{ mm}} : p(5)/1,05 = 142,128$$



## ANNEXE A15 : CBR imbibé

### Echantillon N°01 –Marne d'Oued Nechou

#### A-Etat initial de l'échantillon 0%

Teneur en eau de compactage w0 (%)		Densité sèche $\gamma_d$ (t/m <sup>3</sup> )	
T° de séchage (g)	48h	p. Total humide (g)	10639
N° de la tare (g)		p. du mol (g)	6051
p. Total humide (g)		p. du sol humide (g)	4588
p. total sec (g)		Teneur en eau w0	14,35
p.de la tare (g)		p. du sol sec (g)	4012,11
p.de l'eau (g)		Volume du mole (cm <sup>3</sup> )	2104
p. du sol sec (g)		Densité sèche $\gamma_d$	1,91
Teneur en eau w0			

#### B-Etat final de l'échantillon après imbibition

Teneur en eau après immersion wf(%)			Poids approximatif du sol imbibé	
N° de la tare (g)	L1	F10	p. Total après imbibition	10737
p. Total humide (g)	2299,3	2288,97	p. Total avant imbibition	10639
p. total sec (g)	2019,7	2018,98	P. de l'eau absorbée	98
p.de la tare (g)	110,1	99,47	Différence de teneur en eau	1.85
p. de l'eau	279,60	269,99	p. du sol imbébé	4686
p. du sol sec	1909,60	1919,51		
Teneur en eau Wf	14,64	14,07		
Moyenne	14,35			

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

Calculs de l'indice portant

$$A 2,5 \text{ mm} : p(2,5)/0,70 = 15,823$$

$$A 5 \text{ mm} : p(5)/1,05 = 16,929$$

## ANNEXE A<sub>16</sub> : CBR immédiate

### Echantillon N°02 –Sable Calcaire

#### A-Etat initial de l'échantillon 100% SC

Teneur en eau de compactage w <sub>0</sub> (%)		Densité sèche γ <sub>d</sub> (t/m <sup>3</sup> )	
T° de séchage (g)	48h	p. Total humide (g)	10594
N° de la tare (g)	---	p. du mol (g)	5936
p. Total humide (g)	4327,00	p. du sol humide (g)	4658
p. total sec (g)	3994,20	Teneur en eau w <sub>0</sub>	8,65
p.de la tare (g)	0,00	p. du sol sec (g)	4287,19
p.de l'eau (g)	332,80	Volume du mole (cm <sup>3</sup> )	2104
p. du sol sec (g)	3994,20	Densité sèche γ <sub>d</sub>	2,04
Teneur en eau w <sub>0</sub>	8,33		

#### B-Etat final de l'échantillon après imbibition

Teneur en eau après immersion w <sub>f</sub> (%)			Poids approximatif du sol imbibé	
N° de la tare (g)	T1	M3	p. Total après imbibition	10613
p. Total humide (g)	2439,6	2416,9	p. Total avant imbibition	10594
p. total sec (g)	2262,1	2236,01	P. de l'eau absorbée	19
p.de la tare (g)	178,51	175,6	Différence de teneur en eau	0,19
p. de l'eau	177,50	180,89		
p. du sol sec	2083,59	2060,41	p. du sol imbibé	4677
Teneur en eau W <sub>f</sub>	8,52	8,78		
Moyenne	8,65			

temps	Enfoncement (mm)	Fonce totale (kgf)		pression (kgf/cm <sup>2</sup> )
		Lecture	Valeur	
0-30	0,625	1,942	198,084	10,093
1-00	1,250	4,34	442,680	22,557
1 40	2,000	9,433	962,166	49,028
2-00	2,500	12,033	1227,366	62,541
4-00	5,000	27,144	2768,688	141,080
6-00	7,500	37,79	3854,580	196,412
8-00	10,000	46,588	4751,976	242,139
10-00	12,500	49,741	5073,582	258,526

Calculs de l'indice portant

$$A \ 2,5 \text{ mm} : p(2,5)/0,70 = 89.334$$

$$A \ 5 \text{ mm} : p(5)/1,05 = 134.362$$

## ANNEXE A17 : Compression simple

### Echantillon N°01 – Marne d'Oued Nechou

N deprouvette	P après com	P alecrasement	tener en eau	diametre	hauteur eprouv	volume	densite seche	compactie	lecture	resistance KG/cm <sup>2</sup>	RC moyenne
100%	448,26	400,17	12,02	5	10	196,25	2,04	99	4,099	21,30	27,06
100%	448,2	399,75	12,12				2,04	99	6,314	32,82	
98%	438,88	389,46	12,69				1,98	97	4,447	23,11	23,25
98%	436,91	387,46	12,76				1,97	96	4,501	23,39	
95%	427,95	377,25	13,44				1,92	94	3,607	18,75	18,62
95%	426,99	376,28	13,48				1,92	94	3,557	18,49	

