

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique Et Populaire
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère 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 الهندسة المدنية والري

Département de génie civil et hydraulique

Mémoire de fin d'étude, en vue de l'obtention du diplôme

Master

Domaine : sciences et technologies

Filière : Génie civil

Spécialité : Structure

Thème

**L'influence de l'ajout de sable de dune sur les caractéristiques physiques et mécaniques du tuf dans le domaine routier
(la région de Ghardaïa)**

Présenté par :

BEN SAHA ABD EL RAZAK

BEN SAHA MOHAMED AMINE

Encadré par :

Mr. NESSIL Hamid

Année universitaire 2024/2025

Remerciement

Tout d'abord, Nous tenons à remercier mon encadreur

Monsieur NESSIL Hamid

, pour son soutien et sa confiance durant la

période de préparation de ce mémoire ;

Nous exprimons notre sincère gratitude.

Nous tenons également à remercier

les membres du jury qui nous feront

l'honprésidé et d'examiner ce modeste travail.

Nous remercions nos enseignants de l'université de Ghardaïa

Nous tenons sincères remerciements

l'ensemble de Laboratoire des travaux publics

du sud, wilaya de GHARDAIA, pour leur aide de ce travail.

Enfin, à tous ceux qui nous ont aidés de près ou

de loin à réaliser ce travail.

اهداء

"وآخر دعواهم أن الحمد لله رب العالمين"

الحمد لله الذي ما تم جهد ولا ختم سعي الا بفضلة وما تخطى العبد من عقبات وصعوبات الا بتوفيقه ومعونته

اهدي تمرة جهدي وفرحة تخرجني

الى من وهبتي الحياة والامل..... أمي الغالية

الى من سندي في هذه الدراسة..... أبي الغالي

الى سndي وفخري..... أخواتي

الى من رافقني ونحن نشق الطريق معا نحو النجاح الى رفيق دربي لمين بن ساحة.

وأخيرا الى عائلتي وجميع أصدقائي وكل من ساعدهني من قريب او بعيد في اتمام هذه الدراسة

سائلا المولى عز وجل أن يجزي الجميع خير الجزاء في الدنيا والآخرة.

عبد الرزاق بن ساحة

اهداء

الحمد لله الذي وفقني ونور قلبي بالعلم والمعرفة فيارب لك الحمد كما ينبغي لجلال وجهك وعظيم سلطانك وصلى الله على خير الانام نبينا محمد عليه افضل الصلاة و السلام .

اهذى ثمرة جهدي المتواضعة الى من قال فيهما الله تعالى " و خفض لهم جناح الذل من الرحمة وقل ربي ارحمهما كما رباني صغيرا "

أمي الغالية - أبي الغالي

الى اخوتي الاحباء

الى رفيق دربي و مشواري الدراسي أخي عبد الرزاق متمني له التوفيق والصحة والعافية

الى كل عائلتي و اصدقائي ورفقاء الدراسة واساتذتي الكرام.

والى كل من بدل معي جهدا، ووفر لي وقتا، ونصح لي قوله اسال الله ان يجزيهم عن خير الجزاء

الى كل من ذكرهم قلبي ونسيهم قلمي.

الى دفعة 2025

طين بن ساحة

Notation bibliographique

papp: Masse volumique apparente

pabs: Masse volumique absolue

dm : diamètre maximale de tamis

dc : diamètre minimale de tamis

Ri : Refus cumulé dans le tamis « i »

Ti : Tamisât cumuler dans le tamis « i »

LCPC : Laboratoire Centrale des Ponts et chaussées

Cu : Coefficient d'uniformité ou Coefficient de HAZEN

CC : Coefficient de courbure

WP : Limite de plasticité

WL : Limite de liquidité

Ip : Indice de plasticité

VBS : Valeur au bleu de méthylène

ESv : Valeur de l'équivalent de sable visuel

ESP : Equivalent de sable au piston

Wopt : La teneur en eau optimale

γd max: La densité sèche maximale

IPI : L'indice Portant Immédiat de CBR

LA : Coefficient Los Angeles du matériau

PL : Poids Lourds

RC : Résistance a la compression

GTR : Guide Technique Routier

LTPS : Laboratoire des Travaux Publics du Sud

W : pourcentage La teneur en eau

ES : Equivalent de sable (%)

TRS : Technique routière saharienne

Sommaire

Sommaire

Introduction Générale : 1

Chapitre I : Caractéristiques géotechniques de sable de dunes

I.1. Introduction	3
I.2.1 Sable	3
I.2.2 Sable de dune :.....	3
I.3. Différentes formes des dunes [3].....	4
I.3.1 Dune de barkhane :	4
I.3.2 La dune parabolique	4
I.3.3 Les dunes en étoile	5
I.3.4 Les dunes transversales	6
I.3.5 Les dunes longitudinales	6
I.4. Formation des sables de dunes :	7
I.5. Caractéristique des sables de dunes du Sahara [5]	7
I.6. Classification des sables :.....	8
I.7. Utilisation du sable de dunes dans le domaine routier	9
I.8. Mode de construction des routes au Sahara	9
Conclusion	11

Chapitre II : Caractéristiques géotechniques de tuf

I.1. Introduction	12
I.2. Définition de tuf [7]	12
I.2.1. Les tufs dans le monde	13
I.2.3. Catégories des tufs	14
I.3. Classification des encroûtements calcaires	18
I.3.1. Classification selon la teneur en carbonate de calcium (CaCO ₃)	18
I.3.2. Evolution des encroûtements calcaires	19
I.4. Utilisation des calcaires en constructions routière:	20
I.5. Les mélanges de tuf et d'un autre granulat	22
I.5.1. Introduction	22
I.5.2. Tufts – Sable de dunes.....	23
I.5.3. Tufts – Sables – Bitume.....	23

I.6. Essais géotechniques réalisés sur les tufs	24
I.6.1. Analyse granulométrique.....	24
I.6.2. Mesure de la pollution argileuse	24
I.6.3. Essai Proctor	25
I.6.4. Essai CBR	26
I.6.5. Essai de résistance à la compression simple.....	26
I.6.6. Résistance aux chocs et à l'abrasion	26
Conclusion	27

CHAPITRE III : Identification des matériaux utilisés

I.1. Introduction	28
I.2. Zone d'Etude	28
I.3. Localisation des sites de prélèvement des matériaux utilisés	29
I.4 Programme des essais	30
I.5. Essais d'identification	31
I.5.1. Analyse chimique	31
I.5.2. Analyse granulométrique	35
I.5.3. L'équivalent de sable [12]	38
I.5.4 Essai de compactage et de portance	40
I.5.5. Essai compression simple	43
I.6. Classification GTR (Guide Technique Routier)	47
Conclusion	48

CHAPITRE IV : Etude des mélanges : tuf + sable de dunes

I.1 Introduction.....	49
I.2. Essai Proctor modifié	50
I.2.1. Tracé des courbes Proctor modifiés	50
I.3. Essai à la compression simple :	54
I.3.1 Influence sur la Résistance à la compression simple	54
I.4. Résumé de l'étude des mélanges : tuf + sable de dunes	56
Conclusion	56
Conclusion générale	57

Sommaire Des Figures

Chapitre I : Caractéristiques géotechniques de sable de dunes

Figure I.1: Sable de dunes.....	4
Figure I.2: Dune barkhane.....	4
Figure I.3: Dune parabolique.....	5
Figure I.4: Dune en étoile.....	5
Figure I.5: Dune transversale.....	6
Figure I.6: Dune longitudinale.....	6
Figure I.7 : Coupe transversale type d'une chaussée saharienne.....	8

Chapitre II : Caractéristiques géotechniques de tuf

Figure II.1: Tuf [8]	12
Figure II.2: Répartition des encroûtements calcaires dans le monde.....	13
Figure II.3: Schéma du circuit de la formation des tufs calcaires.....	15
Figure II.4: Profil d'un encroûtement gypseux.....	17
Figure II.5: Classification des encroûtements calcaires à partir du processus pédologique (encroûtement mûr). [9]	19

CHAPITRE III : Identification des matériaux utilisés

Figure III.1 : Situation géographique de la wilaya de Ghardaïa [18]	29
Figure III.2: Localisation de sable de dune Metlili (photo Google Earth)	29
Figure III.3 : Localisation de la carrière de tuf (photo Google Earth)	30
Figure III.4 : Echantillon de Sable de dune.....	31
Figure III.5 : Echantillon de Tuf.....	32
Figure III.6: Etapes de l'essai la Masse volumique apparente.....	33
Figure III.7: Etapes de l'essai la Masse volumique absolue.....	34
Figure III.8 : Tamiseuse manuelle.....	36
Figure III.9: Mesure de l'essai équivalent sable.....	39
Figure III.10: Matériel nécessaire de Proctor Modifié.....	40
Figure. III.11: Presse CBR.....	42
Figure. III.12: Moulages des éprouvettes en sable de dune et de tuf compactés dans le moule de Proctor Modifie.....	43

Figure. III.13: Démoulages des éprouvettes de sable de dune compactés dans le moule de Proctor Modifie.....	44
Figure. III.14: Démoulages des éprouvettes de tuf compactés dans le moule de Proctor Modifie.....	44
Figure. III.15: Machine de la compression simple.....	45
Figure. III.16: Conservations des éprouvettes à l'étuve.....	45
Figure. III.17: l'écrasement des éprouvettes.....	46

CHAPITRE IV : Etude des mélanges : tuf + sable de dunes

Figure IV.1: Organigramme de recherche d'une formulation optimale.....	49
Figure IV.2: Courbe Proctor Modifiée (90 % de tuf +10 % de sable de dunes)	51
Figure IV.3: Courbe Proctor Modifiée (80 % de tuf +20 % de sable de dunes)	51
Figure IV.4: Courbe Proctor Modifiée (70 % de tuf +30 % de sable de dunes)	52
Figure IV.5: Courbe Proctor Modifiée (100 % de sable de dunes)	52
Figure IV.6: Courbe Proctor Modifiée (100 % de Tuf)	53
Figure IV.7: Variation de la densité sèche en fonction du pourcentage de sable de dunes....	54
Figure IV.8 : la résistance à la compression en fonction de pourcentage de sable de dunes...	55

Sommaire Des Tableaux

Chapitre I : Caractéristiques géotechniques de sable de dunes

Tableau I.1 : Classification Des Sables Par Tamis..... 8

Chapitre II : Caractéristiques géotechniques de tuf

Tableau II.1 : Classification des encroûtements calcaires [9]19

Tableau II.2 : Critères d'utilisation des tufs calcaires en couche de fondation en Algérie [12]
.....21

Tableau II.3 : Critères d'utilisation des tufs calcaires en couche de base en Algérie [12]....21

Tableau II.4 : Critères d'utilisation des tufs calcaires en remblais en Algérie [12]..... 22

CHAPITRE III : Identification des matériaux utilisés

Tableau III.1 : Programmes des Essais pour l'Identification des matériaux Utilisés.....30

Tableau III.2: Analyse chimique du sable de dune étudié.....31

Tableau III.3: Analyse chimique du tuf étudié.....32

Tableau III.4: Résultats de la masse volumique apparente et absolue.....34

Tableau III.5: Résultats de l'analyse granulométrique de sable de dunes.....37

Tableau III.6: Résultats de l'analyse granulométrique de tuf.....37

Tableau III.7: Résultat d'équivalent de sable de dune.....39

Tableau III.8: Spécification d'ES pour la construction des chaussées.....39

Tableau III.9 : Caractéristiques de compactage pour quelques matériaux routiers.....41

Tableau III.10 : Résultat de l'essai compression simple de tuf.....47

Tableau III.11 : Classification GTR de tuf et de sable de dunes.....47

CHAPITRE IV : Etude des mélanges : tuf + sable de dunes

Tableau IV.1: Résultat Proctor Modifié (90 % de tuf +10 % de sable de dunes)50

Tableau IV.2: Résultat Proctor Modifié (80 % de tuf +20 % de sable de dunes)51

Tableau IV.3: Résultat Proctor Modifié (70 % de tuf +30 % de sable de dunes).....52

Tableau IV.4: Résultat Proctor Modifié (100 % de sable de dunes).....52

Tableau IV.5: Résultat Proctor Modifié (100 % de Tuf).....53

Tableau IV.6: Influence de l'ajout de sable de dunes sur la densité sèche γ_{dmax} et la teneur en eau Wopt.....53

Tableau IV.7: Influence de l'ajout de sable de dunes sur à la compression simple.....54

Tableau IV.9: Influence du Pourcentage de sable de dunes sur les propriétés physicomécaniques.....	56
---	----

ملخص الدراسة

Résumé :

La construction des routes est principalement basée sur l'utilisation de matières premières (tuf, bitume ...etc.) devant être en conformité avec les normes, assurant par suite une bonne qualité. Certaines régions du monde, souffrent du problème de manque de matières premières utilisées pour la construction de routes notamment les régions sahariennes de Algérie, d'où le besoin de déplacement sur de longues distances, ce qui influe défavorablement sur le cout du les décideurs et les spécialistes ont cherché des alternatives efficaces projet. Pour cette raison et économiques. Le sable de dunes, vu son abondance ; peut-être considérer comme la plus importante de ces alternatives.

