



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

République Algérienne Démocratique et Populaire

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministre de l'enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة غرداية

Université de Ghardaïa

كلية العلوم والتكنولوجيا

Faculté des Sciences et de la Technologie

قسم الري والهندسة المدنية

Department Hydraulique et Génie Civil

Mémoire

Pour l'obtention du diplôme de master

Domaine: Sciences et Technologies

Filière : Génie civil

Spécialité : structures

Thème

**Influence de la compacité et de la teneur en eau de compactage sur  
comportement mécanique d'un sable de dune traité au ciment**

Soutenue publiquement le ...../...../.....

Par :

Moussai fatma zohra

Zerouil meriem

Devant le jury composé de:

M. DEMDOUM ABDELLAH

Docteur Président

M. NESSIL

Maitre Assistante Examineur

M. DAHEUR Elhadj Guesmia

Maître de conférences Encadreur

Année universitaire : 2023/2024

## ***Remerciement***

***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.***

***Nos remerciements à tous les enseignants de département de génie civil Ghardaïa pour leurs temps, leurs conseils, et leurs orientations tous le long de nos études.***

***Nous remercions également l'ensemble du personnel du laboratoire LTPS, pour leurs accueils chaleureux, pour leurs aides et leurs soutiens.***

## اهداء

إن الحمد لله نحمده ونستعين بيه ونهتدي به ونعوذ به من شرور أنفسنا وسيئات أعمالنا , ونشكره على عونه وإلهامه لنا الصبر في مشروع بحثنا الذي بذلت فيه كل جهودي , وصلى الله على نبينا محمد عليه الصلاة والسلام .

اهدي ثمرة جهدي وفرحة تخرجي إلى من قال فيهما الله تعالى ("واخفض لهما جناح الذل من الرحمة وقل رب ارحمهما كما ربياني صغيرا ") سورة الإسراء الآية 24

إلى روح أبي الغالي رحمه الله وجعل قبره روضة من رياض الجنة

إلى من راهنت على نجاحي وعلمتني أن لا ابرح حتى ابلغ , أمي حبيبة قلبي حفظها الله , وأطال في عمرها جزاك الله عني خير الجزاء أماه

إلى من شاركوني تفاصيل الحياة وأمضيت معهم اسعد الأوقات أخواتي وإخوتي وإلى البراعم الذين زرعو البهجة والسرور في أجواء العائلة

إلى من يحسنون الصحبة ويكرمون الرفقة إلى رفاق الرحلة الجامعية "نور هان و فاطمة الزهراء"

إلى كل عائلتي وأصدقائي وزملائي في العمل كل من ساعدني من قريب أو من بعيد في إتمام هذه الدراسة

إلى الذين لا يذكرهم احد

إلى كل من سعتهم ذاكرتي وذكرهم قلبي ونسيهم قلبي

إلى دفعة 2024

مريم



### إهداء

الحمد لله حمدا وامتنانا، ما كنت لأفعل هذا لولا فضل الله فالحمد لله على البدء والختام.....أهدي ثمرة نجاحي إلى:

\_ من قال فيهما الله سبحانه وتعالى : وقضى ربك ألا تعبدوا إلا إياه وبالوالدين إحسانا.

\_ إلى قدوتي في الحياة إلى من رباني وغرس في روحي مكارم الأخلاق إلى من أفنى عمره من أجلنا أبي الغالي حفظه الله ورعاه.

\_ إلى جنة الله في الأرض أُمي التي ظلت دعواتها ترافقني دائما دكتورتي في الحياة لا تكفي الكلمات لوصفك أُمي.

\_ إلى سندي في الحياة إخوتي وأخواتي الدرع الواقي لي عند عثراتي في الحياة.

\_ إلى جدتي (مبيريكة) التي دعواتها لم تفارقني في حياتي

\_ جدتي (فاطمة) وجدي (عبد الرحمان) رحمهما الله

\_ إلى عائلتي الكريمة دون استثناء تقديرا لكم

\_ إلى صديقاتي (خديجة, مريم, نور هان )

\_ إلى زملائي في الدراسة وكل من صادفتني بهم الحياة ودعموني بكلمة طيبة

\_ إلى أساتذتي الكرام الذين جعلهم الله سببا في الوصول إلى هذا المستوى.



# Graduation



## ملخص

إن انجاز الطرق يعتمد أساسا على استخدام المواد الأولية التي يجب إن تكون بمواصفات مطابقة للمقاييس ,مما يضمن جودة وديمومة الطريق. تعاني بعض المناطق , خاصة الصحراوية , من نقص في هذه المواد مما يزيد من تكلفة المشاريع بسبب الحاجة إلى نقلها لمسافات طويلة لذلك , يبحث الخبراء عن بدائل فعالة واقتصادية , ويعتبر رمل الكثبان احد هذه البدائل.

ويعتبر الضغط خطوة حاسمة في بناء الطرق . فهو يحسن كثافة وقوة مواد الطريق مما يؤدي إلى متانة أفضل وطول عمر أطول للطريق. تعد طاقة الضغط عاملا مهما يؤثر على الخواص الميكانيكية للمادة المضغوطة تهدف هذه المذكرة إلى دراسة تأثير السلوك الميكانيكي لمواد الطريق

**الكلمات المفتاحية:** الدمك , طاقة الرص , مواد الطرق , السلوك الميكانيكي , الاستدامة , الصيف .

### Abstract:

The construction of roads depends mainly on the use of raw materials that must be in accordance with standards, which ensures the quality and longevity of the road. Some areas, especially the desert, suffer from a shortage of these materials, which increases the cost of projects due to the need to transport them over long distances. Therefore, experts are looking for effective and economical alternatives, and dune sand is one of these alternatives.

Compaction is a crucial step in road construction as it improves the density and strength of road materials leading to better durability and longer road longevity. Compaction energy is an important factor affecting the mechanical properties of the compacted material. This paper aims to study the effect of compaction energy on the mechanical behavior of road materials.

**Key words:** compaction, compaction energy, road materials, mechanical behavior, sustainability, pavement.

## Résumé:

La construction des routes dépend principalement de l'utilisation de matières premières qui doivent être conformes aux normes, ce qui assure la qualité et la longévité de la route. Certaines régions, notamment les zones désertiques, souffrent d'une pénurie de ces matériaux, ce qui augmente le coût des projets en raison de la nécessité de les transporter sur de longues distances. C'est pourquoi les experts recherchent des alternatives efficaces et économiques, et le sable des dunes est l'une d'entre elles.

Le compactage est une étape cruciale dans la construction des routes car il améliore la densité et la résistance des matériaux routiers, ce qui se traduit par une meilleure durabilité et une plus grande longévité des routes. L'énergie de compactage est un facteur important qui affecte les propriétés mécaniques du matériau comprimé. Cet article vise à étudier l'effet de l'énergie de compactage sur le comportement mécanique des matériaux routiers.

**Mots-clés:** compactage , énergie de compactage , matériaux routiers, comportement mécanique, durabilité, chaussée.

## Liste de Tableaux

Tableaux	Titres	Pages
<b>Chapitre I: Généralités sur les matériaux routiers</b>		
Tableau I. 1	Comparatif de quelques spécifications pour l'utilisation des tufs calcaires.	<b>15</b>
<b>Chapitre II: Etude d'identification géotechnique</b>		
Tableau II. 1	Quelques valeurs des éléments climatologiques de la Wilaya de GHARDAIA (SMO 2023)	<b>29</b>
Tableau II.2	Caractéristiques géotechniques et mécaniques de sable de dune d'oued Metlili	<b>34</b>
<b>Chapitre III: Comportement mécanique des mélanges SD-C</b>		
Tableau III.1	Analyse chimique du ciment utilisé	<b>39</b>
Tableau III.2	analyse physique du ciment utilisé	<b>39</b>
Tableau III.3	Résistance à la traction en fonction du dosage au ciment et la compacité	<b>49</b>

## Liste de Figures

Figures	Titre	Pages
<b>Chapitre I: Généralités sur les matériaux routiers</b>		
Figure I. 1	Profil type d'une chaussée	<b>06</b>
Figure I.2	Chaussée de structure souple	<b>08</b>
Figure I.3	Chaussée bitumineuse épaisse	<b>08</b>
Figure I.4	Chaussée semi rigide	<b>09</b>
Figure I.5	Répartition des sables de dune dans le monde (Pye, 2009 cité par Cherrak 2015)	<b>10</b>
Figure I.6	Topographie du Maghreb (Hadjiat 1997 cité par Goual 2012).	<b>13</b>
Figure I.7	Fuseau de spécification de la technique routière saharienne (Fenzy, 1966).	<b>18</b>
Figure I.8	Coupe transversale type d'une chaussée saharienne (Morsli M. 2007).	<b>21</b>
<b>Chapitre II: Etude d'identification géotechnique</b>		
Figure II. 1	Réseau Routier de la Wilaya de Ghardaïa	<b>30</b>
Figure II. 2	Localisation des matériaux de bases.	<b>32</b>
Figure II. 3	Courbes granulométriques de sable de dune par rapport aux fuseau saharien	<b>34</b>

<b>Chapitre III: Comportement mécanique des mélanges SD-C</b>		
Figure III.1	Courbe Proctor modifié de sable de dune traité au ciment	<b>42</b>
Figure III.2	Variation de la densité sèche maximale et de la teneur en eau optimale en fonction du pourcentage de ciment.	<b>43</b>
Figure III.3	Courbes contrainte-déformation de sable de dune traité à 6% ciment pour les compacités théorique de (100%, 102,5% et 105%).	<b>46</b>
Figure III.4	Courbes contrainte-déformation de sable de dune traité à 9% ciment pour les compacités théorique de (100%, 102,5% et 105%).	<b>47</b>
Figure III.5	Courbes contrainte-déformation de sable de dune traité à 12% ciment pour les compacités théorique de (100%, 102,5% et 105%).	<b>47</b>

## Listes des photos

<b>Potos</b>	<b>Titres</b>	<b>Pages</b>
<b>Chapitre II: Etude d'identification géotechnique</b>		
Photo II.1	matériau utilisé	<b>31</b>
Photo II.2	Carrière de Sable de dune.	<b>32</b>
<b>Chapitre III: Comportement mécanique des mélanges SD-C</b>		
Photo III.1	Ciment MATINE CPJ-CEM II/A- L42	<b>39</b>
Photo III.2	Appareillage de l'essai Proctor Modifié	<b>42</b>
Photo III.3	Presse hydraulique	<b>45</b>
Photo III.4	éprouvette confectionnée	<b>45</b>
Photo III.5	éprouvettes cylindriques après conservation.	<b>45</b>
Photo III.6	Eprouvette de traction	<b>49</b>

## Liste de symbole

SD : sable de dune

FC : fines calcaire

ES : Equivalente de sable

VB : valeur au bleu de méthylène

CBR : californian Bearing Ratio : Indiceportant californien ICBR

IP : Indice de plasticité

WL : Limite de plasticité

W<sub>p</sub> : Limite de liquidité

W : Teneur en eau

RC : Résistance à la compression simple

C<sub>u</sub> : coefficient d'uniformité ou COEFICIENT DE HAZEN

C<sub>c</sub> : coefficient de courbure

$\gamma_{Dax}$  : Densité séché optimale de l'essai Proctor modifié

ESV : Valeur de l'Équivalenz de sable visuel

C : terme de cohésion

$\phi$ : Angle de frottement

$\sigma$  : contrainte normale.