## ANNEXE A18 : Compression simple

### Echantillon N°02 – Sable Calcaire

N deprouvette	P après com	P alecrasement	tener en eau	diametre	hauteur eprouv	volume	densite seche	compactie	lecture	resistance KG/cm <sup>2</sup>	RC moyenne
100%	433,22	404,11	7,20	5	10	196,25	2,06	100	0,377	1,96	2,66
100%	434,04	404,51	7,30				2,06	101	0,6475	3,37	
98%	425,25	396,05	7,37				2,02	98	0,513	2,67	2,59
98%	429,29	398,7	7,67				2,03	99	0,485	2,52	
95%	413,17	385,15	7,28				1,96	96	0,372	1,93	2,06
95%	416,2	386,09	7,80				1,97	96	0,421	2,19	

## ANNEXE B

### ANNEXE B<sub>1</sub> : Essai limites d'Atterberg

**Echantillon N°01 – (90% Marne +10% SC)**

<b>Limite de liquidité</b>						
	1 Essai		2 Essai		3 Essai éventuellement	
Nombre de coups	17		27		32	
N° de la tare	378	0,04	139	307	289	0,03
Poids total humide	19,51	24,62	23,24	19,13	20,69	21,26
Poids total sec	18,17	21,97	21,04	17,95	19,13	19,58
Poids de la tare	14,05	13,85	13,69	13,99	13,65	13,69
Poids de l'eau	1,34	2,65	2,2	1,18	1,56	1,68
Poids du sol sec	4,12	8,12	7,35	3,96	5,48	5,89
Teneur en eau (%)	32,524	32,635	29,932	29,798	28,467	28,523
Moyenne	32,58		29,86		28,50	
Limite de liquidité	<b>30,40</b>					

### Limite de plasticité

	1 <sup>er</sup> Essai	2 <sup>ème</sup> Essai	3 <sup>ème</sup> Essai
N° de la tare	X5	X11	K4
Poids total humide	37,9	35,41	37,76
Poids total sec	37,64	35,15	37,44
Poids de la tare	36,24	33,76	35,71
Poids de l'eau	0,26	0,26	0,32
Poids du sol sec	1,4	1,39	1,73
Teneur en eau (%)	18,57	18,71	18,50
Moyenne	18,57	18,71	18,50
<b>LP = 18.59</b>			

**Echantillon N°02 – (80% Marne +20% SC)**

<b>Limite de liquidité</b>						
	1 Essai		2 Essai		3 Essai éventuellement	
Nombre de coups	18		25		35	
N° de la tare	226	128	170	143	187	146
Poids total humide	21,91	24,77	20,87	22,78	19,37	23,02
Poids total sec	20,03	22,17	19,32	20,76	18,21	20,98
Poids de la tare	13,92	13,71	14,03	13,98	14,01	13,61
Poids de l'eau	1,88	2,6	1,55	2,02	1,16	2,04
Poids du sol sec	6,11	8,46	5,29	6,78	4,2	7,37
Teneur en eau (%)	30,769	30,733	29,301	29,794	27,619	27,68
Moyenne	30,75		29,55		27,65	
Limite de liquidité	<b>29,50</b>					

**Limite de plasticité**

	1 <sup>er</sup> Essai		2 <sup>ème</sup> Essai		3 <sup>ème</sup> Essai	
N° de la tare	F3		R		X1	
Poids total humide	36,44		36,78		34,93	
Poids total sec	36,29		36,63		34,76	
Poids de la tare	35,43		35,83		33,84	
Poids de l'eau	0,15		0,15		0,17	
Poids du sol sec	0,86		0,8		0,92	
Teneur en eau (%)	17,44		18,75		18,48	
Moyenne	17,44		18,75		18,48	
<b>LP = 18.22</b>						

**Echantillon N°03 – (70% Marne +30% SC)**

<b>Limite de liquidité</b>						
	1 Essai		2 Essai		3 Essai éventuellement	
Nombre de coups	16		25		32	
N° de la tare	140	0,47	253	36	372	310
Poids total humide	20,37	23,61	20,11	21,52	22,82	19,06
Poids total sec	18,81	21,42	18,68	19,8	20,93	17,93
Poids de la tare	13,57	14,09	13,68	13,77	14,01	13,85
Poids de l'eau	1,56	2,19	1,43	1,72	1,89	1,13
Poids du sol sec	5,24	7,33	5	6,03	6,92	4,08
Teneur en eau (%)	29,771	29,877	28,6	28,524	27,312	27,696
Moyenne	29,82		28,56		27,50	
Limite de liquidité	<b>28,53</b>					

**Limite de plasticité**

	1 <sup>er</sup> Essai		2 <sup>ème</sup> Essai		3 <sup>ème</sup> Essai	
N° de la tare	X4		X7		X6	
Poids total humide	36,46		39,22		28,75	
Poids total sec	36,3		39,09		28,61	
Poids de la tare	35,42		38,38		27,84	
Poids de l'eau	0,16		0,13		0,14	
Poids du sol sec	0,88		0,71		0,77	
Teneur en eau (%)	18,18		18,31		18,18	
Moyenne	18,18		18,31		18,18	
<b>LP = 18.22</b>						