Cette étude est une initiation d'une recherche menée sur la caractérisation des gisements de la région de Ghardaïa en vue de leur utilisation en technique routière, et de valoriser les matériaux locaux si nécessaire. Le travail expérimental a permis d'obtenir les meilleures caractéristiques des propriétés physiques et mécaniques de l'optimal Proctor Modifié à partir des pourcentages des mélanges tuf -sable des dunes.

L'objectif de cette étude est de faire une recherche bibliographique et travail expérimental sur l'utilisation du sable de dunes en technique routière, en vue de fournir aux futurs travaux expérimentaux sur ce sujet une base documentaire, qui leurs permettent une bonne exploitation de sable de dunes dans la construction des routes de manière à avoir de bonne performance mécanique.

Mots clé : *Tuf, Sable de dunes, mélange de Tuf-Sable de dunes*

Abstract:

Road construction is mainly based on the use of raw materials (tuff, bitumen, etc.) that must comply with standards, thus ensuring good quality. Some regions of the world suffer from the problem of lack of raw materials used for road construction, particularly the Saharan regions of Algeria, hence the need to travel long distances, which adversely affects the cost of the project. Decision-makers and specialists have sought effective and economical alternatives. Dune sand, given its abundance; can perhaps be considered the most important of these alternatives.

This study is an initiation of a research carried out on the characterization of the deposits of the Ghardaïa region with a view to their use in road technology, and to enhance local materials if necessary. The experimental work made it possible to obtain the best characteristics of the physical and mechanical properties of the optimal Modified Proctor from the percentages of the tuff-sand mixtures of the dunes.

The objective of this study is to carry out a bibliographic research and experimental work on the use of dune sand in road engineering, with a view to providing future experimental work on this subject with a documentary basis, which will enable them to make good use of dune sand in road construction in order to have good mechanical performance.

Key words: tuff, dune sand, tuff-sand mixtures of the dunes.

ملخص:

يعتمد بناء الطرق بشكل أساسى على استخدام مواد خام (مثل التوف والزفت...) المطابقة للمعايير، مما يضمن جودة عالية. تعانى بعض مناطق العالم من مشكلة نقص المواد الخام المستخدمة في إنجاز الطرق، وخاصةً المناطق الصحراوية في الجزائر، مما يتطلب قطع مسافات طويلة، مما يؤثر سلباً على تكلفة المشروع. وقد بحث صانعو القرار والمتخصصون عن بدائل فعالة واقتصادية، حيث أن وفرة رمال الكثبان تعتبر من أهم هذه البدائل.

هذا البحث هو بداية لدراسة خصائص المواد المحلية المتوفرة في منطقة غرب داية المستخدمة في إنجاز الطرق. كما يعتبر العمل التجاربي السبيل الانجع لايجاد خلائط من التوف وورمال الكثبان بنسب معينة للحصول على أفضل الخصائص الفيزيائية والميكانيكية.

تهدف هذه الدراسة إلى إجراء بحثٍ تعريفيٍّ وعمل تجارب حول استخدام رمل الكثبان في إنجاز الطرق، بهدف توفير قاعدةٍ وثائقيةٍ لأعمالٍ تجريبيةٍ مستقبليةٍ حول هذا الموضوع، التي تمكنها من استغلال رمل الكثبان على النحو الأمثل في إنجاز هذه الطرق وتحقيق مقاومةً جيدة.

الكلمات المفتاحية: التوف رمل الكثبان، خلائط من التوف وورمال الكثبان.

Introduction Générale

Introduction Générale

Introduction Générale :

Le développement des infrastructures routières à travers le monde, plus particulièrement en Algérie, a créé un besoin immense en matériaux de chaussées, qui doivent répondre rigoureusement à certains critères géotechniques tels que : la dureté, la propreté, la granulométrie, etc.

La construction routière au Sahara est devenue un besoin actuel, urgent et de plus en plus important. Les ingénieurs et les techniciens routiers sont confrontés à de nombreux problèmes dans la conception de ces routes. Le plus éminent de ces problèmes est l'indisponibilité de matériaux classique dans ces régions. Cela nécessiterait soit d'importer ces matériaux, ce qui augmente le coût de la construction, ou la mise à niveau des matériaux locaux.

L'immense étendue désertique de l'Algérie recèle des quantités inestimables de sable de dune. Ce sable de dune est le seul matériau local des régions du grand sud algérien qui est resté très longtemps marginalisé. Actuellement, de grands efforts sont consentis afin de valoriser le sable de dune et notre travail s'inscrit dans ce cadre.

Le tuf et le sable de dunes sont des ressources naturelles disponibles en grande quantité dans la wilaya de Ghardaïa (Sud-Est de l'Algérie). Le tuf est largement utilisé en construction routière saharienne, contrairement au sable de dune qui est écarté dans ce domaine en raison de ses faibles performances mécaniques.

La nécessité d'améliorer ces performances mécaniques (stabilités, compacité, résistances à la compression et à la traction) avec des liants hydrocarbonés (bitumes purs, fluidifiés) ou hydrauliques (ciment), ou les mélanges avec d'autres matériaux riches en fine est l'une des solutions les plus appropriées pour leurs intégrations dans le domaine de la construction des routes.

Notre recherche vise à améliorer certaines caractéristiques de tuf de la région de Ghardaïa par l'association de sable de dune. Cette idée peut s'avérer très intéressante d'un point de vue économique et environnemental.

Dans ce sujet on va étudier les caractéristiques du tuf de la carrière de **Bouhraoua** et sable de dune de **Metlili** vu leur disponibilité, et la possibilité de les utiliser dans la construction routière.

Introduction Générale

Notre travail est travail en deux parties principales, la partie théorique et la partie pratique.

Le **premier** et **second** chapitre (théorique), sont consacrés à la présentation des travaux de recherche, une synthèse sur les caractéristiques géotechniques du tuf et du sables des dunes (définition, formulation, caractéristique, utilisation dans le domaine routier ...etc).

Dans le **troisième** chapitre (pratique), nous avons déterminé les caractéristiques mécaniques des matériaux utilisés (tuf, sable des dunes), particulièrement sur l'essai Proctor Modifié et essai CBR, essai compression. Nous avons terminé ce chapitre par la présentation des résultats expérimentaux relatifs aux matériaux locaux.

Le **quatrième** chapitre aborde les résultats de Proctor Modifié, CBR et essai de compression simple concernant les mélanges à différents pourcentages de tuf et sable de dunes, dont le but de valoriser les matériaux locaux utilisés, qui s'est déroulé dans le Laboratoire des Travaux Public du Sud (LTPS).

L'objectif est de choisir un mélange optimal sable de dune - tuf qui présente les meilleures caractéristiques mécaniques.

Enfin, le travail est clôturé par une conclusion générale qui rassemble les principaux résultats trouvés avec une proposition de suggestion qui nous semble utiles pour d'éventuelles recherches futures portant sur ce domaine.

CHAPITRE I

Caractéristiques géotechniques de sable de dunes

I.1. Introduction :

Le sable des dunes est l'un des matériaux les plus répandus dans notre pays et se trouve dans différentes régions du désert avec des caractéristiques différentes. Cependant, son utilisation comme matériau de construction est limitée. De nombreux chercheurs ont donc cherché à étudier ce matériau et à l'inclure dans les systèmes de construction. Dans ce chapitre, nous discuterons de cet article, de ses caractéristiques et de son utilisation [1].

I.2 Définition de sable de dune :

I.2.1 Sable :

Le sable est un matériau granulaire naturel constitué de particules de roche fragmentées définies en taille comme le matériau avec des grains plus petits que le gravier et plus gros que le limon. Le sable se trouve dans la nature dans plusieurs régions, telles que les plages, les baies, les grottes de sable et le désert. La composition du sable varie en fonction des sources et des conditions des constituants rocheux locaux, mais le composant le plus courant dans les régions côtières continentales intérieures et non tropicales est la silice (dioxyde de silicium, ou SiO_2) qui se présente généralement sous la forme de quartz, et le carbonate de calcium est le deuxième type de composant sableux le plus courant tel que le métal argon et qui s'est formé au cours du dernier demi-milliard d'années. Le sable est une ressource naturelle non renouvelable et est fréquemment utilisé dans la fabrication du béton [2].

I.2.2 Sable de dune :

Le sable des dunes est le résultant d'une érosion et d'une sédimentation des différentes roches suivie d'un transport fluviatile et parfois éolienne. La plus grande partie des formations sableuses est généralement constituée de quartz. Il est caractérisé par une granulométrie fine.

Dans une autre signification le sable de dune qui s'impose du fait de son abondance dans la nature (Sahara), de son coût d'extraction presque nul, et de sa propreté apparente, constitue la solution au problème d'épuisement des ressources naturelles et se présente comme un matériau d'avenir [3].



Figure I.1: Sable de dunes

I.3. Différentes formes des dunes [3] :

I.3.1 Dune de barkhane :

Ces dunes sont des dunes d'accumulation, édifiées en terrain plat, mobiles, en forme de croissant dont la convexité est tournée au vent. Elles peuvent atteindre une taille de 300 m et s'assembler pour former des formes complexes.

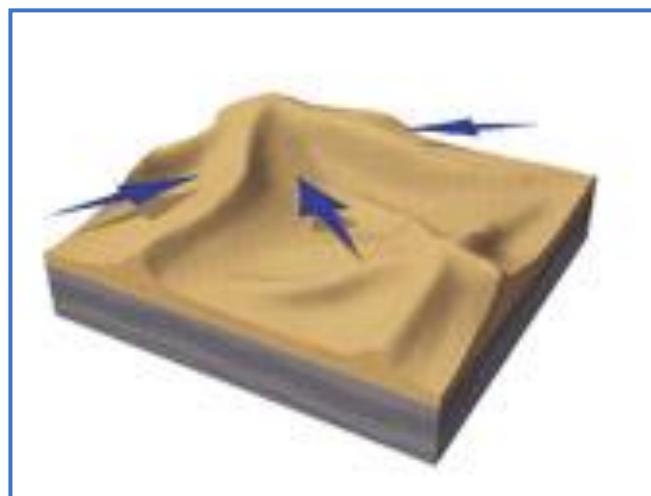


Figure I.2: Dune barkhane

I.3.2 La dune parabolique :

Une dune dissymétrique en forme de fer à cheval à concavité au vent souvent plus ou moins fixée par la végétation. Sa disposition par rapport à la direction du vent est donc inverse de celle de la barkhane. La dune parabolique est peu mobile et généralement ne migre guère une fois qu'elle est formée.