## Sommaire

Remerciement	
Dédicace	
المخلص	<b>I</b>
Abstract	<b>I</b>
Résumé	<b>II</b>
Liste des tableaux	<b>III</b>
Liste des figures	<b>IV</b>
Liste des photos	<b>VI</b>
Liste de symbole	<b>VII</b>
Sommaire	<b>VII</b>
Introduction Générale	<b>01</b>
<b>Chapitre I: GENERALITES SUR LES MATERIAUXROUTIERS</b>	
I.1 Introduction	<b>05</b>
I.2 Définition	<b>05</b>
I.2.1.Constitution des chaussées routières	<b>05</b>
I.2.1.1 Couche de surface	<b>06</b>
I.2.1.2 Couche de base	<b>06</b>
I.2.1.3 Couche de fondation	<b>07</b>

I.2.1.4 Couche de forme	<b>07</b>
I.2.2 Familles de structures de chaussée	<b>07</b>
I.3 Le sable de dune	<b>09</b>
I.3.1 Définition	<b>09</b>
I.3.2 Formation et localisation des sables de dune	<b>10</b>
I.3.3 Caractéristique des sables de dunes	<b>11</b>
I.3.3.1 Composition chimique et minéralogique	<b>11</b>
I.4.1 Différents aspects du contexte saharien	<b>12</b>
I.4.1.1 Contexte climatique	<b>13</b>
I.4.1.2 Le sol support	<b>13</b>
I.4.1.3 Le trafic	<b>14</b>
I.4.2 La technique routière saharienne (TRS)	<b>14</b>
I.4.2.1 Principes de la technique routière Saharienne	<b>16</b>
I.4.2.2 Domaine d'application	<b>17</b>
I.4.2.3 Critères de choix de matériaux pour couches de base et de fondation	<b>18</b>
I.4.2.3.1 Matériaux à angle de frottement élevé	<b>19</b>
I.4.2.3.2 Matériaux à « cohésion » élevée	<b>19</b>
I.4.2.3.3 Matériaux intermédiaires	<b>20</b>

I.4.3 Mode de construction des routes au Sahara	<b>21</b>
I.4.3.1 Terrassements	<b>22</b>
I.4.3.2 Couche de fondation	<b>22</b>
I.4.3.3 Couche de base	<b>22</b>
I.4.3.4 Couche de roulement	<b>23</b>
I.5 Le sable de dune en tant que matériau routier au sahara	<b>24</b>
I.6. Conclusion	<b>25</b>
<b>Chapitre II: ETUDE D'IDENTIFICATION GEOTECHNIQUE</b>	
II.1 Introduction	<b>27</b>
II.2. Présentation	<b>27</b>
II.2.1 Présentation de la Wilaya de Ghardaïa	<b>27</b>
II.2.1.1 Contexte climatique de la Wilaya de Ghardaïa	<b>27</b>
II.2.1.2 Etat du Réseau Routier de la Wilaya de Ghardaïa	<b>29</b>
II.2.2 Présentation et Localisation du site prélèvement des échantillons	<b>31</b>
II.3 Etude d'identification des matériaux	<b>32</b>
II.3.1 Les caractérisations du matériau de base	<b>32</b>
<b>CHAPITRE III :COMPORTEMENT MECANIQUE DES MELANGE SD-C</b>	
III.1 Introduction	<b>37</b>
III .2.Présentation du ciment utilisé	<b>38</b>

III.3.Etude de l'influence du traitement au laboratoire	<b>40</b>
III.4 Influence de traitement sur les caractéristiques de compactage Essai Proctor Modifié (NF P 94 – 093)	<b>41</b>
III.5 Influence de traitement sur le comportement mécanique	<b>44</b>
III .5.1Essai CBR (L'indice portant californien CBR)( NF P 94-078)	<b>44</b>
III.5.2Essai de compression simple	<b>44</b>
III.5.3 Essai de traction	<b>48</b>
III.6 Conclusion	<b>50</b>
Conclusion Générale	<b>51</b>
Référence bibliographique	<b>53</b>

### **INTRODUCTION GENERALE**

Le désert représente plus des trois quarts de la superficie de l'Algérie. Pour diverses raisons, notamment économique, la tendance actuelle est à l'utilisation de matériaux locaux tels que le sable de dune. Jusqu'à présent, les matériaux utilisés pour la construction des routes étaient limités à certains matériaux considérés comme "nobles", tels que les graviers et les roches concassées, tandis que le sable était considéré comme un matériau secondaire aux propriétés intermédiaires.

Les sables du désert algérien contiennent de grandes quantités de sable utilisable pour la construction. Longue temps négligée, ce type de sable fait aujourd'hui l'objet d'importants efforts de valorisation. Le sable de dune étant un matériau de qualité médiocre, ses propriétés mécaniques doivent être optimisées à l'aide de liants tels que le ciment. Cette optimisation permet de l'utiliser pour la construction de routes.

Il y a plusieurs raisons qui font que l'utilisation de sable de dune est indispensable dont :

- Les immenses gisements qui se trouvent en de nombreuses régions où les autres matériaux dits nobles sont rares et s'épuisent de plus en plus ;
- Plusieurs régions sont pauvres en matériaux doués de caractéristiques qui répondent aux exigences de la technique actuelle, ce qui nécessite le transport des matériaux satisfaisants. En effet le transport des granulats pose un double problème : le coût de transport de grandes quantités et la dégradation du réseau routier ;
- L'insensibilité à l'eau pour les sables propres, et l'imperméabilité qui en fait un matériau drainant. Les régions sahariennes ont toujours été les plus démunies à cause de leurs conditions difficiles et de l'absence totale de ressources naturelles en surface.

La présence de l'homme y est très faible par rapport aux régions du nord, ce qui a limité les projets de construction et d'infrastructures de toutes sortes. Les autorités commencent à mieux explorer ces régions et à y investir pour une exploitation plus large de ce que nous offre la nature. Dans le Sahara, plusieurs activités sont nées, dont :

## **Introduction générale**

---

- La prospection et l'exploitation du sous-sol ;
- Le tourisme ;
- L'alimentation et le développement de ces nouveaux marchés.

Il est par conséquent, nécessaire d'y développer le réseau routier particulièrement.

Cependant, le milieu saharien présente non seulement les conditions les plus défavorables au développement économique, mais aussi des particularités techniques pour la conception et la réalisation des constructions.

La construction de routes au Sahara est caractérisée par des travaux de terrassement sont en général peu importants étant donnée la monotonie du relief ; la couche de base est réalisée en matériaux naturels locaux prélevés à partir d'emprunts avoisinant le tracé ce qui réduit considérablement le coût de réalisation.

Notre étude s'inscrit dans le cadre de la valorisation des matériaux locaux et leur traitement en vue de leur utilisation en constructions routière dans les régions riches en matériaux sableux et pauvres en matériaux nobles. Les objectifs sont de comprendre, prévoir et contrôler le comportement mécanique d'un sable de dune de la région de Ghardaïa traité avec différents pourcentages de ciment. Cela, dans le cas de la faible teneur en eau initial causé soit par la rareté de l'eau dans cette région, la non maîtrise de la main d'œuvre, ou par l'évaporation rapide de l'eau étant donné que température dans cette région peut atteindre 50°C (Morsli et al. 2019).

Ce mémoire sera organisé comme la suite :

Le premier chapitre est consacré à l'étude bibliographique ou on présente des généralités sur les sables de dune, les techniques de traitement ainsi que leurs utilisations en technique routière.

Le deuxième chapitre présente l'étude d'identification géotechnique du sable de dune étudié, réalisé dans le Laboratoire des Travaux Publics de Sud (LTPS).

Le troisième chapitre consternant l'étude de l'influence de la teneur en eau de compactage et la compacité sur la résistance du sable de dune traité au ciment.

## **Introduction générale**

---

Enfin, ce travail est clôturé par une conclusion générale qui regroupe les principaux résultats trouvés avec une proposition de recommandations qui nous semble utiles pour d'éventuels travaux futurs portant sur ce domaine.

# **Chapitre I**

## **GENERALITES SUR LES MATERIAUXROUTIERS**

## GENERALITES SUR LES MATERIAUXROUTIERS

### I.1 INTRODUCTION

Dans notre pays la route joue un rôle de première importance, car 90%du volume des échanges (de personne et de marchandises) se font par transport routier. Cela reflète la pré dominance du mode de transport routier par rapport aux autres modes, on comprend dès lors, tout l'intérêt que présente le développement du réseau routier ainsi que sa sauvegarde.

En effet, la route a toujours été un élément stratégique et économique d'une importance considérable, son intervention et ses sollicitations dans plusieurs domaines ne sont plus à démontrer et est un facteur déterminant de développement socio-économique et un outil que l'état a entre les mains pour maintenir un certain niveau d'équité entre les populations (Morsli, et al. 2000, 2002, daheur2019 ),

### I.2 Définition :

Une route est au sens littéral une voie terrestre (au niveau du sol ou sur viaduc) aménagée pour permettre la circulation de véhicules à roues. Ce terme s'applique plutôt aux voies importantes situées en rase campagne et ne peut être apparenté à une rue. Dans les pays vastes et peu peuplés, à la fin du siècle, de nombreuses routes étaient encore des chemins empierrés ou damés (les "sentiers battus").

#### I.2.1 Constitution des chaussées routières :

Les chaussées se présentent comme des structures multicouches (figure (I.1)), qui sont mises en œuvre pour répartir les charges induites par le trafic sur le sol support. La chaussée doit avoir une épaisseur telle que la pression verticale transmise au sol soit suffisamment faible afin que celui-ci puisse la supporter sans dégradation. Les différences couches de haut au bas sont:

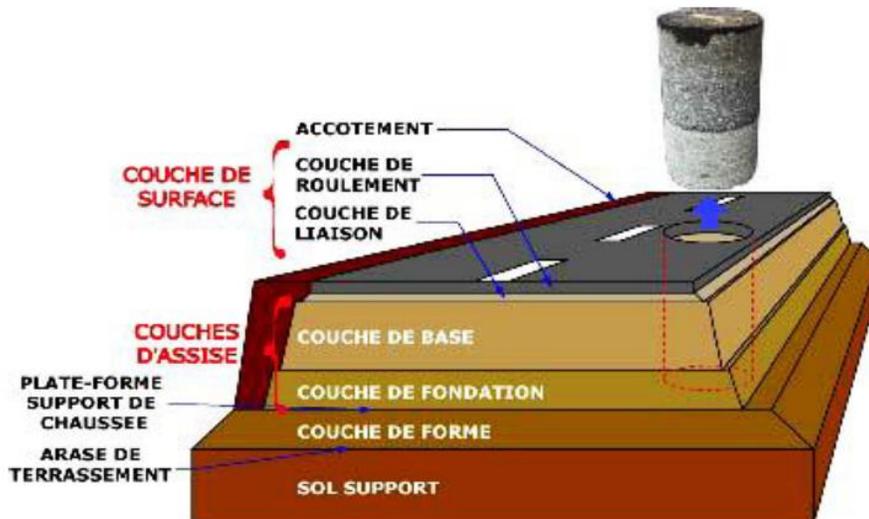


Figure (I.1) : Profil type d'une chaussée

### I.2.1.1 Couche de surface:

Cette couche est en contact direct avec les pneumatiques des véhicules et les effets extérieurs. Elle a pour rôle essentiel d'encaisser les efforts de cisaillement provoqués par la circulation. Elle est, en général, composée d'une couche de roulement et d'une couche de liaison.

La couche de roulement a pour rôle :

- D'imperméabiliser la surface de la chaussée ;
- D'assurer la sécurité (adhérence) et le confort des usagers (bruit, uni) ;
- De résister au vieillissement dû aux agents atmosphériques et aux gradients thermiques ;

La couche de liaison a pour rôle essentiel :

- D'assurer une transmission aux couches inférieures plus rigides,
- D'assurer une bonne adhérence entre les couches qui l'enveloppent.

### I.2.1.2 Couche de base :

La couche de base a pour rôle essentiel de reprendre les efforts verticaux et de répartir les contraintes normales qui en résultent sur les couches sous-jacentes.

**I.2.1.3 Couche de fondation :**

Le rôle de la couche de fondation est d'assurer un support à la couche de base et permet un bon compactage, elle reprend les contraintes normales et les répartit sur le sol support.