**Echantillon N°04 – (60% Marne +40% SC)**

<b>Limite de liquidité</b>						
	1 Essai		2 Essai		3 Essai éventuellement	
Nombre de coups	18		24		29	
N° de la tare	108	244	294	262	125	305
Poids total humide	19,88	25,54	21,57	26,58	21,28	23,37
Poids total sec	18,55	22,99	19,92	23,89	19,82	21,37
Poids de la tare	13,87	13,93	13,78	13,87	14,09	13,57
Poids de l'eau	1,33	2,55	1,65	2,69	1,46	2
Poids du sol sec	4,68	9,06	6,14	10,02	5,73	7,8
Teneur en eau (%)	28,419	28,146	26,873	26,846	25,48	25,641
Moyenne	28,28		26,86		25,56	
Limite de liquidité	<b>26,57</b>					

**Limite de plasticité**

	1 <sup>er</sup> Essai		2 <sup>ème</sup> Essai		3 <sup>ème</sup> Essai	
N° de la tare	A		G		X6	
Poids total humide	32,66		37,41		36,29	
Poids total sec	32,53		37,26		36,14	
Poids de la tare	31,77		36,38		35,26	
Poids de l'eau	0,13		0,15		0,15	
Poids du sol sec	0,76		0,88		0,88	
Teneur en eau (%)	17,11		17,05		17,05	
Moyenne	17,11		17,05		17,05	
<b>LP = 17.07</b>						

**Echantillon N°05 – (50% Marne +50% SC)**

<b>Limite de liquidité</b>						
	1 Essai		2 Essai		3 Essai éventuellement	
Nombre de coups	16		21		35	
N° de la tare	0,55	XZ	S7	M2	R3	T7
Poids total humide	24,05	24,28	43,02	35,74	39,3	41,55
Poids total sec	21,89	22,92	40,74	34,74	37,81	39,52
Poids de la tare	13,77	17,83	31,87	30,88	31,53	30,93
Poids de l'eau	2,16	1,36	2,28	1	1,49	2,03
Poids du sol sec	8,12	5,09	8,87	3,86	6,28	8,59
Teneur en eau (%)	26,601	26,719	25,705	25,907	23,726	23,632
Moyenne	26,66		25,81		23,68	
Limite de liquidité	<b>25,23</b>					

**Limite de plasticité**

	1 <sup>er</sup> Essai		2 <sup>ème</sup> Essai		3 <sup>ème</sup> Essai	
N° de la tare	X8		X3		X10	
<b>Poids total humide</b>	31,84		37,11		37,33	
<b>Poids total sec</b>	31,63		36,91		37,07	
<b>Poids de la tare</b>	30,36		35,71		35,52	
<b>Poids de l'eau</b>	0,21		0,2		0,26	
<b>Poids du sol sec</b>	1,27		1,2		1,55	
<b>Teneur en eau (%)</b>	16,54		16,67		16,77	
<b>Moyenne</b>	16,54		16,67		16,77	
	LP = 16.66					



## ANNEXE B<sub>2</sub> : Essai Proctor modifié

(90% Marne +10% SC)

poids de l'eau ajoutée	8%		10%		12%		14%	
<b>Poids total humide</b>	3698		3820		3876		3803	
<b>poids du moule</b>	1717		1717		1717		1717	
<b>poids du sol humide</b>	1981		2103		2159		2086	
<b>poids du sol sec</b>	1798		1869		1880		1794	
<b>volume du moule</b>	955		955		955		955	
<b>densité sèche</b>	1,91		1,99		2,00		1,9	
<b>N° de la tarre</b>	I53	S9	F19	W24	F10	S1	ID1	ID2
<b>poids total humide</b>	96,43	101,14	72,31	96,98	83,35	91,83	155,12	100,22
<b>Poids total sec</b>	89,2	93,52	66,41	88,14	75,15	82,21	135,86	88,9
<b>Poids de la tarre</b>	18,49	18,66	18,56	18,68	18,56	18,68	18,62	18,55
<b>Poids de l'eau</b>	7,23	7,62	5,9	8,84	8,2	9,62	19,26	11,32
<b>Poids du sol sec</b>	70,71	74,86	47,85	69,46	56,59	63,53	117,24	70,35
<b>Teneur en eau</b>	8,22	8,18	10,33	10,73	12,49	13,14	14,43	14,09
<b>Moyenne</b>	8,20		10,53		12,82		14,26	

(80% Marne +20% SC)

poids de l'eau ajoutée	8%		10%		12%		14%	
<b>Poids total humide</b>	3752		3901		3925		3855	
<b>poids du moule</b>	1717		1793		1793		1717	
<b>poids du sol humide</b>	2035		2184		2208		2138	
<b>poids du sol sec</b>	1877		1971		1961		1868	
<b>volume du moule</b>	955		955		955		955	
<b>densité sèche</b>	1,97		1,99		1,98		1,96	
<b>N° de la tarre</b>	MZ	99	W4	W31	Z30	K7	99	MZ
<b>poids total humide</b>	83,45	70,75	92,48	99,1	102,94	86,4	98,37	73,76
<b>Poids total sec</b>	78,15	66,75	85,2	91,28	93,52	78,77	88,22	66,69
<b>Poids de la tarre</b>	18,47	16,74	18,23	18,74	19,04	18,06	16,74	18,46
<b>Poids de l'eau</b>	5,3	4	7,28	7,82	9,42	7,63	10,15	7,07
<b>Poids du sol sec</b>	59,68	50,01	66,97	72,54	74,48	60,71	71,48	48,23
<b>Teneur en eau</b>	8,88	8,00	10,87	10,78	12,65	12,57	14,20	14,66
<b>Moyenne</b>	8,44		10,83		12,61		14,43	