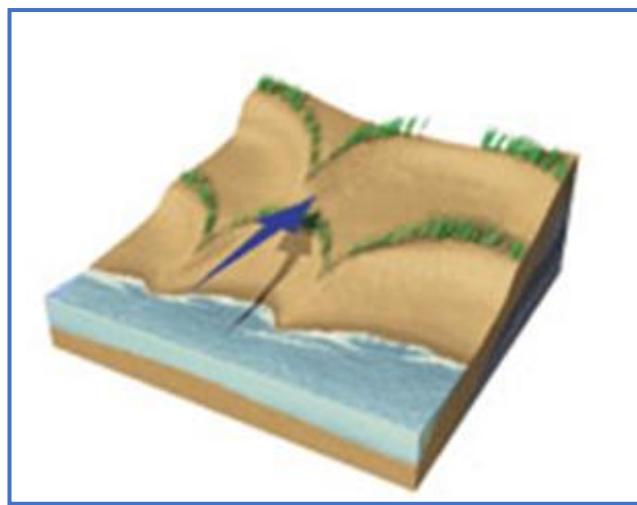


Figure I.3: Dune parabolique

I.3.3 Les dunes en étoile :

Immobiles se rencontrent dans les clairières des forêts de pins et seraient dues à un des équilibres dans le système des vents.

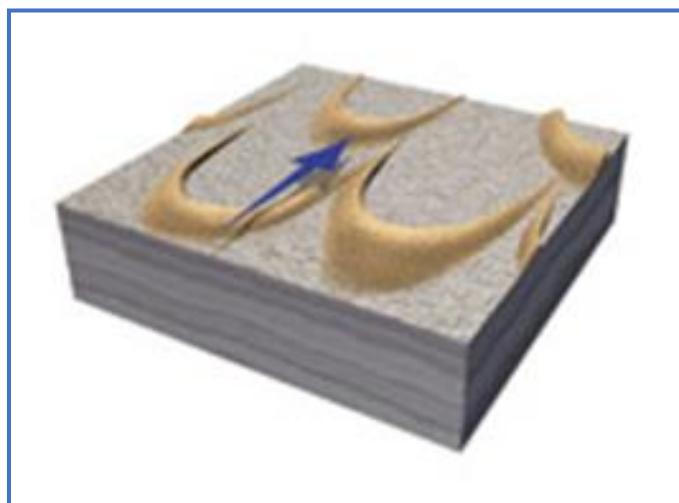


Figure I.4: Dune en étoile

I.3.4 Les dunes transversales :

Mobiles rectilignes, perpendiculaires la direction du vent : la dune du Pilat.



Figure I.5: Dune transversale

I.3.5 Les dunes longitudinales :

Allongées dans le sens du vent. Elles peuvent apparaître si le vent change de direction au cours de l'année. Plus précisément elles peuvent apparaître si le vent possède deux directions privilégiées. La dune est alors étirée dans le sens du vent moyen. On parle aussi du » Seif » dunes. Leur dynamique est bien plus complexe que pour les barkhanes.

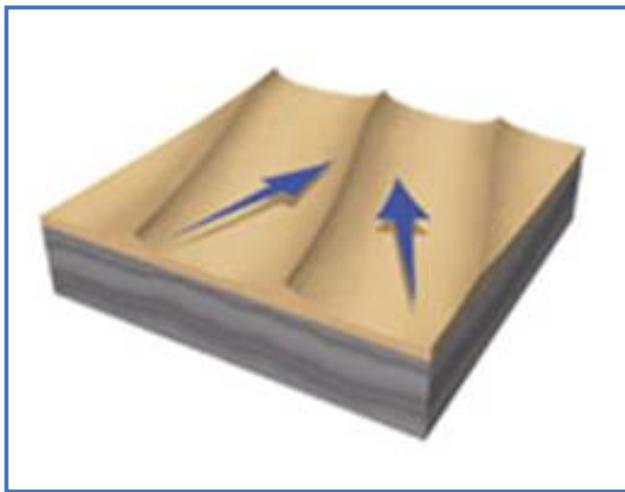


Figure I.6: Dune longitudinale

I.4. Formation des sables de dunes :

Les sables des dunes ont pour origine la désagrégation des roches sous l'effet conjugué des chocs thermiques et de l'altération des sols constituants les lits d'oueds ou d'anciens fleuves.

Les matériaux détritiques superficiels sont dégagés des particules limoneuses emportées en suspension dans l'air à des grandes distances. Les sables restés sur places sont à leur tour déplacés par roulage sur des distances plus courtes [4].

I.5. Caractéristique des sables de dunes du Sahara [5] :

- **Composition chimique :**

Ce sont des sables dont la composition chimique est très simple : plus de 95 % de silice, de 1 à 2% de calcaire et des traces de différents oxydes. Du fait de cette constitution, le sable à une couleur blanche légèrement jaune et ocre, il se dessèche et perd facilement sa cohésion en Surface.

- **Granulométrie :**

Le diamètre des plus gros éléments des sables des dunes du Sahara est de l'ordre de 0,5mm. 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 ($C_u = D_{60}/D_{10}$) est de l'ordre de 1,8 et le coefficient de courbure ($C_c = D_{30}^2 / [D_{10} \cdot D_6]$) est de l'ordre de 10. Il s'agit donc d'un sable très fin mal gradué.

- **Propreté :**

Le sable de dunes ne contient pratiquement pas de traces d'argile. Il a une limite de liquidité WL de l'ordre de 25 et une limite de plasticité non mesurable. La valeur de l'équivalent de sable est supérieure à 60%. La valeur du bleu est de l'ordre de 0,1 (Ben Dhia, M. H, 1998).

- **Comportement mécanique :**

Des essais de compactage puis de cisaillement direct ont été réalisés par Ould Sid et al (1995). (Ben Dhia, M. H, 1998). Les principaux résultats trouvés sont que :

-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, de l'ordre de 5kPa ;

- l'angle de frottement interne varie de 30° à 35° , selon la densité du sable.
- Les valeurs de ces paramètres montrent que le sable de dune peut avoir un bon comportement mécanique même lorsque sa compacité est faible, à condition d'être à l'abri du vent. Par ailleurs, l'indice portant CBR de ces sables, au poids volumique et à la teneur en eau de l'optimum Proctor modifié, est relativement faible. Il est de l'ordre de 10 %. C'est ce qui permet, entre autres, d'écartez toute possibilité d'utilisation de ces sables seuls en corps de chaussée (Khengaoui, 2013).

I.6. Classification des sables :

La classification GTR (Guide de Terrassement Routier) est une classification des matériaux utilisables dans la construction des remblais et des couches de forme d'infrastructures routières. Les matériaux sont classés selon leur nature, leur état et leur comportement.

La classification GTR est basée sur la norme NF P 11-300.

Les granulats sont classifiés par rapport les diamètres des graines par trois classes selon le tableau suivant [6] :

Tableau I.1 : Classification Des Sables Par Tamis

NOM	DIAMÈTRE DES GRAINS	NUMÉRO A. S. T. M. DES TAMIS	Classification des sols
Sable grossier	> 2,00 mm à < 4,75 mm	tamis 10 - tamis 4	
Sable moyen	> 0,465 mm à < 2,00 mm	tamis 40 - tamis 10	
Sable fin	> 0,0625 mm à < 0,465 mm	tamis 200 - tamis 40	
CLASSE	Définition	Caractéristique	Sous-classe
A	Sols fins	$D_{max} \leq 50 \text{ mm}$ et passant à $80 \mu\text{m} > 35 \%$	A1 à A4 selon VBS ou Ip
B	Sols sableux et graveleux avec fines	$D_{max} \leq 50 \text{ mm}$ et passant à $80 \mu\text{m} \leq 35 \%$	B1 à B6 selon VBS ou Ip et tamisat
C	Sols comportant des fines et des gros éléments	$D_{max} > 50 \text{ mm}$ et passant à $80 \mu\text{m} > 12 \%$ ou passant à $80 \mu\text{m} \leq 12 \% + VBS > 0,1$	30 sous-classes selon VBS, Ip et tamisat à 50 mm
D	Sols insensibles à l'eau avec fines	$VBS \leq 0,1$ et passant à $80 \mu\text{m} \leq 12 \%$	D1 à D3
R	Matériaux rocheux	voir la norme NF P 11-300	
F	Sols organiques et sous-produits industriels	voir la norme NF P 11-300	
<small>D_{max} = diamètre pour lequel 95 % des grains du sol ont une dimension inférieure (soit D_{95} si la courbe granulométrique est disponible, sinon appréciation visuelle de la dimension des plus gros éléments).</small>			

I.7. Utilisation du sable de dunes dans le domaine routier :

L'utilisation du sable en technique routière remonte à une époque ancienne où les ingénieurs avaient recours à ce matériau pour construire des routes. En particulier, le sable était souvent mélangé à un liant hydrocarboné pour former des couches de roulement durables et résistantes à l'usure. Cette technique de mélange sable-liant hydrocarboné était couramment utilisée pour la construction de routes dans de nombreuses régions du monde. Aujourd'hui encore, cette méthode reste une pratique courante dans le domaine routier, bien que les matériaux et les techniques aient évolué pour répondre aux exigences actuelles en matière de construction de routes sûres et durables [1].

I.8. 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.8.

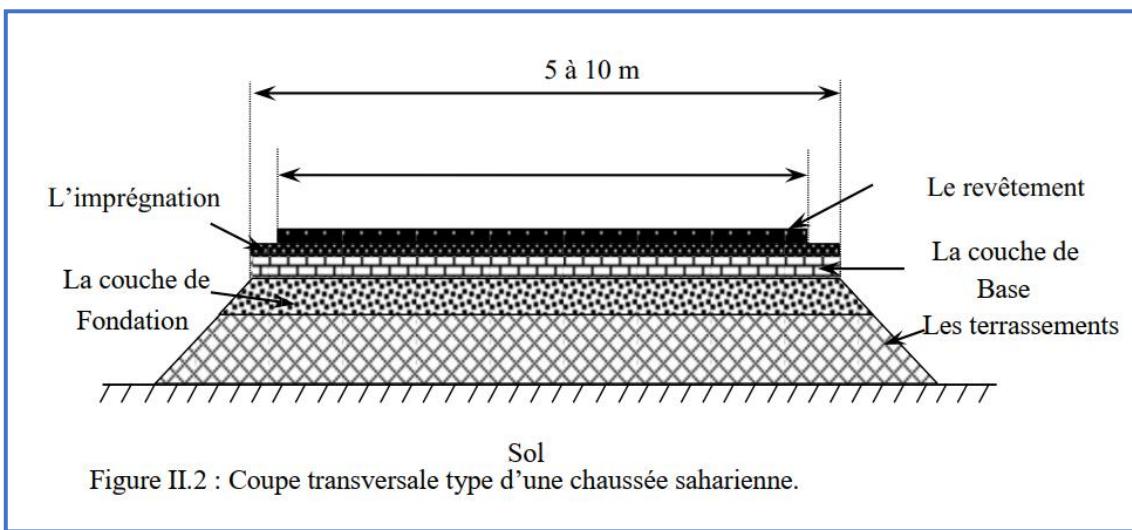


Figure I.7 : Coupe transversale type d'une chaussée saharienne.