**I.2.1.4 Couche de forme :**

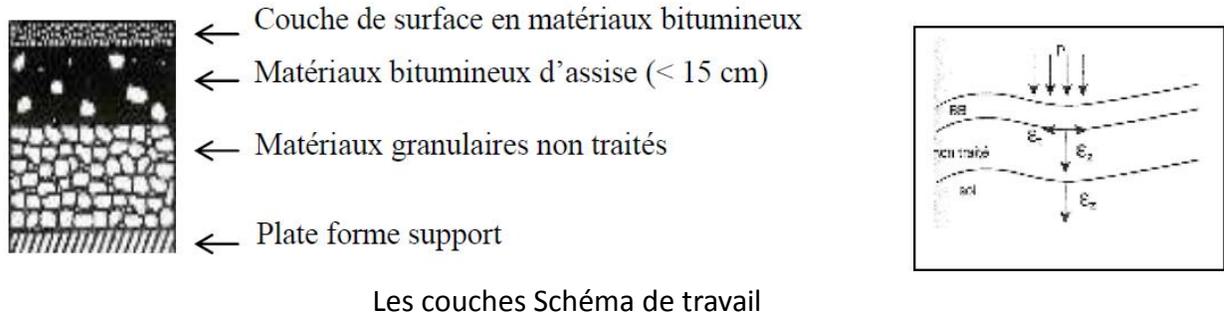
La couche de forme est généralement prévue pour répondre à certains objectifs en fonction de la nature du sol support :

- Sur un sol rocheux, la couche de forme aura un rôle de nivellement afin d'aplanir la surface avant de mettre en œuvre la couche de fondation.
- Sur un sol peu portant, la couche de forme est mise en œuvre essentiellement pour assurer une portance suffisante à court terme permettant aux engins de chantier de circuler librement.

**I.2.2 Familles de structures de chaussée:**

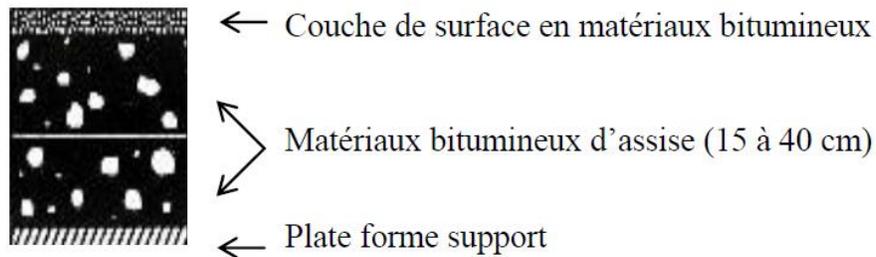
On distingue les principaux types de structure de chaussée (selon la norme NF P 98-080-1 et la norme NA 5365) :

Les chaussées souples dont le revêtement est à base du liant hydrocarboné « Bitume » qui comportent une couverture bitumineuse mince reposant sur une ou plusieurs couches de matériaux granulaires non traités (Figure (I.2)). Les matériaux granulaires non liés ont une faible rigidité qui dépend de celle du sol et de leur épaisseur. Comme la couverture bitumineuse est relativement mince, les efforts verticaux dus au trafic sont transmis au support avec une faible diffusion latérale. Les contraintes verticales élevées engendrent par leur répétition des déformations plastiques du sol ou du grave qui se répercutent en déformations permanentes en surface de la chaussée. La couverture bitumineuse subit à sa base des efforts répétés de traction-flexion. t.b.nguyen



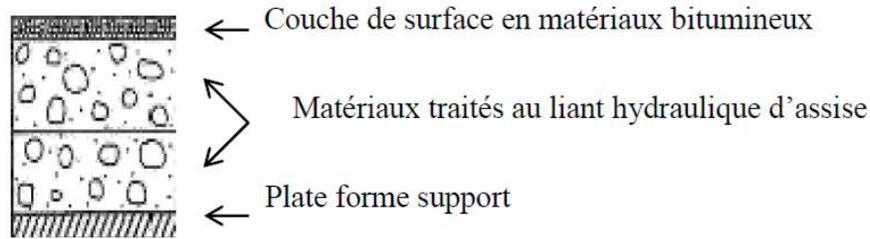
**Figure (I.2) :** Chaussée de structure souple

Les chaussées bitumineuses épaisses se composent d'une couche de roulement bitumineuse sur un corps de chaussée en matériaux traités aux liants hydrocarbonés, disposés en une ou deux, voire trois couches (Figure (I.3)). La rigidité et la résistance en traction des couches d'assise en matériaux bitumineux permettent de diffuser les charges en atténuant fortement les contraintes verticales transmises au support..**t.b.nguyen**



**Figure (I.3) :** Chaussée bitumineuse épaisse

Les chaussées à assise traitées aux liants hydrauliques (semi-rigides) comportent une couche de surface bitumineuse sur une assise en matériaux traités aux liants hydrauliques disposée en une ou deux couches (Figure (I.4)). Compte tenu de la très grande rigidité des matériaux traités aux liants hydrauliques, les contraintes verticales transmises au support sont très faibles. En revanche, la couche traitée subit des contraintes de traction-flexion et qui s'avèrent prédominantes pour son dimensionnement. (Les chaussées en béton de ciment ont un mode de fonctionnement de même type que les chaussées semi-rigides).



**Figure (I.4) :** Chaussée semi rigide

Les chaussées rigides sont des structures dont la couche de base, au moins, est en béton de ciment.

Les chaussées inverses sont des structures dont la couche de fondation est en matériaux traités aux liants hydrauliques et la couche de base au moins en matériaux non traités.

### **I.3 LE SABLE DE DUNE**

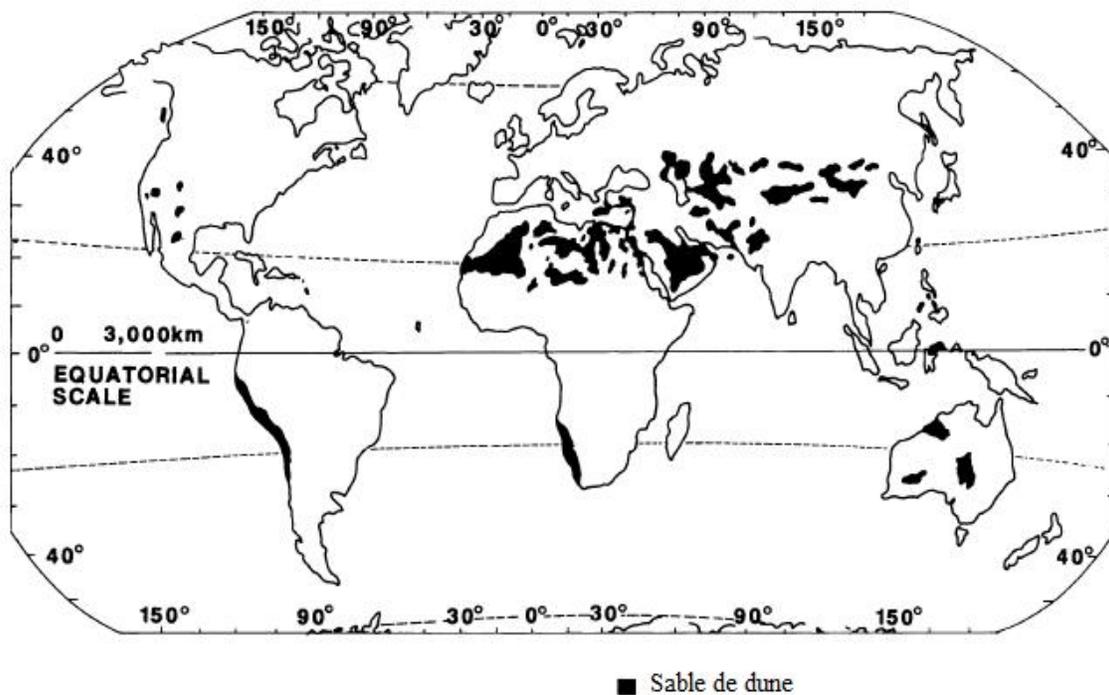
#### **I.3.1 Définition :**

Les sables, que l'on trouve dans les dunes mouvantes, sont composés de particules siliceuses pratiquement de même taille et de petites dimensions. Ces sables se trouvent dans plusieurs régions du désert accumulés sous forme de dunes mouvantes de hauteur très variable et occupent de vastes territoires dans le sud algérien. La vitesse et l'intensité des vents sont les deux facteurs responsables du triage granulaire de ces sables, de leur distance de transport et de leur mode d'accumulation (Oldache, 1988).

Le sable est composé de différents minéraux, tels que la silice, les silicates, les carbonates et les argiles (les silicates sont la famille la plus abondante dans la nature, représentant 90 % en masse de l'écorce terrestre). Les sables de dunes sont essentiellement des sables siliceux très propres, leur teneur en carbonate et en argile se trouvant sous forme de traces.

### I.3.2 Formation et localisation des sables de dune

Les dépôts de sable éolien couvrent environ 6% de la surface émergée du globe, dont environ 97% se trouve dans les grandes zones arides. En moyenne, environ 20% des zones arides du monde sont couvertes par des sables éoliens. Les proportions vont de 2% en Amérique du Nord à plus de 30% en Australie, 25% en Afrique et supérieur à 45% en Asie centrale comme montré sur la figure 1.2 (Pye, 2009 cité par Cherrak 2015). En Algérie, Les sables de dune se trouvent dans les régions sud et couvrant 60% de la superficie globale (Kettab, 2007).



**Figure 1.5 :** Répartition des sables de dune dans le monde (Pye, 2009 cité par Cherrak 2015)

D'après plusieurs études réalisées dans les régions sahariennes du pays, les sables de dune ont pour origine la désagrégation des roches sous l'effet conjugué des chocs thermiques et de l'altération des sols constituant les lits d'oueds ou d'anciens fleuves (Vial, 1978). On constate que l'intensité des vents de sables et leurs directions ont une action déterminante sur la localisation et l'ampleur des gisements en liaison avec la topographie du terrain.

### **I.3.3 Caractéristique des sables de dunes :**

#### **I.3.3.1 Composition chimique et minéralogique :**

Les sables de dunes du Sahara algérien sont composés essentiellement de silice (plus de 95 %) avec de 1 à 2 % de calcaire et des traces de différents oxydes.

L'analyse minéralogique par diffractométrie aux RX des différents sables prélevés de plusieurs régions du Sud Algérien, a montrés que l'ensemble de ces sables sont à prédominance quartzitique, contenant en faible quantité des minéraux d'origine sédimentaire (calcite, gypse), magmatique (feldspath) et d'altération feldspathique (argiles).

#### **a) Granulométrie :**

Le diamètre maximal ( $D_{max}$ ) de sable de dune est de l'ordre de 0,5 mm. Il est maximal aux endroits les plus proches de la roche mère et diminue de plus en plus quand on s'en éloigne. Les particules deviennent aussi de plus en plus arrondies. Le diamètre des éléments les plus fins est de l'ordre de 0,04 mm.

Le coefficient d'uniformité  $C_u$  est de l'ordre de 1,8 et le coefficient de courbure  $C_c$  est de l'ordre de 10. Il s'agit donc d'un sable très fin mal gradué (Ben dhia 1998).

#### **b) Propreté :**

Le sable de dune est généralement propre, sa limite de liquidité  $w_L$  est de l'ordre de 25 et la limite de plasticité est non mesurable. Il ne contient pratiquement pas de traces d'argile. La valeur de l'équivalent de sable est supérieure à 60 %. Concernant la valeur du bleu, elle est de l'ordre de 0,1.

#### **c) Caractéristiques physiques**

Les caractéristiques physiques de ces sables de dune de différentes régions du sud algérien sont presque identiques avec une masse volumique apparente de l'ordre de 1400 kg/m<sup>3</sup>, coefficient d'absorption d'eau l'ordre de 0.35 %, une Compacité de 60% et Porosité de 40%.

**d)Caractéristiques mécanique et géotechnique :**

Ould Sid et al. (1995) cité par Ben dhia 1998a réalisé desessais de compactage puis de cisaillement direct sur le sable de dune. Les principaux resultants trouvés sont :

- L'effet de la teneur en eau sur le compactage est peu significatif quand la teneur en eau est faible (0 à 6 %) ;
- La cohésion à une valeur très faible ou presque négligeable, de l'ordre de 5 kPa ;
- L'angle de frottement interne varie de 30 à 35°.

L'indice portant CBR de ces sables est de l'ordre de 10 %. Ce qui a permet aux ingénieurs et les techniciens du domaine routier d'écartier toute possibilité d'utiliser ces sables seuls en corps de chaussée.