(70% **Marne** +30% **SC**)

<b>poids de l'eau ajoutée</b>	8%		10%		12%	
<b>Poids total humide</b>	3759		3820		3827	
<b>poids du moule</b>	1717		1717		1717	
<b>poids du sol humide</b>	2042		2103		2110	
<b>poids du sol sec</b>	1888		1899		1874	
<b>volume du moule</b>	955		955		955	
<b>densité sèche</b>	1,98		1,99		1,96	
<b>N° de la tarre</b>	S9	C3	S1	F10	W24	I53
<b>poids total humide</b>	70,69	79,59	73,01	74,24	80,04	78,93
<b>Poids total sec</b>	66,73	75	67,77	68,85	73,18	72,15
<b>Poids de la tarre</b>	18,66	18,41	18,86	18,63	18,4	18,49
<b>Poids de l'eau</b>	3,96	4,59	5,24	5,39	6,86	6,78
<b>Poids du sol sec</b>	48,07	56,59	48,91	50,22	54,78	53,66
<b>Teneur en eau</b>	8,24	8,11	10,71	10,73	12,52	12,64
<b>Moyenne</b>	8,17		10,72		12,58	

(60% **Marne** +40% **SC**)

<b>poids de l'eau ajoutée</b>	8%		10%		12%	
<b>Poids total humide</b>	3796		3870		3893	
<b>poids du moule</b>	1717		1717		1717	
<b>poids du sol humide</b>	2079		2153		2176	
<b>poids du sol sec</b>	1911		1949		1927	
<b>volume du moule</b>	955		955		955	
<b>densité sèche</b>	2,00		2,04		2,00	
<b>N° de la tarre</b>	W24	C3	S1	S9	F10	MZ
<b>poids total humide</b>	186,92	173,58	100,93	114,31	182,91	207,74
<b>Poids total sec</b>	173,24	161,1	93,12	105,25	164,1	186,1
<b>Poids de la tarre</b>	18,39	18,4	18,85	18,6	18,64	18,46
<b>Poids de l'eau</b>	13,68	12,48	7,81	9,06	18,81	21,64
<b>Poids du sol sec</b>	154,85	142,7	74,27	86,65	145,46	167,64
<b>Teneur en eau</b>	8,83	8,75	10,52	10,46	12,93	12,91
<b>Moyenne</b>	8,79		10,49		12,92	

(50% **Marne** +50% **SC**)

<b>poids de l'eau ajoutée</b>	6%		8%		10%	
<b>Poids total humide</b>	3808		3861		3864	
<b>poids du moule</b>	1717		1717		1717	
<b>poids du sol humide</b>	2091		2144		2147	
<b>poids du sol sec</b>	1958		1969		1940	
<b>volume du moule</b>	955		955		955	
<b>densité sèche</b>	2,05		2,06		2,03	
<b>N° de la tarre</b>	W4	W31	Z30	K7	99	MZ
<b>poids total humide</b>	148,19	156,03	107,62	148,47	81,22	79,25
<b>Poids total sec</b>	139,95	147,33	100,31	137,93	75,14	73,45
<b>Poids de la tarre</b>	18,46	18,64	18,39	18,4	18,85	18,6
<b>Poids de l'eau</b>	8,24	8,7	7,31	10,54	6,08	5,8
<b>Poids du sol sec</b>	121,49	128,69	81,92	119,53	56,29	54,85
<b>Teneur en eau</b>	6,78	6,76	8,92	8,82	10,80	10,57
<b>Moyenne</b>	6,77		8,87		10,69	

### ANNEXE B<sub>3</sub> : Essai CBR Immédiat

(90% Marne +10% SC)

Teneur en eau de compactage w <sub>0</sub> (%)			Densité sèche γ <sub>d</sub> (t/m <sup>3</sup> )	
T° de séchage (g)	48h		p. Total humide (g)	8723
N° de la tare (g)	z30	w31	p. du mol (g)	3920
p. Total humide (g)	85,23	82,6	p. du sol humide (g)	4803,00
p. total sec (g)	77,9	75,61	Teneur en eau w <sub>0</sub>	12,28
p.de la tare (g)	18,64	18,27	p. du sol sec (g)	4277,71
p.de l'eau (g)	7,33	6,99	Volume du mole (cm <sup>3</sup> )	2104,00
p. du sol sec (g)	59,26	57,34	Densité sèche γ <sub>d</sub>	2,03
Teneur en eau w <sub>0</sub>	12,37	12,19		
Moyenne	12,28			
temps	Enfoncement (mm)	Fonce totale (kgf)		pression (kgf/cm <sup>2</sup> )
		Lecture	Valeur	
0-30	0,625	0,578	58,956	3,004
1-00	1,250	2,093	213,486	10,878
1 40	2,000	3,905	398,310	20,296
2-00	2,500	4,982	508,164	25,894
4-00	5,000	8,47	863,940	44,022
6-00	7,500	10,591	1080,282	55,046
8-00	10,000	11,432	1166,064	59,417
10-00	12,500	12,08	1232,160	62,785