▪ 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 (Amraoui, 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).

▪ **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.

▪ **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).

▪ **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 prématuées, 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.

Conclusion :

En conclusion, le sable des dunes est un matériau largement répandu dans les régions désertiques, et sa caractérisation est essentielle pour son utilisation dans les systèmes de construction. Il est composé principalement de grains de sable de différentes tailles, principalement de quartz, et peut présenter différentes formes de dunes telles que les dunes de barkhane, les dunes paraboliques, les dunes en étoile, les dunes transversales et les dunes longitudinales.

Dans le domaine routier, le sable des dunes a été utilisé depuis longtemps pour la construction de routes en tant que couche de roulement mélangée à un liant hydrocarboné. Sa classification dans la classe D₂ selon la norme GTR permet de mieux comprendre ses caractéristiques géotechniques et d'adapter son utilisation dans les projets de construction routière.

CHAPITRE II :

Caractéristiques géotechniques de tuf

I.1. Introduction :

Les tufs. Sont très largement employés comme remblais et matériaux de construction routière. Dans les pays à climat semi-aride et aride. Ces matériaux sont extraits de formations superficielles qui occupent une superficie relativement importante dans les régions sahariennes [7].

I.2. Définition de tuf [7] :

Le tuf se définit comme de roche poreuse légère, souvent friable, formée de dépôts mixtes ou calcaires ou gypseux.

Elles datent du Quaternaire et résultent d'un certain nombre d'échanges par dissolution et précipitation. Suivant leur composition chimique, les tufs d'encroûtements se groupent en trois catégories : les tufs calcaires, les tufs gypseux et les tufs mixtes.

L'origine du tuf est une roche poreuse très légère pouvant avoir deux origines :

- **Le tuf calcaire :** provient de l'encroûtement par des carbonates de la végétation aquatique et des plantes riveraines.
- **Le tuf volcanique :** résulte de la cimentation des dépôts et de l'accumulation de cendres d'origines volcaniques.



Figure II.1: Tuf [8]

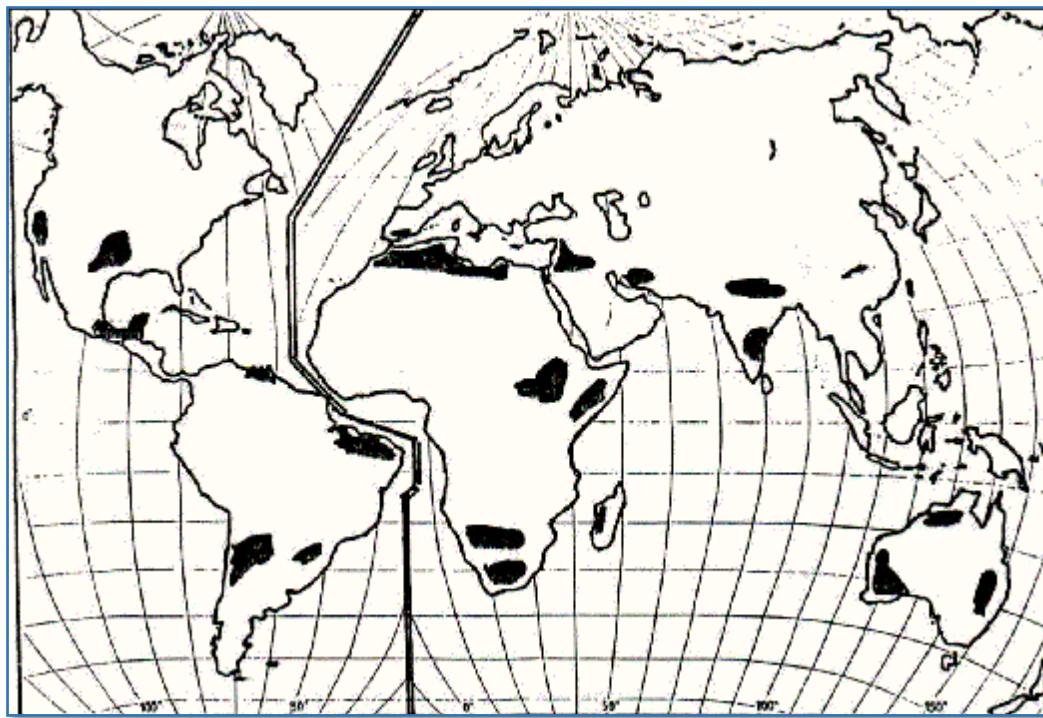


Figure II.2: Répartition des encroûtements calcaires dans le monde

I.2.1. Les tufs dans le monde :

- **En Amérique :** Ce sont les hautes plaines des États-Unis allant du Texas à la Californie, celles du Mexique et celles de l'Argentine centrale.
- **En Afrique :** Ce sont les « Hamada », hauts plateaux de l'Afrique du Nord, la plaine de Djefara et le bassin de Ben Gazi en Libye, les dépressions du nord du Kenya, les steppes de la Tanzanie, les plateaux de la Somalie, les vallées de Botswana et d'Afrique du Sud, les zones sèches de Madagascar et du Mozambique, la Namibie et l'Angola.
- **Au Moyen-Orient :** On rencontre le tuf au Liban, en Syrie, en Jordanie, dans les pays du Golfe Persique et en Inde dans les régions de Delhi et New Delhi.
- **En Australie :** On trouve le tuf dans les plaines littorales.
- **En Europe :** Le tuf y est peu abondant. On le trouve uniquement dans le sud de l'Espagne.

La figure II.2 représente la carte des zones de climat désertique, aride et semi-aride et des régions où existent les encroûtements calcaires.

I.2.3. Catégories des tufs :

- A. Les encroûtements calcaires.
- B. Les encroûtements mixtes.
- C. Les encroûtements gypseux.

A. Les encroûtements calcaires :

▪ Définition :

Selon les différentes spécialités en géologie, pédologie ou la géotechnique, de nombreuses définitions ont été données aux encroûtements calcaires. Parmi ces définitions on peut retenir celle formulée par A.J. GOUDIE. [6]

« La croûte calcaire est un matériau terrestre composé en majorité de carbonate de calcium (CaCO_3). Les croûtes existent à l'état poudreux, nodulaire ou très induré ; elles sont dues à la cimentation, à l'accumulation ou au remplacement de quantités plus ou moins grande de sols rocheux ou matériaux altérés par du calcaire dans une zone d'infiltration ».

▪ Formation des encroûtements calcaires :

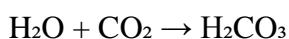
Les encroûtements sont constitués principalement de carbonate de calcium (CaCO_3 : calcaire) et de silice ou quartz (SiO_2 : sable). Ils contiennent aussi en faible quantité des argiles, des feldspaths et du chlorure de sodium.

La différence entre les encroûtements au niveau des caractéristiques mécaniques n'est pas due essentiellement à la présence ou pas de l'un des composants minéraux autre que le calcaire et le sable, mais elle est liée aux conditions qui existaient dès le début de leur formation ; par exemple, deux encroûtements ayant la même composition chimique peuvent avoir des compacités très différentes selon l'ampleur, la fréquence et la nature des cycles qui ont été à l'origine de leur formation.

▪ Hypothèses de formation :

La formation des encroûtements calcaires est due à la cimentation du sol par carbonate de calcium. Dans la nature l'origine des calcaires est soit chimique, soit biologique. La formation chimique dépend de l'abondance du CO_2 dans l'eau.

Dans ce dernier, le phénomène régi par les équations chimiques suivantes : [9]



Chapitre II

Caractéristiques géotechniques de tuf

Soit l'équilibre : $\text{CaCO}_3 + \text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2 \rightleftharpoons \text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$

Quant à la formation biologique des calcaires, elle est due à de nombreux organismes qui sécrètent directement le calcaire (CaCO_3) pour leur squelette ou coquille. C'est l'origine essentielle des calcaires.

Le CaCO₃ qui contribue à la formation des encroûtements calcaires provient de la solubilisation des hauts massifs.

La figure II.3 représente schématiquement le circuit qui aboutit à la création des encroûtements calcaires.

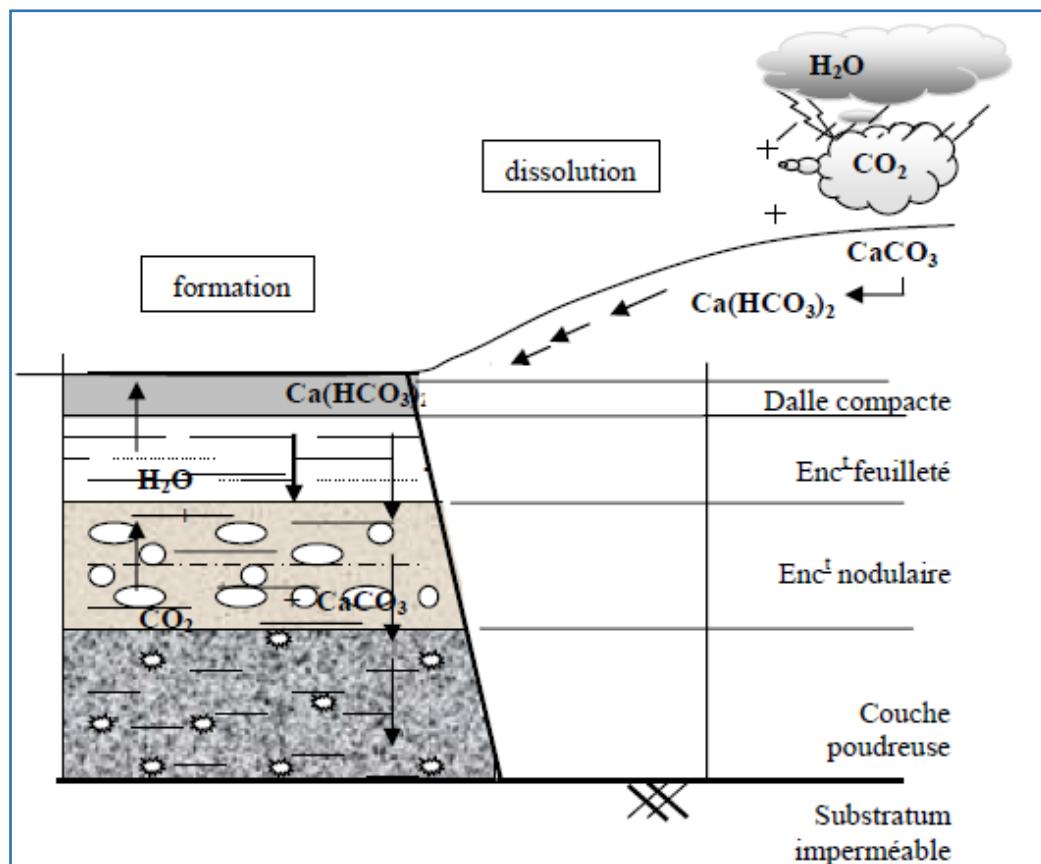
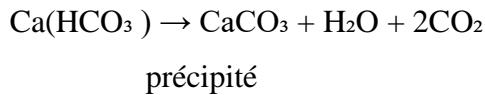


Figure II.3: Schéma du circuit de la formation des tufs calcaires.