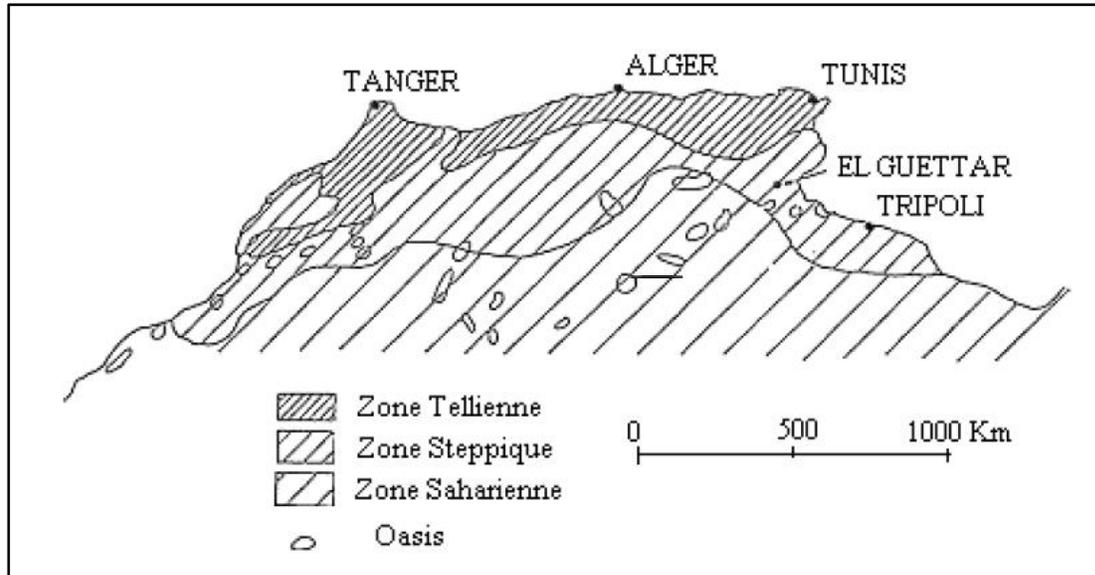
**I .4 .1Différents aspects du contexte saharien**

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 2.1).

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

**b)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.

**c)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).



**FigureI.6** Topographie du Maghreb (Hadjiat 1997 cité par Goual 2012).

### 4.1.1 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) (Touat T. 1994). On note aussi la rareté et l'irrégularité des pluies (une pluviométrie moyenne annuelle inférieure à 100 mm) (Touat T. 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.

### 4.1.2 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.

### 4.1.3 Le trafic

Le trafic des routes sahariennes 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.

## 4.2 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-porteur ;

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'encroûtement, ces matériaux présentent une cohésion notable après compactage et séchage. La plupart des pays qui utilisent de façon courante ce matériau 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 utilisateurs de ce matériau. Pour un même objectif les spécifications peuvent être différentes par le type de caractéristiques retenues et par le niveau des exigences.

La Technique Routière Saharienne (TRS) est établie en 1965, lors du 1er congrès de la route déroulé à Beni-Abbès) 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).

Le tableau I-1 récapitule les exigences et les seuils imposés par La Technique Routière Saharienne (TRS), les spécifications de Struillou et Alloul (Struillou et Alloul, 1984) et les instructions relatives à l'utilisation des tufs d'encroûtement en corps de chaussées, jointes par Le CTPP (CTPP, 2001) dans le Catalogue algérien de Dimensionnement des Chaussées Neuves.

**Tableau I-1 :** Comparatif de quelques spécifications pour l'utilisation des tufs calcaires.

Caractéristique	Couche	Algérie		
		TRS	Struillou et Alloul (1984)	CTPP 2001
D max (mm)	B	-	-	20 - 40
	F			
% < 0,425 mm		-	-	36 - 52 22 - 32
% < 80µm	B	< 30	≤ 30	
	F			
Limite de liquidité		-	-	< 40
Indice de plasticité		< 13	<10 Zone II	< 15
			< 13 Zone III	

			< 16 Zone IV	
La densité sèche maximale (kN/m <sup>3</sup> )		> 17	-	-
Indice CBR Après immersion	B	-	40 - 100	Zone II et III
	F			
ICBR Immédiat		> 40	-	
Coefficient Los Angeles max	B	-	100	
	F			
Rc (MPa) 28 j		> 1.5	-	
%Carbonate CaCO <sub>3</sub>	B	-	> 60	
	F			
% Sulphates CaSO <sub>4</sub>		-	Trace Zone II 5 Zone III	

#### 4.2.1 Principes de la technique routière Saharienne

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

- A 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 pluies.

#### 4.2.2 Domaine d'application :

Cette technique n'est donc applicable que (Améraoui, 2002) :

- 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.7), 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 ».

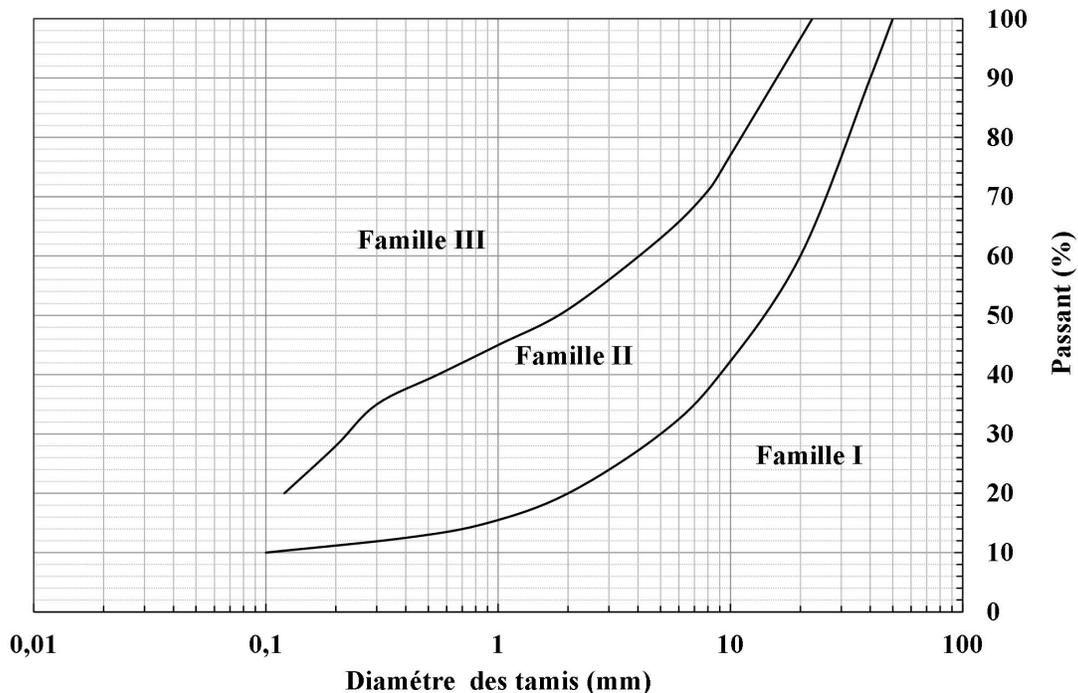


Figure I.7 Fuseau de spécification de la technique routière saharienne (Fenzy, 1966).

### 4.2.3 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).

### 4.2.3.1 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.

### 4.2.3.2 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 nombre 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 (<0.080 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).

#### 4.2.3.3 Matériaux intermédiaires

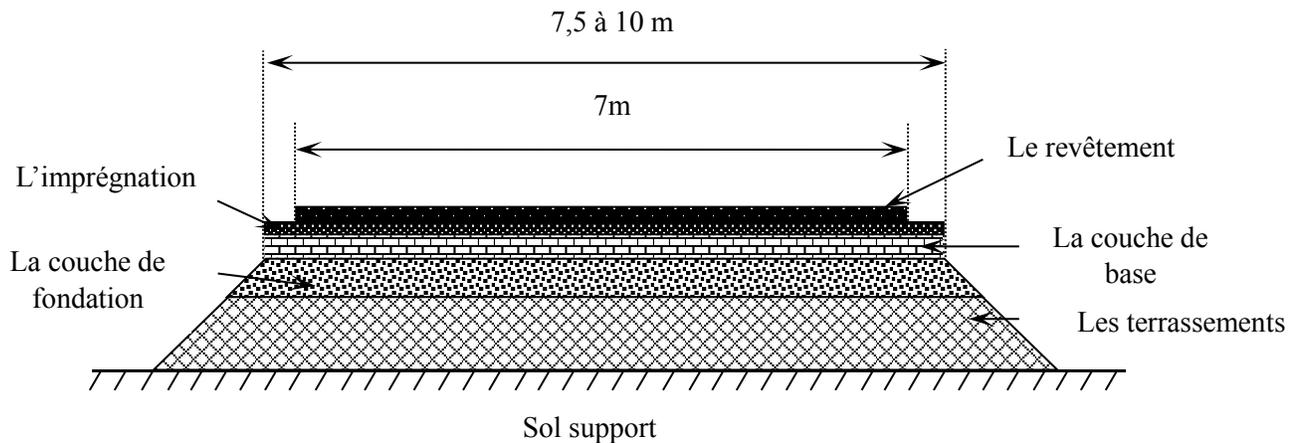
Il existe évidemment dans la nature tous les matériaux intermédiaires dont la cohésion et l'angle de frottement sont moyens.

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.

### 4.3 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.



**Figure I-8-** Coupe transversale type d'une chaussée saharienne (Morsli M. 2007).

### 4.3.1 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).

### 4.3.2 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.

### 4.3.3 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 suivants :

- 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).

#### 4.3.4 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.

En résumé, la construction de routes dans les zones désertiques implique l'utilisation de matériaux locaux, une conception adaptée au climat et aux conditions environnementales spécifiques, ainsi que des normes strictes de construction pour assurer la durabilité et la résistance des chaussées (Morsli, 2002).

### **I.5 Le sable de dune en tant que matériau routier au Sahara**

Les matériaux de routes utilisés doivent résister à des sollicitations répétées soit à un très grand nombre de fois notamment celui du passage répété des véhicules lourds. Chaque couche nécessite un matériau qui convient à la mission qui lui est assignée soit des qualités physiques et mécaniques adéquats.

Le Sahara présente certains aspects liés à la nature du sol, au climat et au trafic, ces caractéristiques ont poussés les ingénieurs et les techniciens routiers à innover en mettant à profit ces particularités pour ouvrir très largement l'éventail des matériaux utilisés en corps de chaussées, tels que les tufs et les sable de dune qui sont initialement inadéquates pour une utilisation routière selon les normes classiques.

L'utilisation des sables en techniques routières n'est pas nouvelle. A l'état brut, les sables de dunes n'ont pas des caractéristiques mécaniques satisfaisantes aussi bien pour les structures que pour la réalisation des différentes couches de chaussées, permettant ainsi de reprendre les sollicitations dues à la circulation. Ils sont pratiquement non compactables et leurs portances sont très faibles. L'utilisation du sable de dune seul ne peut être envisagée malgré la facilité qu'il présente au reprofilage, car sa stabilité de surface est souvent incertaine, ce qui augmente la résistance au roulement et provoque parfois des enlacements (Ben dhia 1998). Le traitement des sables de dune devient indispensable dans la plupart des structures ; il a pour but d'améliorer leurs performances mécaniques en leur conférant des caractéristiques mécaniques et de stabilité suffisantes leur permettant de résister aux sollicitations imposées.

Plusieurs études de traitement des sables de dune aux liants hydrocarbonés ou hydrauliques ou mélangé avec d'autres granulats (Ben dhia 1998 ; Kettab et al. 2002 ; Nedjari 2003 ; Kettab 2007 ; Morsli 2007 ; Ghrieb et al. 2013 ; Cherrak et al. 2015 ; Akacem 2017) ont été réalisées.

Les différents auteurs sont en accord avec les résultats suivants :

- L'incorporation du sable de dune améliore d'une manière claire la portance des matériaux ;
- Le poids volumique s'améliore aussi ou reste quasi constant lorsque la teneur en sable augmente jusqu'à un pourcentage entre 25 et 30 %, puis, elle décroît légèrement pour aboutir une la valeur supérieur à celle du sable brute ;
- Quant à la plasticité, elle diminue au profit d'une nette amélioration de la propreté, qui peut être caractérisée par l'essai d'équivalent de sable.

## **I.6 Conclusion**

En raison du manque de ressources dans les régions du sud, les ingénieur étudient depuis des années la possibilité d'utiliser des matériaux locaux tels que le sable du désert, qui est l'un des matériaux les plus abondants dans le désert algérien. Les conditions climatique du désert algérien permettent d'utiliser une large gamme de matériaux dans les techniques de construction en milieu désertique.