Calculs de l'indice portant	A 2,5 mm :	
	p(2,5)/0,70	36,991
	A 5 mm :	
	p(5)/1,05	41,926

(80% Marne +20% SC)

Teneur en eau de compactage w0 (%)		Densité sèche $\gamma_d$ (t/m <sup>3</sup> )		
T° de séchage (g)	48h		p. Total humide (g)	8572,00
N° de la tare (g)	S5	S04	p. du mol (g)	3920,00
p. Total humide (g)	133,46	243,51	p. du sol humide (g)	4652,00
p. total sec (g)	121,46	219,58	Teneur en eau w0	11,87
p.de la tare (g)	19,99	18,80	p. du sol sec (g)	4158,31
p.de l'eau (g)	12,00	23,93	Volume du mole (cm <sup>3</sup> )	2104,00
p. du sol sec (g)	101,47	200,78	Densité sèche $\gamma_d$	1,98
Teneur en eau w0	11,83	11,92		
Moyenne	11,87			

temps	Enfoncement (mm)	Fonce totale (kgf)		pression (kgf/cm <sup>2</sup> )
		Lecture	Valeur	
0-30	0,625	1,288	131,376	6,694
1-00	1,250	2,789	284,478	14,496
1 40	2,000	5,289	539,478	27,489
2-00	2,500	6,492	662,184	33,742
4-00	5,000	12,390	1263,780	64,396
6-00	7,500	16,348	1667,496	84,968
8-00	10,000	19,384	1977,168	100,747
10-00	12,500	22,339	2278,578	116,106

Calculs de l'indice portant

A 2,5 mm :  
 $p(2,5)/0,70$                       48,203

A 5 mm :  
 $p(5)/1,05$                               61,330

(70% Marne +30% SC)

Teneur en eau de compactage w0 (%)			Densité sèche $\gamma_d$ (t/m <sup>3</sup> )	
T° de séchage (g)	48h		p. Total humide (g)	8486
N° de la tare (g)	z30	w31	p. du mol (g)	3920
p. Total humide (g)	171,2	203,9	p. du sol humide (g)	4566,00
p. total sec (g)	156,84	186,32	Teneur en eau w0	10,41
p.de la tare (g)	17,84	18,61	p. du sol sec (g)	4135,62
p.de l'eau (g)	14,36	17,58	Volume du mole (cm <sup>3</sup> )	2104,00
p. du sol sec (g)	139,00	167,71	Densité sèche $\gamma_d$	1,97
Teneur en eau w0	10,33	10,48		
Moyenne	10,41			

temps	Enfoncement (mm)	Fonce totale (kgf)		pression (kgf/cm <sup>2</sup> )
		Lecture	Valeur	
0-30	0,625	0,556	56,712	2,890
1-00	1,250	1,467	149,634	7,625
1 40	2,000	4,382	446,964	22,775
2-00	2,500	6,128	625,056	31,850
4-00	5,000	14,692	1498,584	76,361
6-00	7,500	19,478	1986,756	101,236
8-00	10,000	23,189	2365,278	120,524
10-00	12,500	25,323	2582,946	131,615

Calculs de l'indice portant

A 2,5 mm :  
 $p(2,5)/0,70$       45,500

A 5 mm :  
 $p(5)/1,05$       72,725

(60% Marne +40% SC)

Teneur en eau de compactage w0 (%)		Densité sèche $\gamma_d$ (t/m <sup>3</sup> )		
T° de séchage (g)	48h		p. Total humide (g)	8499
N° de la tare (g)	I29	F10	p. du mol (g)	3920
p. Total humide (g)	206,23	154,23	p. du sol humide (g)	4579,00
p. total sec (g)	189,59	140,61	Teneur en eau w0	10,45
p.de la tare (g)	18,79	18,64	p. du sol sec (g)	4145,60
p.de l'eau (g)	16,64	13,62	Volume du mole (cm <sup>3</sup> )	2104,00
p. du sol sec (g)	170,80	121,97	Densité sèche $\gamma_d$	1,97
Teneur en eau w0	9,74	11,17		
Moyenne	10,45			

temps	Enfoncement (mm)	Fonce totale (kgf)		pression (kgf/cm <sup>2</sup> )
		Lecture	Valeur	
0-30	0,625	0,734	74,868	3,815
1-00	1,250	1,547	157,794	8,040
1 40	2,000	2,795	285,090	14,527
2-00	2,500	3,459	352,818	17,978
4-00	5,000	7,672	782,544	39,875
6-00	7,500	11,376	1160,352	59,126
8-00	10,000	14,323	1460,946	74,443
10-00	12,500	16,474	1680,348	85,623

Calculs de l'indice portant

A 2,5 mm :

$p(2,5)/0,70$

25,683

A 5 mm :

$p(5)/1,05$

37,976

(50% Marne +50% SC)