L'eau est d'autant plus chargée que sa température est plus faible et son mouvement plus lent. Une fois arrivée dans une plaine ou un plateau, l'eau s'infiltra dans le sol pendant la saison sèche, le niveau de la nappe commence à baisser sous l'effet de l'évaporation et surtout de la végétation. A ce moment on assiste au phénomène de capillarité dû à la

tension superficielle caractérisée par le potentiel capillaire. Cette pression négative est nécessaire pour la précipitation du calcaire selon la réaction suivante : [9]



L'élévation de la température accélère la réaction mais la dépression joue un rôle fondamental.

B. Les encroûtements gypseux :

Les encroûtements gypseux sont des formations analogues aux encroûtements calcaires. Ils sont très abondants dans les régions à climat arides où les précipitations sont insuffisantes pour lixivier le gypse, qui existe déjà dans les formations géologiques anciennes. Ce minéral qui présente l'élément actif de la cimentation de ces formations, possède une dureté très faible : il peut être rayé à l'ongle ; cette particularité pourrait paraître suffisante pour interdire l'utilisation du gypse comme matériau de chaussée en zones climatiques subhumides et semi-arides.

Les encroûtements gypseux se dressent généralement en couches horizontales affleurantes à sub-affleurantes. En Algérie, ils occupent la grande surface au Sud et Sud-ouest de Biskra jusqu'en Tunisie [16].

■ Formation des encroûtements gypseux :

Le profil d'un sol encroûté par le gypse présente généralement de haut en bas, trois horizons principaux (voir figure 1.5).

- Horizon supérieur A :

C'est un horizon appelé tirch en arabe d'une épaisseur comprise entre 0 et 0 cm, il est l'équivalent de la terre végétale en zone tempérée. Cet horizon est caractérisé par l'abondance de racines gypsifères et par un encroûtement discontinu en feuillets et granulés, il est friable, poreux et souvent sableux.

- Horizon massif ou pierre à plâtre B :

C'est un horizon appelé Taffeza en arabe d'une épaisseur qui varie généralement entre et m, il vient juste après l'horizon supérieur. C'est un grès à ciment gypseux, utilisé souvent comme pierre à bâtir à cause de sa dureté remarquable.

- Horizon des roses de sable C :

A la base de l'horizon massif, l'encroûtement devient clair, humide et sableux. De gros cristaux de gypse imbriqué apparaissent, appelé « Louss » en arabe, la nappe est souvent de 50 cm à 1 m en dessous. Au contact direct de la nappe, le gypse se cristallise en agrégats de cristaux larges et aplatis qui englobent des grains de sable.

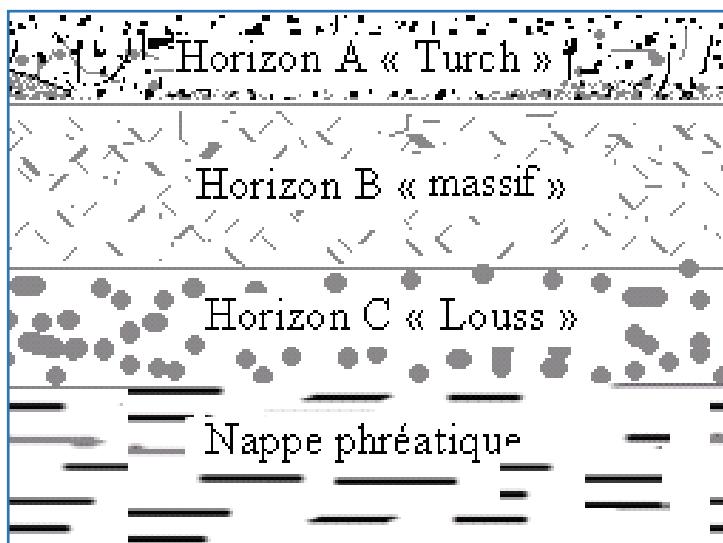


Figure II.4: Profil d'un encroûtement gypseux

▪ **Les sables gypseux :**

Les encroûtements dits « tendres » sont les principaux gisements de tufs gypseux, appelés plus couramment « sable gypseux ». C'est uniquement cet horizon qui est utilisé en construction routière.

C. **Les encroûtements mixtes :**

Les encroûtements mixtes sont des formations de tufs calcaires gypsifères à prédominance carbonatée ou de tufs gypseux calcifiés à prédominance sulfatée (De Os Horta, 1980). Au-delà d'une certaine aridité, le développement des encroûtements calcaires est arrêté à la source, à cause de l'insuffisance des précipitations pour dissoudre et drainer le calcaire vers les nappes phréatiques; et inversement, lorsqu'on passe du climat désertique au climat semi-aride, le gypse devient instable dans les sols à cause de sa solubilité notable, les encroûtements gypseux sont relayés alors par les encroûtements calcaires [16].

I.3. Classification des encroûtements calcaires :

I.3.1. Classification selon la teneur en carbonate de calcium (CaCO₃) :

La classification de Ruellan établie pour la géologie du Maghreb, semble avoir un caractère relativement universel puisqu'elle est très voisine de celle de Netterberg ablie à partir des études faites en Afrique du sud et en Australie [12].

Reullan propose trois grandes catégories :

- **Distributions diffuses :**

La teneur en calcaire est très faible. Le calcaire n'est pratiquement pas visible à l'œil nu.

- **Concentration discontinues :**

La teneur en calcaire devient plus élevée (40 à 60 %) les concentrations de calcaire se présentent sous la forme de nodule durs de 1 à quelque Cm³ ou sous la forme de module, ou d'amas friable qui s'écrasent facilement.

- **Concentration continues :**

Lorsque la concentration en calcaire se poursuit (teneur en CaCO₃ > 60%) elle devient continue, on a alors affaire aux encroûtements calcaires proprement dits.

La classification proposée par Ruellan pour les concentrations continues, est résumée sur le tableau II.1.

Tableau II.1 : Classification des encroûtements calcaires [9]

DENOMINATION		DESCRIPTION	TENEUR EN CaCO ₃ (%)	EPAISSEUR	RAPPORTS MUTUELS
Encroûtements non feuilletés	Encroûtements massifs	Structure massives ou polyédrique	> 60	0.3 à 2.0 m (le plus souvent)	Sous les encroûtements non feuilletés, il y a toujours des amas friables avec ou sans nodules
	Encroûtements nodulaires	Structure nodulaire et polyédrique			
Encroûtements feuilletés	Croûtes sensu strictu	euilletts superposés et discontinus d'encroûtement massif ou nodulaire d'épaisseur millimétrique à centimétrique croissant du bas en haut.	> 70	Quelques centimètres à >1m	Sous les croûtes, il y a presque toujours des encroûtements non feuilletés. Les dalles compactes n'existent qu'au sommet des croûtes et peuvent remplacer entièrement celles-ci. Des pellicules rubanées sont presque toujours associées à la dalle compacte dont ² tapissent la surface supérieure et les fissures.
	Dalles compactes	Feuilles de croûte pétrifiées, épaisseur de quelques centimètres à plusieurs décimètres			

I.3.2. Evolution des encroûtements calcaires :

Au fur et à mesure du dépôt du calcaire, la teneur en carbonates du sol s'élève. A partir de ce stade se produisent les phénomènes pédologiques qui transforment les différents horizons des sols. L'évolution finale est l'encroûtement mûr (figure II.5)

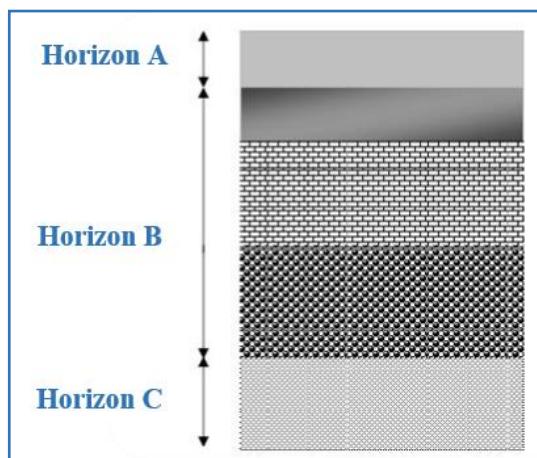


Figure II.5: Classification des encroûtements calcaires à partir du processus pédologique (encroûtement mûr). [9]

On distinguera les horizons suivants :

- **Horizon A :** pauvre en calcaire, c'est la terre végétale d'une épaisseur de 30 à 50 cm.
- **Horizon B :** riche en calcaire (40 à 90) d'une épaisseur de 1 à 2m, il est constitué de trois couches de haut en bas, d'une dalle compacte très dure à forte teneur en carbonate, d'une croûte constituée de feuillets de dureté plus faible que la dalle et d'un encroûtement nodulaire plus au moins pulvérulent.
- **Horizon C :** c'est le sol origine, c'est un matériau poudreux où l'enrichissement en calcaire est faible.

I.4. Utilisation des calcaires en constructions routière :

Selon leurs caractéristiques, les tufs calcaires sont utilisés dans différents cas :

- ✓ Couches de fondation, couches de base, couches de forme et en accotement.
- ✓ Pistes agricoles, routes moyennement ou fortement circulées et même autoroutes.
- ✓ Remblais.

Actuellement l'utilisation la plus courante des tufs calcaires est la réalisation de couches d'assises (Fondation et base) de routes à moyen ou faible trafic.

Les spécificités d'utilisation des tufs calcaires en construction routière en Algérie [16].

A. Couche de fondation :

Le rôle de la couche de fondation est identique à celui de la couche de base. Elle reprend les contraintes normales et les répartit sur le sol support.

La couche de fondation est le domaine privilégié des tufs calcaires ; l'épaisseur après compactage varie selon la nature des sols de la plateforme et de l'importance du trafic (forte, moyenne ou faible).

Le tableau II.2 présente les différentes caractéristiques physiques et chimiques des tufs calcaires utilisés en couches de fondation en Algérie.

Tableau II.2 : Critères d'utilisation des tufs calcaires en couche de fondation en Algérie [12].

Granulométrie	Suivant le fuseau
Limite de liquidité	$20 \% < W_L < 35 \%$
Indice de plasticité	$6 \% < I_P < 12 \%$
Equivalent de sable	$20 \% < ES < 35 \%$
Teneur en carbonate	$\text{CaCO}_3 > 45 \%$
CBR imbibé	$\text{CV}^{(1)} : \text{CBR} > 20$ $\text{CW}^{(1)} : \text{CBR} > 30$ $\text{RN}^{(1)} : \text{CBR} > 35$

$\text{CV}^{(1)}$ = chemin vicinal

$\text{CW}^{(1)}$ =chemin wilaya

$\text{RN}^{(1)}$ = route nationale

B. Couche de base :

La couche de base a pour rôle essentiel de reprendre les efforts verticaux et de répartir les contraintes normales qui en résultaient sur les couches sous-jacentes. Les tufs naturels sont rarement aptes à être utilisés en couches de bases pour les routes à fort ou moyen trafic.

Pour la couche de base, le CBR doit être au minimum égale à 60 (voir Tableau. II.3). Cette portance est rarement atteinte quand les tufs permettent une immersion de 4 jours. Dans les régions sèches, on peut prendre en compte un CBR non immergé, d'où une possibilité d'utilisation des tufs en couches de bases, puisque leur portance immédiate est en générale très élevée.