**Chapitre :II**

**ETUDE**

**D'IDENTIFICATION**

**GEOTECHNIQUE**

**II.1.Introduction :**

Pour réaliser tout projet dans le domaine de la construction, Le sol désiré devrait être analysé, étudié et classé en laboratoires par des expériences géotechniques appliquées à des échantillons de ce sol, ainsi que des essais au site.

Ce chapitre est consacré à l'étude d'identification géotechnique des matériaux de base (sable de dune et le ciment) à l'aide des essais géotechniques conventionnels réalisés au Laboratoire des Travaux Publics de Sud (LTPS).

L'objectif est :

- ✓ Comparaison les résultats des essais avec les seuils préconisés par des spécifications et des normes retenues pour leurs emplois en corps de chaussée.
- ✓ L'identification géotechnique telle qu'elle est pratiquée actuellement dans les laboratoires.
- ✓ Classer ces matériaux selon certaines propriétés et caractéristiques.

**II.2. Présentation :****II.2.1 Présentation de la Wilaya de Ghardaïa :**

Elle est considérée comme l'une des wilayas les plus importantes du pays, tant par sa situation géographique Géographie et stratégie, sa superficie totale est estimée à 21224,03 km<sup>2</sup>. Le territoire de Ghardaïa est situé au centre de l'Algérie dans le Nord du Sahara algérien, à 600 km au sud d'Alger, à 190 km au sud de Laghouat, à 270 km d'El Menia et à 190 km à l'ouest de Ouargla à 45 km la région de Metlili. Et est traversée par la route nationale N° 1 reliant la capitale algérienne à la Grande Sud.

**II.2.1.1 Contexte climatique de la Wilaya de Ghardaïa :**

Le climat de la wilaya de Ghardaïa de type saharien, 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. La fréquence des vents est élevée tout au long de l'année, en particulier les vents extrêmement rapides Plus de 5 m/s provoqueront des tempêtes de sable.

Pour avoir une idée sur la climatologie de Ghardaïa, on va présenter quelques éléments climatologiques de l'année 2021 sur le tableau II.1.

**a. Température**

La température moyenne mensuelle enregistrée par la station de GHARDAIA durant la période 2013– 2023 varie entre un minimum de 5 °C en janvier 2013 et un maximum de 45 °C en juillet 2013.

**b. L'humidité**

L'humidité relative est en relation très étroite avec la nébulosité qui est faible dans cette région. Elle atteint son maximum (entre 80 et 90%) en janvier, et peut descendre jusqu'à 10 % en juillet. D'une manière générale, l'humidité relative dépasse les 50 % durant la période octobre – avril.

**c. Les vents**

La fréquence des vents est très grande durant toute l'année est notamment les vents dont la vitesse est supérieure à 5m/s qui peuvent provoquer des vents de sable. Les vents dont la vitesse est comprise entre 1 et 5m/s sont moins fréquents.

**d. Pluviométrie**

La pluviométrie est très faible, la moyenne annuelle des dix dernières années (2013– 2023) est de 37,7mm.

Selon la carte pluviométrique de l'Algérie, la wilaya GHARDAIA est classée dans la zone climatique IV ( $H < 100$  mm/an) comme étant une région aride ou désertique.

**e. Evaporation**

La moyenne mensuelle de l'évaporation durant la période (2013-2023) est de 234,51 mm, et le total annuel durant cette période varie entre 2417 et 3522mm.

L'évaporation est donc très élevée durant l'année avec un maximum estival très marqué et un minimum hivernal soit respectivement 566,6 et 61,6 mm

**f. Insolation**

D'une manière générale, l'insolation journalière à GHARDAIA est forte de 7 à 8 heures en hiver et de 10 à 11 heures en été.

*Tableau II-1 : Quelques valeurs des éléments climatologiques de la Wilaya de GHARDAIA (SMO 2023)*

Année	T	TM	Tm	PP	V	RA	SN	TS	FG	TN	GR
2013	22,6	28,7	28,6	62,21	14,7	28	0	10	0	0	0
2014	23 ,3	29,5	17,3	35,29	14,6	24	0	10	0	0	0
2015	22,5	28,6	16,4	47,49	13,9	31	0	19	0	0	0
2016	23,2	29,3	17,1	17,51	14,2	21	0	12	0	0	0
2017	22,5	28,1	16,5	_	13,5	22	0	10	0	0	0
2018	22,5	28,0	16,6	15,31	11,4	25	1	23	0	0	0
2019	22,8	28,5	16,5	70,60	12,1	26	0	15	0	0	0
2020	23,0	28,8	16,7	22,86	13,0	19	0	15	0	0	1
2021	23,8	29,4	17,7	35 ,56	13,0	25	0	10	0	0	0
2022	23,4	29,2	17,2	15,74	12,7	20	0	14	0	0	0
2023	23,4	29,3	17,1	18,03	12,5	18	0	7	1	0	1

**(T)**Température moyenne annuelle ,

**(TM)**Température maximale moyenne annuelle,

**(Tm)**Température minim a le moyenne annuelle,

**(PP)**Précipitation totale annuelle de pluie et/ou neige fondue (mm),

**(V)**Vitesse moyenne annuelle du vent (Km/h),

**(RA)**Total jours de pluie durant l'année ,

**(SN)**Total jours de neige durant l'année,

**(TS)**Total jours de tempête durant l'année,

**(FG)**Total jours de brouillard durant l'année,

**(TN)**Total jours de tornades ou nuages en entonnoir durant l'année,

**(GR)**Total jours de grêle durant l'année

### **II.2.1.2 Etat du Réseau Routier de la Wilaya de Ghardaïa :**

La wilaya est située sur la route nationale n°1 (RN 1) est constitué un relai sur le grand axe méridien Alger/Laghouat/Ghardaïa/Tamanrasset, et le centre de gravité du territoire nord saharien, au point de rencontre des deux grandes « boucles » sahariennes.

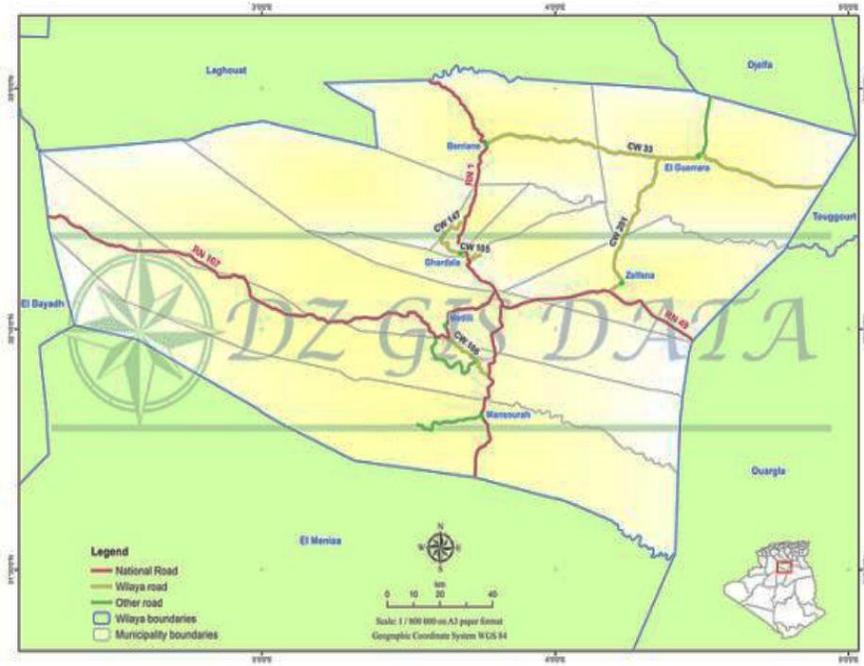


Figure II.1 : Réseau Routier de la Wilaya de Ghardaïa

**II.2.2 Présentation et Localisation du site prélèvement des échantillons :**

Le matériau de base choisi est

le sable de dune

et le liant utilisé est le ciment



sable de dune

Ciment

**Photo II.1:**matériau utilisé

**Sable de dune (SD):**

Le sable de dune proviennent d'oued Metlili (35 km au Sud -estde la wilaya de Ghardaïa).C'est un matériau local poreux, composé des grains discret de diamètre uniforme et de forme arrondis.



Photo II. 2 : Carrière de Sable de dune.

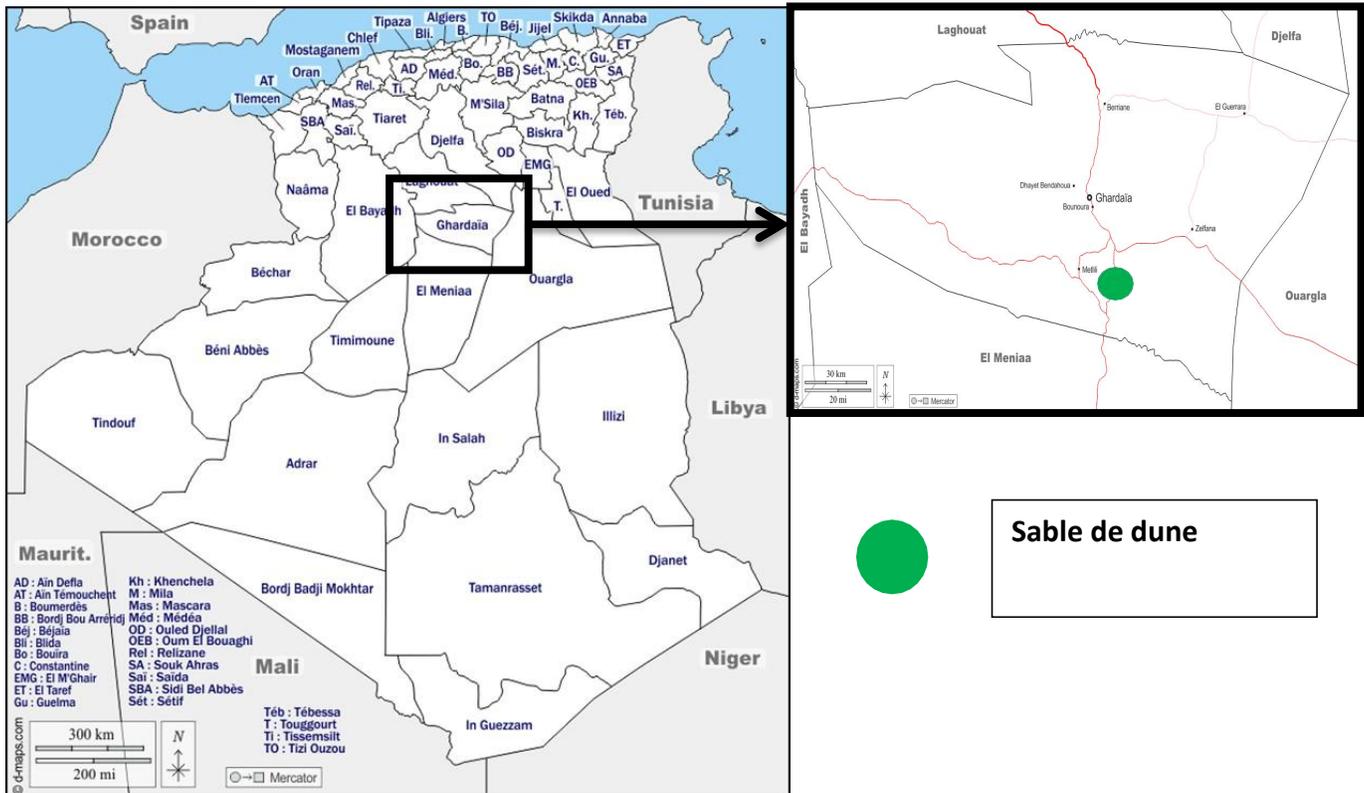


Figure II.2. Localisation des matériaux de bases.

### II.3. Etude d'identification des matériaux

#### II.3.1 Les caractérisations du matériau de base :

Les essais de caractérisation ont pour but de déterminer un bon nombre de paramètres et d'indices afin de classer les matériaux et de les situer par rapport aux spécifications et normes retenues pour leur emploi en corps de chaussée. L'identification géotechnique du matériau étudié a été réalisée selon des modes opératoires établis par la norme française avec néanmoins certaines modifications.