Teneur en eau de compactage w <sub>0</sub> (%)			Densité sèche γ <sub>d</sub> (t/m <sup>3</sup> )	
T° de séchage (g)	48h		p. Total humide (g)	8536
N° de la tare (g)	129	F10	p. du mol (g)	3920
p. Total humide (g)	181,79	232,02	p. du sol humide (g)	4616,00
p. total sec (g)	168,64	215,18	Teneur en eau w <sub>0</sub>	8,66
p.de la tare (g)	18,37	18,75	p. du sol sec (g)	4248,04
p.de l'eau (g)	13,15	16,84	Volume du mole (cm <sup>3</sup> )	2104,00
p. du sol sec (g)	150,27	196,43	Densité sèche γ <sub>d</sub>	2,02
Teneur en eau w <sub>0</sub>	8,75	8,57		
Moyenne	8,66			

temps	Enfoncement (mm)	Fonce totale (kgf)		pression (kgf/cm <sup>2</sup> )
		Lecture	Valeur	
0-30	0,625	2,508	255,816	13,035
1-00	1,250	5,57	568,140	28,950
1 40	2,000	9,995	1019,490	51,949
2-00	2,500	11,801	1203,702	61,335
4-00	5,000	19,622	2001,444	101,984
6-00	7,500	25,932	2645,064	134,780
8-00	10,000	31,089	3171,078	161,584
10-00	12,500	35,979	3669,858	186,999

Calculs de l'indice portant

A 2,5 mm :  
 $p(2,5)/0,70$                       87,622  
 A 5 mm :  
 $p(5)/1,05$                               97,128



## ANNEXE B4 : Essai CBR Imbibé

(90% Marne +10% SC)

A-Etat initial de l'échantillon				12
Teneur en eau de compactage w0 (%)			Densité sèche $\gamma_d$ (t/m <sup>3</sup> )	
T° de séchage (g)	48h		p. Total humide (g)	10598
N° de la tare (g)	129	F10	p. du mol (g)	5981
p. Total humide (g)			p. du sol humide (g)	4617
p. total sec (g)			Teneur en eau w0	14,08
p.de la tare (g)			p. du sol sec (g)	4047,25
p.de l'eau (g)			Volume du mole (cm <sup>3</sup> )	2104
p. du sol sec (g)			Densité sèche $\gamma_d$	1,92
Teneur en eau w0				
Moyenne				

### B-Etat final de l'échantillon après imbibition

Teneur en eau après immersion wf(%)			Poids approximatif du sol imbibé	
N° de la tare (g)	100%	F10	p. Total après imbibition	10639
p. Total humide (g)	2368,6	2389,56	p. Total avant imbibition	10598
p. total sec (g)	2097,3	2099,5	P. de l'eau absorbée	41
p.de la tare (g)	110,1	99,47	Différence de teneur en eau	2,08
p. de l'eau	271,30	290,06	p. du sol imbibé	4658
p. du sol sec	1987,20	2000,03	Profondeur conventionnelle	
Teneur en eau wf	13,65	14,50	d'imbibition en mm	
Moyenne	14,08			

temps	Enfoncement (mm)	Fonce totale (kgf)		pression (kgf/cm <sup>2</sup> )
		Lecture	Valeur	
0-30	0,625	0,339	34,578	1,762
1-00	1,250	0,529	53,958	2,749
1 40	2,000	0,801	81,702	4,163
2-00	2,500	0,92	93,840	4,782
4-00	5,000	1,66	169,320	8,628
6-00	7,500	2,275	232,050	11,824
8-00	10,000	2,804	286,008	14,574
10-00	12,500	3,284	334,968	17,068

Calculs de l'indice portant

A 2,5 mm :

p(2,5)/0,70

6,831

A 5 mm :

p(5)/1,05

8,217

(80% Marne +20% SC)

A-Etat initial de l'échantillon				11,1
Teneur en eau de compactage w0 (%)			Densité sèche $\gamma_d$ (t/m <sup>3</sup> )	
T° de séchage (g)	48h		p. Total humide (g)	10632
N° de la tare (g)	I29	F10	p. du mol (g)	5936
p. Total humide (g)			p. du sol humide (g)	4696
p. total sec (g)			Teneur en eau w0	12,20
p.de la tare (g)			p. du sol sec (g)	4185,43
p.de l'eau (g)			Volume du mole (cm <sup>3</sup> )	2104
p. du sol sec (g)			Densité sèche $\gamma_d$	1,99
Teneur en eau w0				
Moyenne				

B-Etat final de l'échantillon après imbibition				
Teneur en eau après immersion wf(%)			Poids approximatif du sol imbibé	
N° de la tare (g)	G1	L2	p. Total après imbibition	10695
p. Total humide (g)	2578,2	2574,6	p. Total avant imbibition	10632
p. total sec (g)	2315,9	2319,5	P. de l'eau absorbée	63
p.de la tare (g)	206,9	186,6	Différence de teneur en eau	1,10
p. de l'eau	262,30	255,10	p. du sol imbibé	4759
p. du sol sec	2109,00	2132,90	Profondeur conventionnelle	
Teneur en eau Wf	12,44	11,96	d'imbibition en mm	
Moyenne	12,20			
temps	Enfoncement (mm)	Fonce totale (kgf)		pression (kgf/cm <sup>2</sup> )
		Lecture	Valeur	
0-30	0,625	1,335	136,170	6,939
1-00	1,250	3,234	329,868	16,809
1 40	2,000	4,039	411,978	20,993
2-00	2,500	4,848	494,496	25,197
4-00	5,000	9,229	941,358	47,967
6-00	7,500	12,214	1245,828	63,482
8-00	10,000	14,476	1476,552	75,238
10-00	12,500	16,139	1646,178	83,882