Tableau II.3 : Critères d'utilisation des tufs calcaires en couche de base en Algérie [12]

Granulométrie	Suivant le fuseau
Limite de liquidité	$20 \% < W_L < 30 \%$
Indice de plasticité	$5 \% < I_P < 10 \%$
Equivalent de sable	$20 \% < ES < 40 \%$
Teneur en carbonate	$\text{CaCO}_3 > 45 \%$
CBR imbibé	$\text{CV}^{(1)} : \text{CBR} > 20$ $\text{CW}^{(1)} : \text{CBR} > 30$ $\text{RN}^{(1)} : \text{CBR} > 35$

C. Remblais :

Il consiste à transporter et déposer des terres pour combler des cavités, il prend en considération le tassement et le coefficient de foisonnement du sol.

Les tufs sont également utilisés en remblais s'ils respectent certains critères présentés au Tableau II.4.

Tableau II.4 : Critères d'utilisation des tufs calcaires en remblais en Algérie [12].

Granulométrie	Ne doit pas être serrée
Limite de liquidité	$W_L < 45 \%$
Indice de plasticité	$I_P < 16 \%$
Equivalent de sable	$15 \% < ES < 40 \%$
Teneur en carbonate	$CaCO_3 > 30 \%$
CBR imbibé	$CBR > 14$
Densité sèche maximale	$\gamma_{d \max} > 1.6 \text{ g / cm}^3$
Teneur en eau optimale	$W_{opt} < 16 \%$

I.5. Les mélanges de tuf et d'un autre granulat :

I.5.1. Introduction :

Les tufs, notamment les plus tendres, ont naturellement une courbe granulométrique discontinue.

Leur teneur en fines est élevée et ils comportent peu ou pas de squelette.

Certaines graves naturelles sont, au contraire, riches en gros éléments, mais totalement dépourvues de fines. Par ailleurs, certains sables naturels éoliens ou alluvionnaires et même dunaire ont des courbes granulométriques très homométriques et sont eux aussi dépourvus de fines.

L'association de tuf avec ces graves ou sables paraît donc tout à fait intéressante lorsque l'on cherche une courbe granulométrique continue et suffisamment riche en fines pour obtenir un matériau à faible pourcentage de vides après compactage. Cette technique a été élaborée et développée depuis plus de 30 ans.

Elle est à rapprocher de la litho-stabilisation qui est utilisée avec succès pour le traitement des latérites [16].

I.5.2. Tufs – Sable de dunes :

L'utilisation du sable en techniques routières n'est pas nouvelle. Beaucoup d'études et de réalisations ont été faites et un guide pratique d'utilisation routière des sables a été publié (Chauvin, 1987). Cependant, les sables de dunes constituent un cas particulier pour lequel les directives et recommandations ne peuvent pas être appliquées sans études spécifiques. Ben-Dhia (1998) dans une tentative de valorisation du sable de dune, a mélangé ce dernier, différents taux, avec divers matériaux : grave naturelle, tuf calcaire, tuf gypseux et sol argileux et a conclu que :

- L'incorporation du sable de dune améliorer la portance des matériaux.
- Le poids volumique s'améliore aussi lorsque la teneur en sable augmente jusqu'à 30%.
- La plasticité diminue au profit d'une nette amélioration de la propreté.

En Algérie, vu l'abondance du sable de dune, l'idée de l'association de tuf avec le sable de dune au laboratoire paraît très intéressante (Morsli, et al., 2005a, Morsli, 2007 ; Morsli et al., 2007). L'étude a porté sur l'effet de l'incorporation d'un sable de dune sur les caractéristiques géotechniques et mécaniques d'un tuf calcaire de la région de Bechar.

L'objectif était de tester les possibilités d'amélioration des caractéristiques de ce tuf par une technique de stabilisation économique permettant de valoriser à la fois le sable de dune et le tuf calcaire pulvérulent.

I.5.3. Tufs – Sables – Bitume :

La technique des tufs calcaires-sables-bitume permet, à partir de deux matériaux « marginaux » (tuf tendre et sable fin), de réaliser des assises de chaussées traitées au bitume. Le comportement de ces structures est globalement jugé très bon en Argentine où cette technique est utilisée depuis plus de 25 ans. Le seul défaut de la technique réside dans la nécessité d'utiliser une teneur en bitume très élevée (8% à 10%), ce qui rend cette solution peu économique dans les pays non producteurs (Riuz et al 1969 ; Tagle, 1976) Cette technique repose sur les idées de base suivantes:

- ✓ Enrober les gros éléments 5/20 mm de tufs très friables dans un mortier bitumineux rigide qui les protège de l'attrition sous les contraintes de la circulation.
- ✓ Réaliser un mortier bitumineux performant en rigidifiant fortement un bitume routier traditionnel par un fort pourcentage de fines calcaires amenées par le tuf.

Les formules traditionnelles mises au point pour chaque chantier à l'issue d'une étude de formulation comportent en principe : 50 à 65 % de tuf calcaire plus 50 à 35% de sable siliceux mélangé avec 8 à 10 % de bitume 70/100.

Les tufs-sables-bitume peuvent être utilisés en assises de chaussées faiblement ou moyennement circulées ; ils sont alors protégés par un enduit superficiel. La présence d'éléments très friables en surface ne permet pas en effet de livrer longtemps les tufs-sables-bitume à la circulation sans protection. Pour ce type de chantier, les épaisseurs sont de l'ordre de 10 cm.

Dans le cas des chaussées fortement circulée, on doit les recouverts par une couche de roulement en béton bitumineux de 5 à 6 cm [16].

I.6. Essais géotechniques réalisés sur les tufs :

Les essais géotechniques les plus couramment utilisés pour la caractérisation des tufs au laboratoire sont :

- Analyse granulométrique :
 - Par tamisage (voie sèche ou humide) ;
 - Par sédimentométrie.
- Limites d'Atterberg (limites de consistance) ;
- Mesure de la pollution argileuse :
 - Equivalent de Sable ;
 - Essai au Bleu de Méthylène.
- Essai Proctor (Modifie ou Normal) ;
- Essai de portance (essai CBR) ;
- Essai de compression simple.
- Résistance aux chocs et à l'abrasion :
 - Essai Los Angeles.

I.6.1. Analyse granulométrique :

La granulométrie des tufs est très variable selon la nature du matériau :

- Sur le matériau d'origine elle est sans signification ;
- Sur le matériau extrait, elle est très variable.

Généralement le tamisage est réalisé par voie humide pour bien séparer les particules fines.

Concernant les éléments inférieurs à 80 µm l'analyse est faite par sédimentométrie. Les courbes granulométriques sont généralement continues avec une allure proche de celles des sables [9].

I.6.2. Mesure de la pollution argileuse :

Lorsque des matériaux sont susceptibles d'être utilisés pour la réalisation de couches de chaussées, il est indispensable de connaître dans quelle mesure ils sont pollués par des fractions argileuses.

Nous connaissons qu'un excès d'argile rendra le matériau sensible à l'eau et aux déformations permanentes sous la circulation. Pour cela, la mesure de la pollution elle est appréciée par trois essais géotechniques [9].

I.6.2.1. Limites d'Atterberg :

C'est l'essai actuellement le plus souvent réalisé et le plus universel sur les encroûtements calcaires. Pour évaluer la pollution argileuse, on fait en effet souvent référence à la valeur de l'indice de plasticité qui est très variable.

Il varie entre 5 (non mesurable) et 25 % (non mesurable < IP < 25) [9].

I.6.2.2. L'Equivalent de Sable :

Cet essai n'a pas de signification lorsqu'il est réalisé sur la totalité de la fraction 0/5mm. La teneur en éléments < 80 µm de cette fraction varie de 10% à 80 %, ce qui influence considérablement la valeur de ES qui est compris entre 10% et 60 %, et renseigne peu sur la qualité des fines [9].

I.6.2.3. Essai au Bleu de Méthylène :

L'essai au bleu a pour but de déterminer l'activité globale de la fraction argileuse. Cet essai, qui a été peu appliqué aux matériaux d'encroûtements, serait peut-être le mieux adapté pour évaluer l'activité des fines et détermine la présence d'argile plastique. A titre d'indication, les spécifications actuelles pour les couches de chaussées sont :

- Pour les enrobés bitumineux : VB < 1 ;
- Pour les graves non traités et traités : VB < 1.5 ;
- Pour les sables non traités et traités : VB < 0.5.

I.6.3. Essai Proctor :

Lorsque le matériau est destiné à être utilisé en couche de chaussée, on adopte la version dite Proctor Modifie pour laquelle l'énergie de compactage est la plus forte à peu près quatre fois que du Proctor Normal.

Les résultats de cet essai sont très dispersés car le comportement d'un matériau dépend de la teneur en eau, du compactage et de la granularité. Généralement, les résultats sont dans les fourchettes suivantes [9] :

- les densités sèches maximales (γ_d max) sont comprises entre 1.7 et 2 g / cm³ ;
- les teneurs en eau optimales (Wopt) sont, très variables et élevées, de 8 à 15 %.

I.6.4. Essai CBR :

L'essai est réalisé avec les conditions de l'essai Proctor Modifié à savoir la teneur en eau optimale et l'énergie de compactage. L'essai est réalisé :

- Soit immédiatement après compactage ;
- Soit après 4 jours d'imbibition sous l'eau.

La portance qui est caractérisée par l'indice CBR, est très élevée dans le cas du poinçonnement immédiat et chute considérablement après imbibition de 4 jours. Ceci, rend en compte l'influence de l'eau sur les tufs calcaires [9].

En résumé, on a souvent les résultats suivants :

- $50 < \text{CBR immédiat} < 150$.
- $30 \text{ CBR après 4 jours d'immersion} < 100$.

I.6.5. Essai de résistance à la compression simple :

C'est un essai empirique, introduit pour les matériaux locaux pour la première fois par Fenzy (1957) (in Alloul, 1981), il est réalisé sur tous les matériaux sahariens sur la fraction 5 mm.

Le compactage à l'OPM est effectué à la presse ou sur le moule CBR. On réalise par la suite des essais de compression simple sur des échantillons de 5 cm de diamètre et 10 cm de hauteur, en fonction de la durée de conservation de l'échantillon dans une enceinte à la même température [12].

I.6.6. Résistance aux chocs et à l'abrasion :

I.5.6.1. Essai Los Angeles :

Pour les matériaux suffisamment résistants, la résistance aux chocs sera appréciée par l'essai Los Angeles. Définie, par le coefficient LA.

Pour les matériaux d'encroûtements, ce coefficient varie entre 30 pour les dalles les plus compactes et 70 à 80 pour les croûtes les plus friables [9].

Au-delà de ces valeurs, l'essai est sans intérêt. En résumé :

- Pour les croûtes et dalle : $25 < \text{LA} < 80$
- Pour les encroûtements friables le LA est non mesurable.

Conclusion :

Nous avons présenté dans ce chapitre des généralités sur le tuf telle que, définition, catégories des tufs, quelque paramètres qui nous parmi d'identifier ce type de tuf comme la minéralogique, analyse granulométrique, comportement mécanique et les propriétés (WL, WP,...). On a parlé aussi sur les devers utilisations des tufs, son utilisation dans le domaine routière qui on va l'expliquer dans le chapitre suivant. Dans le chapitre suivant, on s'intéressera à la partie expérimentale par la présentation des résultats des essais identification physiques et mécaniques réalisés sur le tuf et le sable de dunes au niveau de la région de Ghardaïa, dans un but de leurs utilisations en construction routière.

Les tufs sont utilisés dans plusieurs travaux, en particulier les routes dans les couches de fondation, couches de base, couches de forme, accotement, piste agricoles, routes moyennement ou fortement circulée.