Il comprend les analyses et les essais suivants :

- Analyses granulométriques la norme NFP 94-056
- Les limites d'Atterberg (la norme NFP 94-051)
- L'équivalent de sable la norme NFP 18-598. II
- Essai au bleu de méthylène la norme NFP 94-068
- Essai de Proctor Modifié la norme NF P 94-093. II
- Essai CBR la norme NF P 94-078. II
- Résistance à la compression la norme NFP 98- 230-2
- Analyses chimiques

La figure II.2. Présente les courbes granulométriques de notre matériau. Les paramètres les plus significatifs tirés de cette analyse, les résultats de ces essais ainsi que les exigences des différentes spécifications et normes algériennes (technique routière saharienne « TRS »), et françaises (Catalogue de Dimensionnement des Chaussées Neuves « CTPP, 2001 » et le guide technique routière GTR « GTR, 1992 »), sont représentés dans le tableau II.2.

Nous constatons que notre matériau possède une courbe granulométrique uniforme sériée ( $C_u = 3.22$ ), avec un taux des fines ( $< 80\mu m$ ) inférieurs à 10%. Les résultats des essais de limites d'Atterberg montrent que le matériau est classé comme non plastique faiblement argileux. La valeur de la densité sèche maximale est inférieure à la limite minimale exigée par la TRS. Par rapport aux matériaux routiers habituels, le sable de dune est léger sa teneur en eau optimale est assez élevée. L'indice CBR immédiat est supérieur au seuil préconisé par la TRS. L'indice portant après 4 heures d'immersion, est plus faible que l'indice immédiat. En effet, on constate, une réduction de 70%. Le sable de dune ne présente aucune résistance. La constatation importante à signaler, d'après les



Cc	0.89	-	-	-	-	-	-
<b>Les limites d'Atterberg</b>							
$w_L$ (%)	17.71	-	< 40	-	-	No	-
$w_p$ (%)	-N.M*	-	-	-	-	Ok	-
$I_p$ (%)	-N.M*	< 13	< 15	≤ 12	Ok	Ok	Ok
<b>Equivalent de sable Es (%)</b>	65.04	-	-	-	-	-	-
<b>Valeur de bleu VB</b>	0.03	-	-	< 1.5	-	-	Ok
<b>Compactage</b>							
$\gamma_{dmax}$ (t/m <sup>3</sup> )	1.82	> 1.7	-	-	Ok	-	-
$\omega_{opm}$ (%)	12.40	-	-	-	-	-	-
<b>Portance</b>							
<i>I CBR Immédiat (%)</i>	46.19	> 40	-	-	Ok	-	-
<i>I CBR Imbibé (4h) (%)</i>	13.89	-	-	-	-	-	-
<b>Essai de compression simple à 95% <math>\gamma_{dmax}</math> (MPa)</b>	00	> 0.15	-	-	No	-	-
<b>Analyse chimique</b>							
<i>Insolubles (%)</i>	96	-	-	-	-	-	-
<i>CaCO<sub>3</sub> (%)</i>	00	-	≥ 45	-	-	No	-
<i>CaSO<sub>4</sub> ; 2H<sub>2</sub>O (%)</i>	1	-	-	-	-	-	-
Ok : condition satisfaite							
No : condition non satisfaite							

**Chapitre :III**

**Comportement  
mécanique des  
mélanges SD-C**

### III-1 Introduction :

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

Les caractéristiques géotechniques des sables de dunes notamment leurs faibles résistances ne permettent pas d'envisager leur emploi en assises de chaussées. Afin d'améliorer les performances mécaniques de ce matériau, nous avons le traité avec 6%, 9% et 12% de ciment.

Le mélange sol – ciment est un mélange à consistance plus ou moins plastique qui se transforme en pierre artificielle cohérente grâce à la réaction chimique entre le ciment et l'eau (l'hydratation). Peu de temps après la mise en œuvre, on observe une transformation rapide du mélange : c'est la prise. Son mécanisme proposé par le chatelier consiste à :

- Une dissolution des éléments des produits anhydres dans la phase aqueuse.
- Une cristallisation à partir de cette phase aqueuse des sels de calcium hydratés.
- Une croissance et un enchevêtrement des cristaux qui constituent la liaison entre les grains non hydratés.

Après cette phase commence le durcissement qui est relativement lent et dure plusieurs années. Les caractéristiques mécaniques du sol – ciment dépendent de la teneur en liant, de sa nature et de la répartition des granulats.

Dans ce chapitre on va traiter le sable de dune avec de pourcentages économiques réaliste de ciment, afin d'aboutir au meilleur choix technico-économique d'un projet routier.

- Sable de dune +6% ciment
- Sable de dune +9% ciment
- Sable de dune +12% ciment

**1. Avantages techniques :**

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

**2. Avantages écologiques et environnementaux :**

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

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

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

**III.2.Présentation du ciment utilisé**

Le ciment utilisé est un ciment portland dont la dénomination est CPJ-CEM II/A-L42.selon la nouvelle normalisation algérienne. Les analyses chimiques sont présentées dans le tableau III.1



PhotoIII - 1:Ciment MATINE CPJ-CEM II/B- L42

Tableau.III.1: :Analyse chimiquedu ciment utilisé

Désignation	Perte au feu	Résidus insolubles %	Teneur en sulfates SO3 %	Teneur en oxyde de magnésium MgO %	Teneur en chlorures %	Teneur équivalent en alcalis%
%	7.50-12	0.7-2	2-2.7	1-2.2	0.01-0.05	0.3-0.75
Désignation	Composition hypothétique du clinker					
%	C3S %	C2S %	C3A %	C4AF %		
	58-64	12-18	6-8	10-12		

Tableau III- 02: analyse physique du ciment utilisé

Masse volumique apparente (kg/m <sup>3</sup> )	894.47
Masse volumique absolue (kg/m <sup>3</sup> )	2924
Consistance normale (%)	W=26.32(131.6g)
Temps de début de prise (min)	145
Temps de fin de prise (min)	235
Résistance à la compression (MPa) 28 jours	42.52

### III.3. Etude de l'influence du traitement au laboratoire :

Notre étude au laboratoire est composée des investigations suivantes :

- Influence du traitement sur les caractéristiques immédiates (densité sèche, teneur en eau optimale)
- Influence du traitement sur les caractéristiques mécaniques :
  - ✓ Essais de compression simple
  - ✓ Essais de traction après conservation à l'étude à une température de 55° pendant 48h.

Les essais de compression simple sont réalisés conformément à la norme ASTM D2166. Les principales étapes de préparation des échantillons sont :

1. Le matériau de base a été séché dans une étuve pendant 48 h à 55 °C pour s'assurer que leur teneur en eau initiale était nulle.
2. Mélange manuel du sable de dune avec le ciment (les différents pourcentages cités sont utilisés) jusqu'à l'obtention d'un matériau uniforme et homogène.
3. Une quantité spécifique de l'eau correspondant à la teneur en eau initiale souhaitée a été ajoutée au mélange sec sable de dune + ciment, puis on mélange à la main avec précaution pour obtenir un mélange homogène.
4. Stockage du mélange humide dans un sac en plastique scellé pendant 24 heures afin d'obtenir des conditions d'humidité uniformes.

Le matériau a été compacté statiquement dans un moule à double piston ( $D = 50$  mm,  $H = 100$  mm) à une vitesse de 1,27 mm/min.

Les échantillons sont compactés à différents degrés de saturation initiale du côté sec du l'OPM : OPM, OPM-2%, OPM-4%. Une quantité précise de mélange correspondant à la densité sèche souhaitée (105%, 102,5% et 100% de  $\gamma_{dmax}$ ) a été pesée, insérée dans le moule et compactée en une seule couche.

Après conservation à l'étuve pendant 48 h à 55 °C, les éprouvettes sont soumises à un effort de compression appliqué parallèlement à l'axe du cylindre à l'aide d'une presse CBR à une vitesse constante de 1,27 mm/mn jusqu'à la rupture, et on prend les lectures.

Les résultats présentés pour tous les essais réalisés dans cette étude correspondent à la lecture moyenne de trois éprouvettes.

Concernant les essais Proctor modifié (ASTM D1883), des éprouvettes cylindriques de 152 mm de diamètre et 116 mm de hauteur ont été utilisées.

### **III.4. Influence de traitement sur les caractéristiques de compactage**

#### **Essai Proctor Modifié (NF P 94 – 093) :**

L'essai a été réalisé selon la norme NF P 94-093. Il a pour but de déterminer la condition optimum 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 différentes teneurs en eau et à même niveau d'énergie de compactage (4540kj/m<sup>3</sup>).

Cette énergie est appliquée au sol en 5 couches de 55 coups de dames dans le moule CBR (sols dans les plus gros éléments ont un diamètre inférieur à 5mm). A chaque teneur en eau on utilise un nouvel échantillon de matériau pour déterminer la densité sèche maximale.

L'essai Proctor modifier a été effectué sur le sable de dune traité à différents dosages au ciment (6%, 9% et 12%). Ce type d'essai est considéré comme la référence de compactage des matériaux utilisés dans les terrassements routiers (sol support, remblai et couche de forme). Le but de ces essais est de mettre en évidence l'influence de dosage de produit de traitement sur les paramètres de compactage à savoir la teneur en eau optimale ( $w_{opt}$ ) et la densité sèche maximale ( $\gamma_{dmax}$ ). Les résultats de cet essai sont représentés dans la figure III-1.



PhotosIII-2:Appareillage de l'essai Proctor Modifié

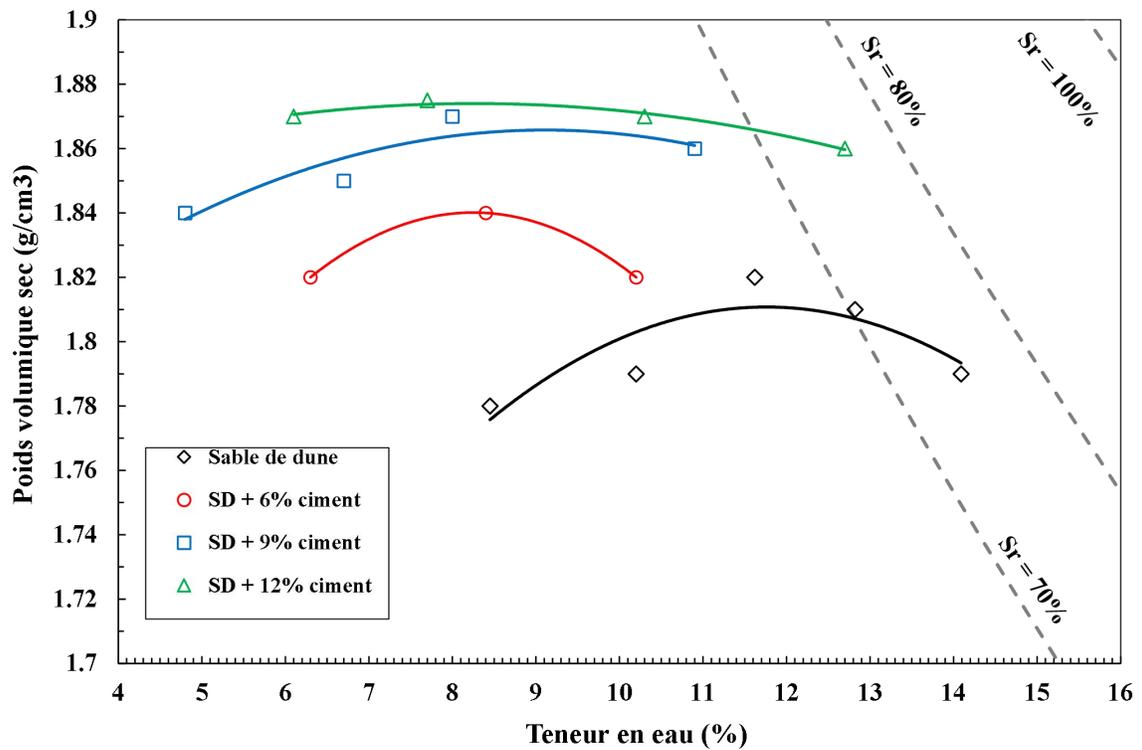
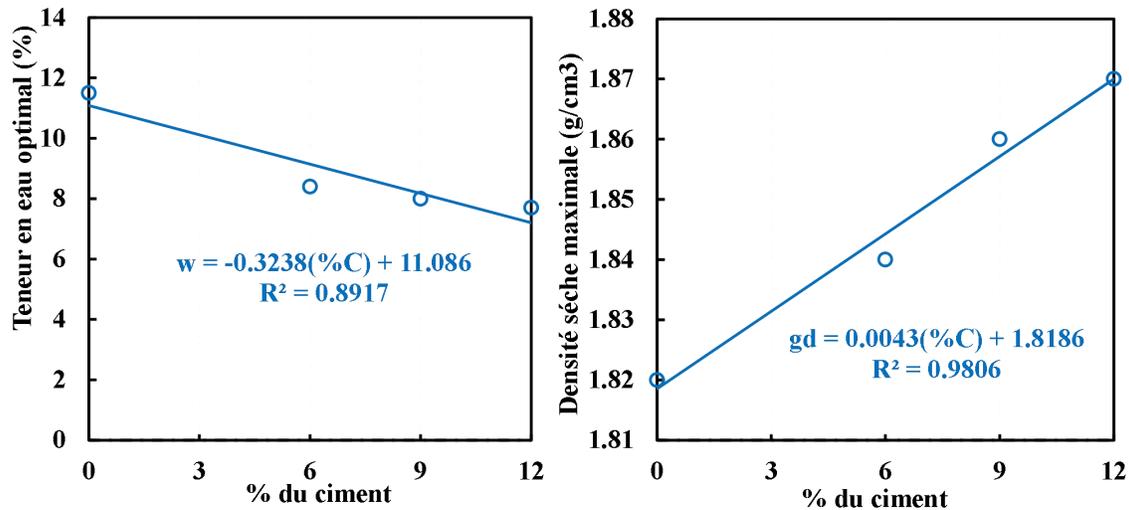