Calculs de l'indice portant

A 2,5 mm :  
p(2,5)/0,70

35,996

A 5 mm :  
p(5)/1,05

45,683

(70% Marne +30% SC)

A-Etat initial de l'échantillon 30%				10,9
Teneur en eau de compactage w0 (%)			Densité sèche $\gamma_d$ (t/m3)	
T° de séchage (g)	48h		p. Total humide (g)	10670
N° de la tare (g)	I29	F10	p. du mol (g)	6025
p. Total humide (g)			p. du sol humide (g)	4645
p. total sec (g)			Teneur en eau w0	11,51
p.de la tare (g)			p. du sol sec (g)	4165,40
p.de l'eau (g)			Volume du mole (cm3)	2104
p. du sol sec (g)			Densité sèche $\gamma_d$	1,98
Teneur en eau w0				
Moyenne				

B-Etat final de l'échantillon après imbibition

Teneur en eau après immersion wf(%)			Poids approximatif du sol imbibé	
N° de la tare (g)	G5	M3	p. Total après imbibition	10730
p. Total humide (g)	2473,9	2452,3	p. Total avant imbibition	10670
p. total sec (g)	2242,6	2215,6	P. de l'eau absorbée	60
p.de la tare (g)	206,9	186,6	Différence de teneur en eau	0,61
p. de l'eau	231,30	236,70	p. du sol imbibé	4705
p. du sol sec	2035,70	2029,00	Profondeur conventionnelle	
Teneur en eau Wf	11,36	11,67	d'imbibition en mm	
Moyenne	11,51			

temps	Enfoncement (mm)	Fonce totale (kgf)		pression (kgf/cm2)
		Lecture	Valeur	
0-30	0,625	0,702	71,604	3,649
1-00	1,250	1,872	190,944	9,730
1 40	2,000	3,997	407,694	20,774
2-00	2,500	5,378	548,556	27,952
4-00	5,000	10,143	1034,586	52,718
6-00	7,500	12,243	1248,786	63,632
8-00	10,000	13,416	1368,432	69,729
10-00	12,500	14,601	1489,302	75,888

Calculs de l'indice portant

A 2,5 mm :  
 $p(2,5)/0,70$  39,931  
 A 5 mm :  $p(5)/1,05$  50,207

(60% Marne +40% SC)

A-Etat initial de l'échantillon				10,5
Teneur en eau de compactage w0 (%)			Densité sèche γ d (t/m3)	
T° de séchage (g)	48h		p. Total humide (g)	10600
N° de la tare (g)	I29	F10	p. du mol (g)	5890
p. Total humide (g)			p. du sol humide (g)	4710
p. total sec (g)			Teneur en eau w0	11,12
p.de la tare (g)			p. du sol sec (g)	4238,79
p.de l'eau (g)			Volume du mole (cm3)	2104
p. du sol sec (g)			Densité sèche γ d	2,01
Teneur en eau w0				
Moyenne				

B-Etat final de l'échantillon après imbibition

Teneur en eau après immersion wf(%)			Poids approximatif du sol imbibé	
N° de la tare (g)	T1	M3	p. Total après imbibition	10730
p. Total humide (g)	2473,9	2452,3	p. Total avant imbibition	10600
p. total sec (g)	2235,1	2236,01	P. de l'eau absorbée	130
p.de la tare (g)	190,5	186,6	Différence de teneur en eau	0,62
p. de l'eau	238,80	216,29	p. du sol imbibé	4840
p. du sol sec	2044,60	2049,41	Profondeur conventionnelle	
Teneur en eau Wf	11,68	10,55	d'imbibition en mm	
Moyenne	11,12			
temps	Enfoncement (mm)	Fonce totale (kgf)		pression (kgf/cm2)
		Lecture	Valeur	
0-30	0,625	0,621	63,342	3,228
1-00	1,250	1,274	129,948	6,622
1 40	2,000	2,489	253,878	12,936
2-00	2,500	3,068	312,936	15,946
4-00	5,000	7,233	737,766	37,593
6-00	7,500	11,148	1137,096	57,941
8-00	10,000	14,398	1468,596	74,833
10-00	12,500	16,685	1701,870	86,719

Calculs de l'indice portant

$$A 2,5 \text{ mm} : p(2,5)/0,70 = 22,780$$

$$A 5 \text{ mm} : p(5)/1,05 = 35,803$$

(50% Marne +50% SC)

Teneur en eau de compactage w0 (%)		Densité sèche $\gamma_d$ (t/m <sup>3</sup> )		
T° de séchage (g)	48h		p. Total humide (g)	10572
N° de la tare (g)	I29	F10	p. du mol (g)	5936
p. Total humide (g)			p. du sol humide (g)	4636
p. total sec (g)			Teneur en eau w0	9,09
p.de la tare (g)			p. du sol sec (g)	4249,90
p.de l'eau (g)			Volume du mole (cm <sup>3</sup> )	2104
p. du sol sec (g)			Densité sèche $\gamma_d$	2,02
Teneur en eau w0				
Moyenne				