CHAPITRE III :

Identification des matériaux utilisés

I.1. Introduction :

Ce chapitre expose les résultats des essais menés au Laboratoire des Travaux Publics du Sud à Ghardaïa (LTPS) pour l'identification des matériaux.

Dans un premier temps, la zone d'étude est définie pour expliquer la localisation des matériaux utilisés dans notre étude.

Ensuite, un programme d'essais est élaboré pour identifier le sable de Metlili, suivi de tuf de la région de Bouhraoua. Les essais incluent la granulométrie, Proctor Modifié et la portance CBR, à l'exception de l'équivalent du sable pour le sable, qui est également présent.

De plus, une classification de ces matériaux est effectuée selon les normes LCPC et la classification GTR pour les matériaux routiers fins.

I.2. Zone d'Etude :

Avant d'entamer les essais routiers sur les matériaux choisis, il a été procédé à l'identité de la wilaya de Ghardaïa, il situé au nord du Sahara algérien, et le siège de la ville de Ghardaïa est à 600 km au sud de la capitale Alger, sa superficie totale est estimée à 26 165 km², son extension du nord au sud de 100 à 150 km, et d'est en ouest de 200 à 250 km s'élevant au-dessus du niveau de la mer est à 460 m ; La population totale de la wilaya au 31/12/2022 est 457 513 habitants, la densité est de 17.49 hab/km² [17].

La wilaya de Ghardaïa est limitée :

- Au Nord par la Wilaya de Laghouat (200Km)
- Au Nord Est par la Wilaya de Djelfa (300Km)
- A l'Est par la Wilaya d'Ouargla (200 Km)
- Au Sud par la Wilaya de Meniaa (270Km)
- A l'Ouest par la Wilaya d'El-Bayadh (350Km).

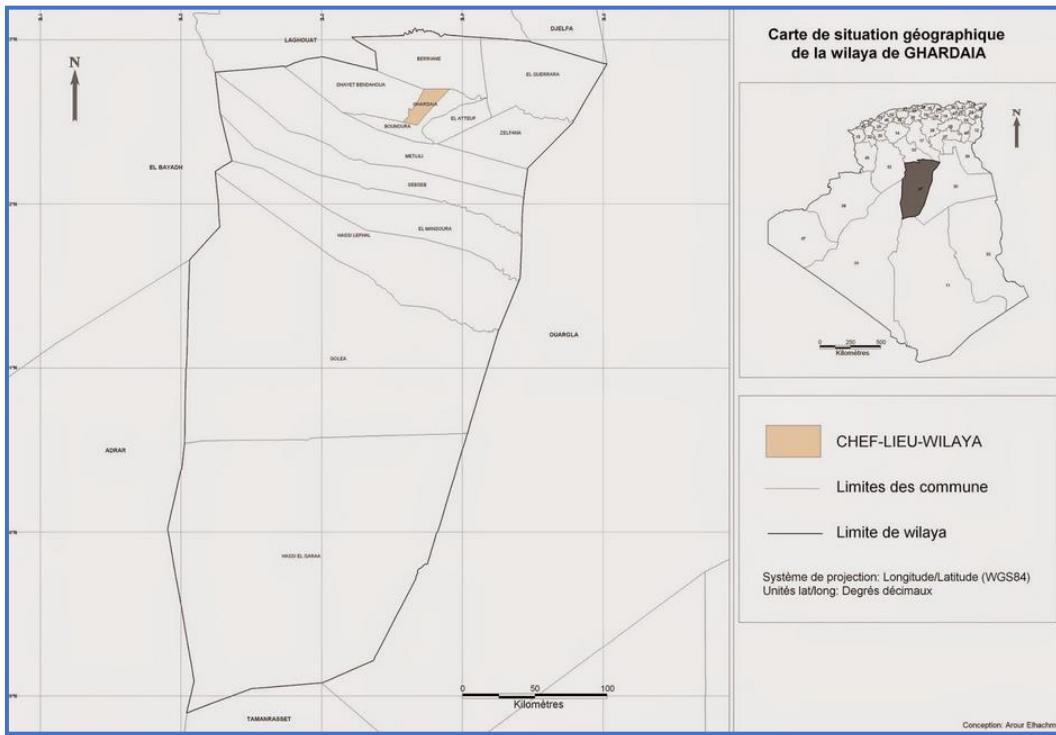


Figure III.1 : Situation géographique de la wilaya de Ghardaïa [18].

I.3. Localisation des sites de prélèvement des matériaux utilisés :

- **Le sable de dune :** Comme la région de Ghardaïa est considérée comme une région saharienne, la zone de provenance de sable de dune est située dans les environs de 45 Km de la ville (Oasis de Metlili).

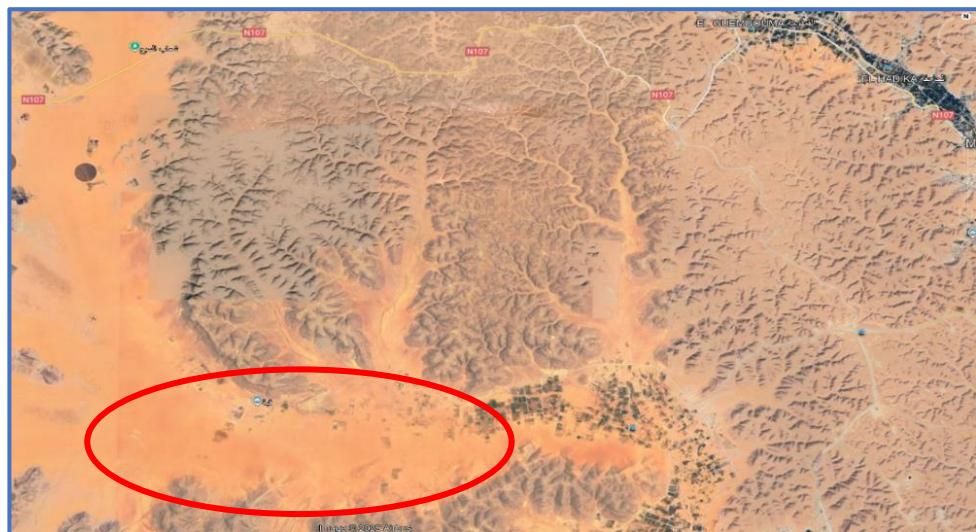


Figure III.2: Localisation de sable de dune Metlili (photo Google Earth).

- **Tuf :** L'échantillon est prélevé à une carrière de tuf (Faelsa), située à Nord-Est de la ville de Ghardaïa dans la zone de Bouhraoua.

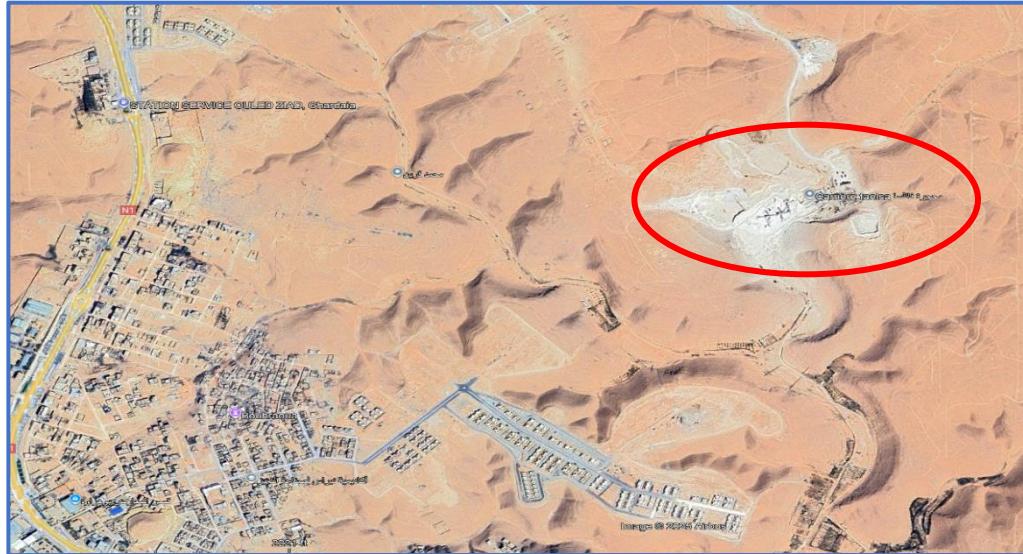


Figure III.3 : Localisation de la carrière de tuf (photo Google Earth).

I.4 Programme des essais :

Une série d'essai a été réalisée aux laboratoires de LTPS, permettant l'identification du sol étudié. Cette étude comporte les différents essaies suivants :

Tableau III.1 : Programmes des Essais pour l'Identification des matériaux Utilisés

Sable	Tuf
Analyse chimique	Analyse chimique
Analyse granulométrique	Analyse granulométrique
Équivalent de sable	Proctor Modifié
Proctor Modifié	Portance CBR

I.5. Essais d'identification :

I.5.1. Analyse chimique :

Une analyse chimique consiste à identifier et quantifier les composants d'un échantillon. Elle peut être qualitative, déterminant la nature des substances présentes, ou quantitative, mesurant leur concentration.

I.5.1.1. Analyse chimique du Sable de dune :



Figure III.4 : Echantillon de Sable de dune

Tableau III.2: Analyse chimique du sable de dune étudié.

Echantillon	Caractéristique	Sable
Insolubles NFP 15-461	Creuset + précipite	27.324
	Creuset vide	26.376
	Poids du résidu	0.948
	% insolubles	94.8
SULFATES BS 1377	Creuset + précipite	
	Creuset vide	22.088
	Poids du résidu	
	% SO ₃ ²	
CARBONATES NFP 15-461	V NaOH	
	% CaCO ₃	00

La constatation importante a signalé, est la présence d'un fort pourcentage en silice qui est supérieur à 90%, et par conséquent, le sable de dune de Ghardaïa est un sable siliceux.

I.5.1.2. Analyse chimique du Tuf :



Figure III.5 : Echantillon de Tuf

Tableau III.3: Analyse chimique du tuf étudié.

Enchantions	Caractéristique	Tuf
Insolubles NFP 15-461	Creuset + précipite	22.979
	Creuset vide	22.790
	Poids du résidu	0.189
	% insolubles	18.9
SULFATES BS 1377	Creuset + précipite	15.453
	Creuset vide	15.254
	Poids du résidu	0.199
	% SO ₃ ²⁻	6.82
CARBONATES NFP 15-461	V NaOH	
	% CaCO ₃	59

D'après les résultats, nous remarquons que la carbonate de calcium est l'élément prépondérant, donc on a tuf calcaire.

▪ **Masse volumique apparente, ρ_{app} [12] :**

La masse volumique apparente d'un matériau est la masse volumique d'un mètre cube du matériau pris en tas, comprenant à la fois des vides perméables et imperméables de la particule ainsi que les vides entre particules.

- La masse volumique apparente d'un matériau pourra avoir une valeur différente suivant qu'elle sera déterminée à partir d'un matériau compacté ou non compacté.
- La masse volumique apparente est donnée par :

$$\rho_{app} = M/V$$

- L'essai est répété fois pour un volume de litre et la moyenne de ces essais donne la valeur de la masse volumique apparente.