Figure III-1 : Courbe Proctor modifié de sable de dune traité au ciment



**Figure III-2** : Variation de la densité sèche maximale et de la teneur en eau optimale en fonction du pourcentage de ciment.

D'après la figure III-2, on remarque que plus qu'on ajoute le ciment, les courbes Proctor modifié se déplacent vers la gauche. Suite à l'ajout de ciment, 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 en eau.

L'influence de l'ajout de ciment sur les caractéristiques optimales déduites des courbes Proctor est présentée dans la figure III-1. Nous constatons que le traitement au ciment conduit à :

- Une augmentation linéaire de la densité sèche maximale suite à l'augmentation du pourcentage du ciment, elle dépasse de 1.82 g/cm<sup>3</sup> pour le matériau brut à 1.87g/cm<sup>3</sup> dans le cas du traitement avec 12% du ciment.
- Une diminution de la teneur en eau optimale, elle atteint 7.7% dans le cas de l'ajout 12% de ciment, soit une diminution de 30% par rapport au matériau brute. Cela est un avantage concernant le manque d'eau dans les régions sahariennes

Les formule de la variation de la densité sèche maximale et la teneur en eau optimale en fonction du pourcentage du ciment sont représentés dans la figure avec un bon coefficient de corrélation.

### III.5 Influence de traitement sur le comportement mécanique :

#### III .5.1 Essai CBR (L'indice portant californien CBR) (NF P 94-078) :

On distingue 2 types d'essais CBR en fonction des bus fixés :

- **L'essai C.B.R. immédiat** : Mesure de la résistance au poinçonnement d'un sol compacté à sa teneur en eau naturelle. Il caractérise l'aptitude du sol à permettre la circulation en phase de chantier. Dans la région peu humide, le C.B.R. immédiat sert directement de référence (pas de variation hydrique).
- **L'essai C.B.R. après immersion** : Mesure de la résistance au poinçonnement d'un sol compacté à différentes teneurs en eau puis immergé durant plusieurs heures (4 heures en générale). Il caractérise l'évolution de la portance d'un sol compacté à différentes teneur en eau et/ou soumis à des variations de régime hydrique.

L'essai consiste à placé dans un moule dans un état donné de densité et de teneur en eau. Il est ensuite poinçonné par un piston de 19,3 cm<sup>2</sup> de section, enfoncé à la vitesse constante de 1,27mm/min.

L'indice de portance ou CBR exprime en % le rapport entre les pressions produisant dans le même temps un enfoncement donné dans le sol étudié d'une part et dans un matériau type d'autre part.

#### III.5.2 Essai de compression simple :

Les Figures III.3.4.5 représente, pour tous les échantillons(sable de dune + ciment) compactés à différents degrés de saturation initiale (OPM, OPM-2%, OPM-4%) et à différents compacité (105%, 102,5% et 100%), les courbes de variation de la contrainte déviatori que en fonction des déformations axiales. La variation des résistances à la compression qui correspondent au pic des courbes sont présenté dans le figure III.5



**Photo III.3 :** Presse hydraulique



**Photo III.4:**épreuve confectionnée

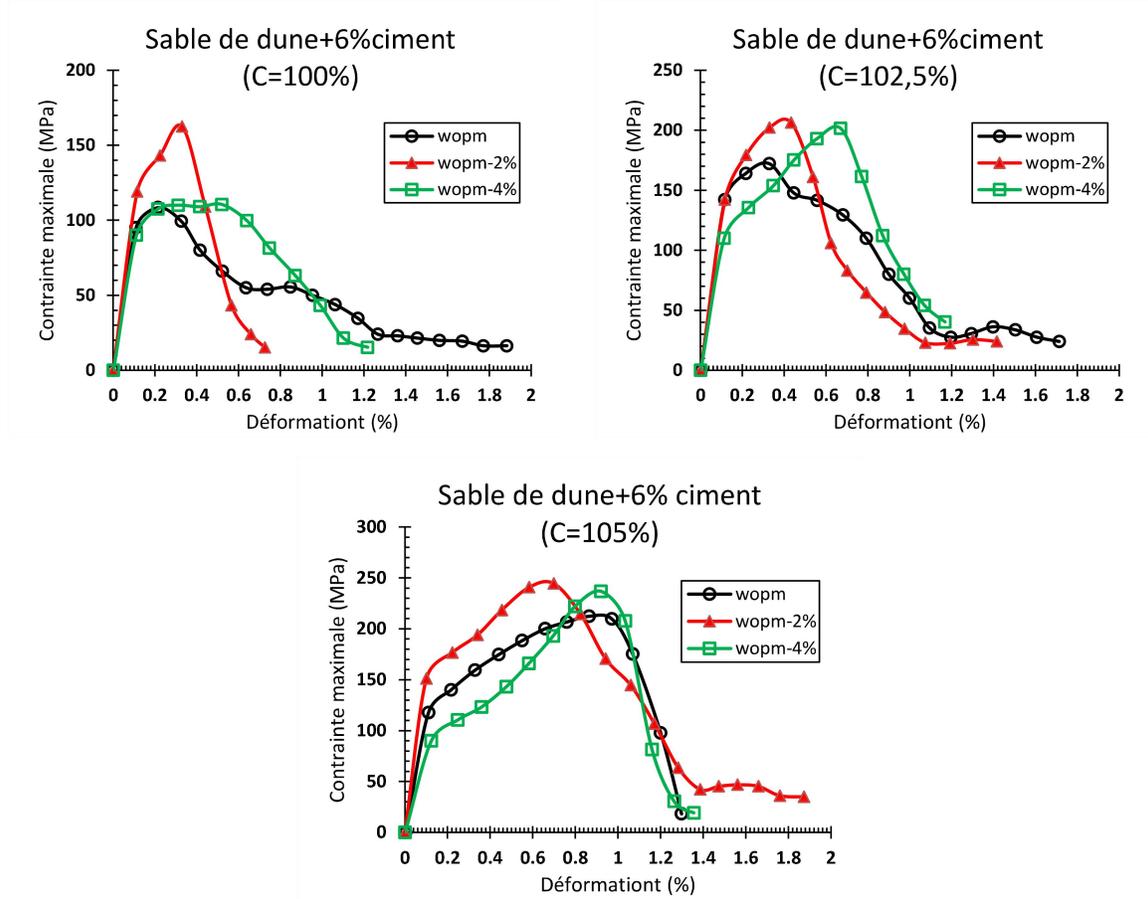


**Photo III.5:** éprouvettes cylindriques après conservation.

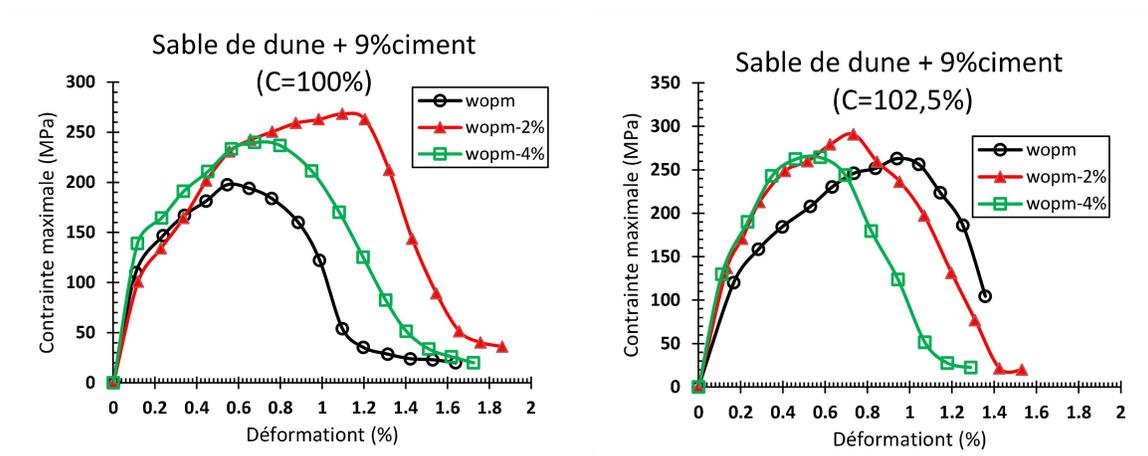
D'après ces résultats, on remarque que :

- La contrainte augmente avec la déformation axiale jusqu'à atteindre un pic, ensuite elle diminue progressivement ;
- La contrainte axiale maximale  $\sigma_{\max}$  augmente avec le pourcentage des liants ajoutés ;
- Pour le même pourcentage du ciment, la résistance à la compression augmente avec la compacité ;

- Généralement la meilleur résistance atteint pour une teneur en eau égale à OPM-2%.



**Figure III.3:** Courbes contrainte-déformation de sable de dune traité à 6% ciment pour les compacités théorique de (100%, 102,5% et 105%).



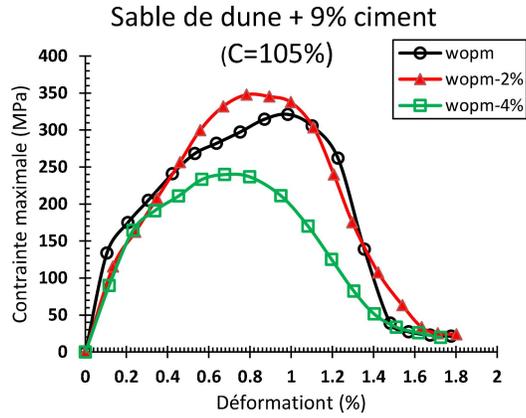


Figure III.4 Courbes contrainte-déformation de sable de dune traité à 9% ciment pour les compacités théorique de (100%, 102,5% et 105%).