B-Etat final de l'échantillon après imbibition

Teneur en eau après immersion wf(%)		Poids approximatif du sol imbibé		
N° de la tare (g)	T1	M3	p. Total après imbibition	10593
p. Total humide (g)	2441,3	2425,3	p. Total avant imbibition	10572
p. total sec (g)	2262,1	2236,01	P. de l'eau absorbée	21
p.de la tare (g)	221,7	219,6	Différence de teneur en eau	0,29
p. de l'eau	179,20	189,29	p. du sol imbibé	4657
p. du sol sec	2040,40	2016,41	Profondeur conventionnelle	
Teneur en eau wf	8,78	9,39	d'imbibition en mm	
Moyenne	9,09			
temps	Enfoncement (mm)	Fonce totale (kgf)		pression (kgf/cm <sup>2</sup> )
		Lecture	Valeur	
0-30	0,625	1,525	155,550	7,926
1-00	1,250	2,86	291,720	14,865
1 40	2,000	6,023	614,346	31,304
2-00	2,500	7,534	768,468	39,158
4-00	5,000	14,223	1450,746	73,923
6-00	7,500	17,286	1763,172	89,843
8-00	10,000	19,105	1948,710	99,297
10-00	12,500	20,176	2057,952	104,864

Calculs de l'indice portant

A 2,5 mm :  
p(2,5)/0,70

55,939

A 5 mm :  
p(5)/1,05

70,403

## ANNEXE B5 : Essai Compression

(90% Marne +10% SC)

RC moyenne	resistance KG/cm <sup>2</sup>	lecture	compacité	densité sèche	volume	hauteur prouv	diamètre	teneur en eau	P après alocrasement	N après compression
24,98	24,58	4,73	98	1,94	196,25	10	5	15,21	380,47	438,34
	25,38	4,88	98	1,94				14,86	381,46	438,16
21,62	21,31	4,1	96	1,91				14,73	374,66	429,85
	21,93	4,22	96	1,90				14,97	372,23	427,95
14,83	15,01	2,88	95	1,87				13,69	367,42	417,71
	14,66	2,82	94	1,87				13,70	366,11	416,28

(80% Marne +20% SC)

RC moyenne	resistance KG/cm <sup>2</sup>	lecture	compacité	densité sèche	volume	hauteur prouv	diamètre	teneur en eau	P après alocrasement	N après compression
28,41	28,76	5,533	100	2,07	196,25	10	5	10,80	405,26	449,04
	28,06	5,399	99	2,06				11,14	403,36	448,31
24,27	25,22	4,852	97	2,01				11,38	394,9	439,82
	23,32	4,487	97	2,02				11,22	395,81	440,21
16,98	17,51	3,369	95	1,96				11,25	384,12	427,32
	16,46	3,166	95	1,96				11,16	383,9	426,73

(70% Marne +30% SC)

RC moyen	resistance KG/cm <sup>2</sup>	lecture	compacité	densité sèche	volume	hauteur prouv	diamètre	teneur en eau	P après alocrasement	N après compression
15,92	15,15	2,914	100	1,98	196,25	10	5	9,21	389,43	425,31
	16,69	3,212	100	1,99				9,36	389,61	426,08
12,57	12,40	2,386	97	1,94				9,87	380,7	418,28
	12,73	2,45	97	1,94				9,84	379,84	417,23
7,92	8,47	1,629	95	1,88				9,93	369,34	406,03
	7,37	1,418	93	1,85				9,40	363,95	398,17

(60% Marne +40% SC)

RC moyenne	resistance KG/cm <sup>2</sup>	lecture	compacte	densite seche	volume	hauteur eprouv	diametre	teneur en eau	P alecrasement	P après com	N deprouvette
23,95	22,68	4,364	100	2,03	196,25	10	5	10,92	399,22	442,83	100%
	25,21	4,851	100	2,04				10,73	400,3	443,27	100%
23,77	23,42	4,507	98	2,00				10,89	391,74	434,4	98%
	24,12	4,64	98	2,00				10,83	392,81	435,36	98%
16,77	16,61	3,196	95	1,93				11,16	379,22	421,54	95%
	16,93	3,257	95	1,93				11,01	379,3	421,07	95%

(50% Marne 50% SC)

RC moyenne	resistance KG/cm <sup>2</sup>	lecture	compacte	densite seche	volume	hauteur eprouv	diametre	teneur en eau	P alecrasement	P après com	N deprouvette
11,06	10,81	2,08	100	2,06	196,25	10	5	8,12	404,4	437,23	100%
	11,31	2,177	100	2,06				8,26	404,13	437,53	100%
7,80	7,13	1,372	98	2,02				8,30	395,7	428,56	98%
	8,47	1,629	98	2,02				8,07	396,63	428,64	98%
5,76	5,59	1,075	95	1,95				8,18	383,5	414,86	95%
	5,93	1,141	95	1,96				8,01	384,47	415,28	95%