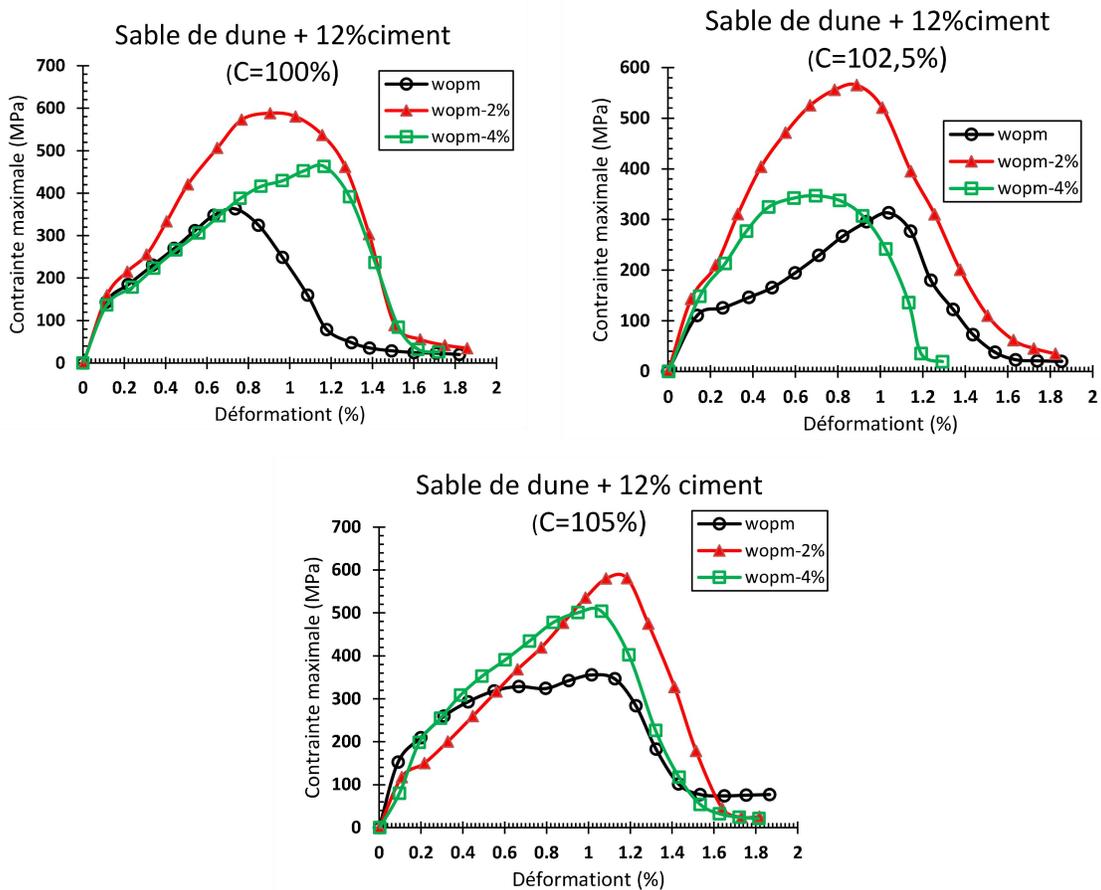


Figure III.5: Courbes contrainte-déformation de sable de dune traité à 12% ciment pour les compacités théorique de (100%, 102,5% et 105%).

### III.5.3 Essai de traction :

Cet essai est effectué sur des éprouvettes cylindriques standardisées (NF P 98-230-2, 1993b). À l'aide de deux plateaux, une force est appliquée le long de deux génératrices diamétralement opposées. Les dimensions des éprouvettes sont de 50 mm de diamètre et 50 mm de longueur (Photo III.7). Cet essai est réalisé sur tous les mélanges (sable de dune + ciment) et pour tous les degrés de saturation initiale (OPM, OPM-2%, OPM-4%) et les différents compacité (105%, 102,5% et 100%).

Le mélange est compacté statiquement à l'OPM ( $v=1,27$  mm/min) dans un moule à double piston permettant d'homogénéiser la contrainte sur toute la hauteur de l'éprouvette. La méthode de préparation des éprouvettes est la même de celle de l'essai de compression simple.

La force est appliquée progressivement jusqu'à la rupture de l'échantillon, permettant ainsi de déterminer la résistance à la traction  $R_t$ . La formule de la résistance à la traction par fendage est la suivante :

$$R_t = 2F / \pi D l$$

Où :

- $R_t$  : Résistance à la traction
- $l$  : Longueur de l'éprouvette
- $F$  : Pression axiale (presse hydraulique)
- $D$  : Diamètre de l'éprouvette

La variation des résistances à la traction en fonction des dosages du ciment, les compacités et les teneurs en eau initiales, est présenté dans le tableau III.3



*Photo III. 6 : Epreuve de traction*

**Tableau III.3.** Résistance à la traction en fonction du dosage au ciment et la compacité

	100% $\gamma_{dmax}$			102,5% $\gamma_{dmax}$			105% $\gamma_{dmax}$		
	OPM	OPM- 2%	OPM- 4%	OPM	OPM- 2%	OPM- 4%	OPM	OPM- 2%	OPM- 4%
6% ciment	0. 499	0.626	0. 588	0. 535	0. 489	0. 496	0. 496	0. 585	0. 885
9% ciment	0. 670	0. 789	0. 853	0. 603	0.484	0.718	1.322	1.319	1.946
12% ciment	1.182	1.258	1.222	1.281	1.29	1.1006	1.378	1.243	0. 866

Les résultats obtenus montrent que la résistance à la traction est améliorée considérablement suite au traitement, la résistance augmente avec le dosage du ciment. Le traitement de notre échantillon avec 12% de ciment acquiert la bonne résistance à la traction avec un gain dépasse 170% par rapport au matériau sans traitement dans le cas de la compacité égale à 105%.

**III.6. Conclusion**

Dans ce dernier chapitre nous avons vu l'influence de la teneur en eau l'énergie de compactage, sur les caractéristiques de compactage, la résistance à la compression et à la traction.

Dans cette étude, nous avons vu que le traitement au ciment conduit à une augmentation de la densité sèche maximale et diminution de la teneur en eau optimale. Une étude de l'effet du traitement au ciment sur les propriétés mécaniques a montré que la résistance à la compression et à la traction augmente significativement suite au pourcentage du ciment ajouté. La meilleure résistance atteint pour une teneur en eau égale à OPM-2% et la compacité influe directement et positivement sur cette résistance.

### Conclusion générale

Les régions sahariennes manquent souvent de matériaux de construction traditionnels comme les granulats. Notre étude vise à valoriser les matériaux locaux pour étendre leur utilisation dans les techniques routières sahariennes.

Le sable du désert a longtemps été un matériau injustement décrié. Il ne faut pas s'attendre à ce que l'utilisation de ce matériau dans la technologie des routes du désert. En effet, cette utilisation n'est qu'un petit aspect de cette technologie, et il n'est pas question de remplacer le sable du désert par du gravier, ce dernier ayant de bien meilleures propriétés pour la réalisation de mélanges hydrocarbonés et hydrauliques. Toutefois, dans les régions où le gravier fait défaut et où le sable approprié est abondant, il peut y avoir un avantage économique à l'utiliser.

Dans l'étude d'identification, nous avons vu que l'utilisation en corps de chaussée de sable de dune à l'état brut est impossible car certaines caractéristiques ne répondent pas aux exigences des différentes spécifications citées.

Les résultats obtenus à partir de l'étude de comportement mécanique de sable de dune traité au ciment nous a permis de retenir que:

- Une augmentation de la densité sèche maximale et diminution de la teneur en eau optimale.
- Une augmentation de la résistance à la compression, elle est significative pour un faible pourcentage du ciment.
- Pour le même pourcentage du ciment, la résistance à la compression augmente avec la compacité ;
- Généralement la meilleure résistance atteinte pour une teneur en eau égale à OPM-2%.

## **Conclusion générale**

---

### **Les Recommandations:**

On se rend compte à l'issue de ce travail que les paramètres à maîtriser sont nombreux.

Comme perspective, il serait intéressant de poursuivre des plans d'expériences visant l'amélioration des performances mécaniques de sable de dune.

Par conséquent, il est plus nécessaire que des études complémentaires pour de plus grandes proportions de ciment. Il peut également être traité avec différents types de liants.

### Référence bibliographique :

- Abdelghani Inal (1980).** Route en milieu désertique. IV conférence routière africaine.
- Améraoui, Z., (2002).** Les tufs d'encroûtements, utilisation dans la géotechnique routière. Thèse de magistère, Ecole Nationale Polytechnique, Alger
- Ben Dhia, M. H. (1983).** Les tufs et encroûtements calcaires dans la construction routière. Thèse de doctorat, Université de Paris VI
- 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 - 213 - janvier-février 1998 - réf. 4159 - pp33-42.
- Boularek, M., (1989).** Mode de construction et contrôle des routes sahariennes. Rencontre Maghrébine sur les techniques routières, Tunis, 20-23 nov.
- Cherrak, M., Morsli, M., Boutemur, R., and Bali, A. (2015).** Valorization of the use of calcareous tuff and dune sand in Saharan road design. Journal of Civil Engineering and Architecture 9 (2015) 665-676, 4, 5.
- CTTP (2001).** Catalogue de Dimensionnement des Chaussées neuves. Organisme National de Contrôle Technique des Travaux Publics, Algérie.
- Daheur E.G., Goual, I., et Mitiche-Kettab R. (2015b).** Amélioration du comportement mécanique de tuf saharien par un traitement aux liants hydrauliques ou organique. 13th Arab Structural Engineering Conference, University of Blida 1, December 13-15, 2015. ALGERIA
- Daheur Elhadj Guesmia (2019),** Comportement d'un mélange Tuf-Sable de dune sous sollicitations monotones et cycliques ,Thèse de doctorat en science, Ecole Nationale Polytechnique ,p22 à 30.
- Domec, M., Alloul, B., (1980).** Construction des chaussées au Sahara. Rapport technique **D.JEUFFROY, R.SAUTEREY** :«Dimensionnement des chaussées», Presses de l'école nationale des ponts et chaussées, 2ème édition, 1991.du Laboratoire central des travaux publics, Alger.
- D.T.NGUYEN, (2006):**«Prédiction des déformations permanentes des couches de surface des chaussées bitumineuses», Thèse Doct. L'école nationale des ponts et chaussées, Spécialité : Structures et Matériaux.

**Fenzy, E., (1966).** Particularité de la technique routière au Sahara. Revue générale des routes et aéroports, N° 411, p. 57-71.

**Gandil P. (1988).** Cours de routes, ENPC, 1988.

**Goual, I., Goual, M.S., Taibi, S. and Abou-Bekr, N. (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, Vol. 16, No. 6, pp. 744–763

**GTR (1992).** Réalisation des remblais et des couches de forme. Guide technique, LCPCSETRA, 204 p .

**Inal A. (1980).** Route en milieu désertique. IVème Conférence routière Africaine, Nairobi, 20-25jan.

**KettabRatiba.** Contribution à la valorisation du sable de dunes. Thèse de doctorat d'état, Ecole nationale polytechnique, Alger 2007.

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

**Morsli, M., Bali, A., Fleureau, J. M., (2001).** Particularité de la technique routière Saharienne. III ème Congrès Algérien de la Route, Alger.

**Morsli, M. (2007).** Contribution à la valorisation des tufs d'encroûtement en technique routière saharienne. Thèse de doctorat, école Nationale Polytechnique, Alger.

**NFP 18-598 :** équivalent de sable, granulats, Norme Française, , octobre 1991.

**NF P 94-050;** Norme française; détermination de la teneur en eau.

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

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

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

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

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

## Référence et bibliographique

---

**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.

la norme NF P 98-080-1 et la norme NA 5365)

**Touati Tliba M.B.** (1994). Particularité de dimensionnement des chaussées dans le contexte saharien. 2<sup>ème</sup> séminaire : les techniques routières sahariennes, Mémoire master, université de Beni Abbès.8



## ترخيص بإيداع مذكرة الماستر

بعد الاطلاع على التصحيحات المطلوبة على محتوى المذكرة المنجزة من طرف:

الطالب(ة): زرويل مريم و موساوي فاطمة الزهرة

الشعبة: هندسة مدنية

التخصص: هياكل

نحن الأساتذة:

الإمضاء	الصفة	الرتبة والجامعة الأصلية أو المؤسسة	الإسم واللقب
	رئيس	أستاذ محاضر ب (جامعة غرداية)	دمدوم عبد الله
	ممتحن	أستاذ محاضر ب (جامعة غرداية)	نسيل عبد الحميد
	مؤطر	أستاذ محاضر أ (جامعة غرداية)	ظاهر الحاج قسبية

نرخص بإيداع النسخة النهائية لمذكرة الماستر بعنوان:

**Influence de la compacité et de la teneur en eau de compactage sur comportement  
mécanique d'un sable de dune traité au ciment**