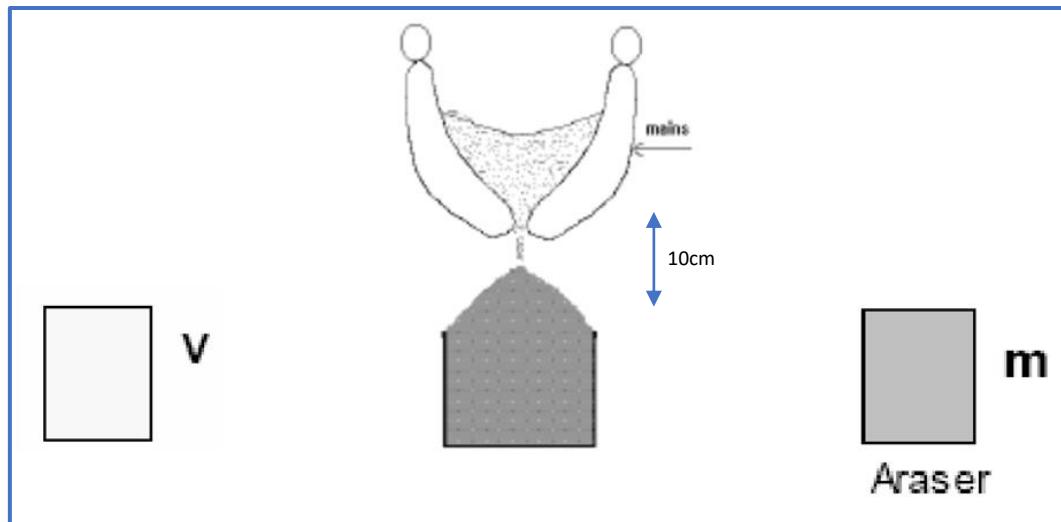


Figure III.6: Etapes de l'essai la Masse volumique apparente.

▪ **Masses Volumiques absolues pab [12] :**

La masse volumique absolue ρ_s est la masse par unité de volume de la matière qui constitue le granulat, sans tenir compte des vides pouvant exister dans ou entre des grains.

- **Méthode opératoire :**

Cette méthode de détermination des masses volumiques est plus précise à condition de prendre un certain nombre de précautions

- Déterminer avec précision la masse M_1 du ballon rempli d'eau.

- Déterminer avec précision la masse M_2 d'un échantillon de matériau sec.
- Introduire la totalité du matériau dans le ballon, remplir d'eau. Vérifier qu'il n'y a aucune bulle d'air. Peser alors avec précision le ballon, soit M_3 .

La masse volumique absolue est :

$$\rho_{ab} = M_2 / (M_1 + M_2 - M_3)$$

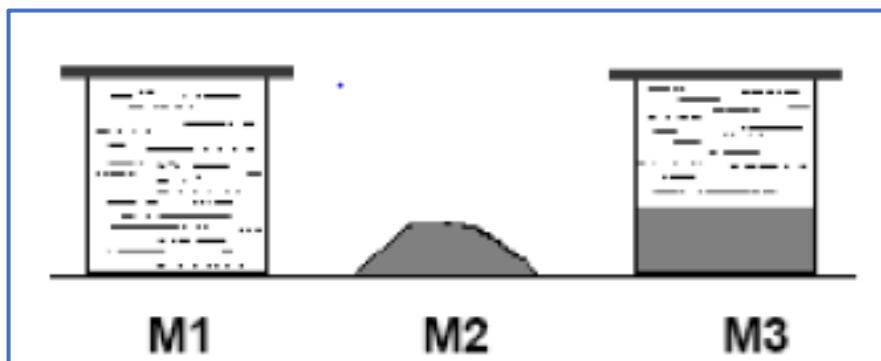


Figure III.7: Etapes de l'essai la Masse volumique absolue.

Le tableau III.4: résume les résultats de l'essai :

Tableau III.4: Résultats de la masse volumique apparente et absolue

Sable de dune	Tuf		
La masse volumique apparente ρ_{app} [g/cm ³]	La masse volumique absolue ρ_{ab} [g/cm ³]	La masse volumique apparente ρ_{app} [g/cm ³]	La masse volumique absolue ρ_{ab} [g/cm ³]
1.16	2.53	1.36	2.42

On remarque que la masse volumique absolue est plus importante que la masse volumique apparente ; Grâce à la masse volumique apparente, nous savons maintenant le poids et le volume des granulats, plus l'eau qu'ils contiennent et les vides. Avec la masse volumique absolue, nous avons déterminé le poids et le volume du squelette solide et de l'eau.

I.5.2. Analyse granulométrique :

En général, pour les matériaux routiers, la granulométrie est représentée par une courbe granulométrique sur laquelle doit être inscrit un fuseau dit *fuseau de spécification*.

I.5.2.1. Analyse granulométrique par tamisage du Sable de dune et tuf :

- **But de l'essai :**

L'analyse granulométrique permet de déterminer la grosseur et les pourcentages pondéraux respectifs des différentes familles de grains constituant l'échantillon. Elle s'applique à tous les granulats de dimension nominale inférieure ou égale à 63 mm.

- **Principe de l'essai [11] :**

L'essai consiste à séparer les grains agglomérés d'une masse connue de matériau par brassage sous l'eau, à fractionner ce sol, une fois sèche, au moyen d'une série de tamis et peser successivement le refus cumulé sur chaque tamis. La masse de refus cumulée sur chaque tamis est rapportée à la masse totale sèche de l'échantillon soumis à l'analyse.

- **Dimensions des tamis utilisés :**

Pour le Sable de dune, on a utilisé les séries des tamis de diamètre : 2 - 1 - 0.5 - 0.25 - 0.125 - 0.063 mm.

Et pour le Sable de dune, on a utilisé les séries des tamis de diamètre 80-50-31.5-10-5-2-0.2-0.1-0.08 mm.

- **Préparation de l'échantillon [13] :**

La quantité à utiliser doit répondre à différents impératifs qui sont contradictoires :

- Il faut une quantité assez grande pour que l'échantillon soit représentatif,
- Il faut une quantité assez faible pour que la durée de l'essai soit acceptable et que les tamis ne soient pas saturés et donc inopérants.

- **Matériel nécessaire :**

Des tamis dont les ouvertures carrées, de dimension normalisée, sont réalisés soit à partir d'un maillage métallique.



Figure III.8 : Tamiseuse manuelle.

■ **Mode Opératoire :**

Nous avons effectué cette analyse sur les deux matériaux par voie sèche.

- **Partie I :**

- Peser une masse M_0 du matériau. (M_0 Sable de dune = 300g / M_0 tuf = 600g)
- Procéder au tamisage à sec du granulat en utilisant successivement les tamis d_m jusqu'à d_c dans l'ordre décroissant des dimensions.
- Placer le granulat en partie supérieur et tamiser à la main.
- Peser les différents refus et déduire les tamisâtes.

Soit R_i la masse de refus cumulé dans le tamis « i », le calcul des pourcentages des tamisâtes se fait comme suit :

$$T_i = (M_0 - R_i) \times 100/M_0$$

- Expression des résultats :

C_u est le coefficient d'uniformité ou le coefficient de Hazen:

$$C_u = D_{60} / D_{10}$$

C_c est le coefficient de courbure

$$C_c = D_{30}^2 / D_{10} \times D_{60}$$

Le tableau III.5 résume les résultats de cette analyse granulométrique.

Tableau III.5: Résultats de l'analyse granulométrique de sable de dunes.

Tamis (mm)	Poids refus partiels(g)	Poids refus cumulés(g)	Poids refus cumulés (%)
2	0	0	0
1	0	0	0
0.5	6.2	6.2	2.06
0.25	117.3	123.5	41.16
0.125	120.7	244.2	81.4
0.063	50.3	294.5	98.16

Le tamisât du 0,063 mm représente 98.16 % de l'échantillon.

Tableau III.6: Résultats de l'analyse granulométrique de tuf.

Tamis (mm)	Poids refus partiels(g)	Poids refus cumulés(g)	Poids refus cumulés (%)
80	617.3	617.3	3.85
50	231.8	849	5.3
31.5	725.8	1574.8	9.83
20	911.7	2486.5	15.53
10	1700.4	4186.9	26.16
5	79	79	7.9
2	91	170	17

1	70	240	24
0.4	118	358	35.8
0.2	202	560	56
0.1	22	582	58.2
0.08	0	582	58.2

Le tamisât du 0,08 mm représente 58.2 % de l'échantillon.

1.5.3. L'équivalent de sable [12] :

Est un indicateur, utilisé en géotechnique, caractérisant la propreté d'un sable ou d'une grave. Il indique la teneur en éléments fins, d'origine essentiellement argileuse, végétale ou organique à la surface des grains.

- **But de l'essai :**

Cet essai utilisé de manière courante pour évaluer la propreté des sables entrant dans la composition des bétons. L'essai consiste à séparer les particules fines contenues dans le sol des éléments sableux plus grossiers. Une procédure normalisée permet de déterminer un coefficient d'équivalent de sable qui quantifie la propreté de celui-ci.

- **Principe de l'essai :**

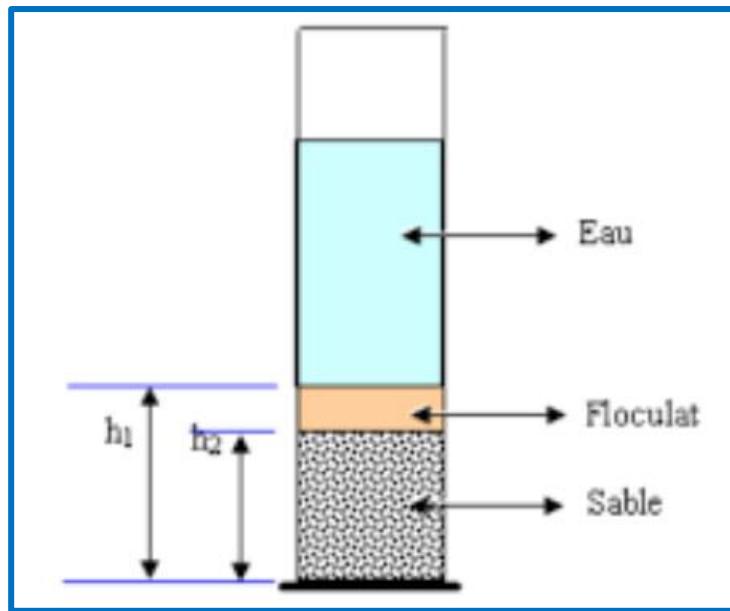
L'essai est effectué sur la fraction mm du matériau à étudier. Le tamisage se fait par voie humide afin de ne pas perdre d'élément fins. On lave l'échantillon, selon un processus normalisé, et on laisse reposer le tout. Au bout de 20minutes, on mesure les éléments suivants :

- Hauteur h_1 : sable propre +éléments fins,
- Hauteur h_2 : sable propre seulement.

On en déduit l'équivalent de sable qui, par convention, est :

Selon que la hauteur h_2 est mesurée visuellement ou à l'aide d'un piston, on déterminer ESV (équivalent de sable visuel) ou Esp (équivalent de sable au piston).

$$ES = h_2/h_1 \times 100$$

**Figure III.9:** Mesure de l'essai équivalent sable**Tableau III.7:** Résultat d'équivalent de sable de dune.

	1er éprouvette	2eme éprouvette
h_1	9.6	9.2
h_2	7.9	7.2
ES (%)	82.29 %	78.26 %

Les résultats de l'équivalent de sable pour le sable de dune montrent que notre sable de dunes est très propre et il y'a absence totale d'éléments fins.

Le tableau III.8 donne des valeurs de ES minimum pour la construction routière proposée par Hreem.

Tableau III.8: Spécification d'ES pour la construction des chaussées

Matériaux	ES minimum
Graves pour couche de base	30
Agrégats pour route mixte	35
Agrégats pour enrobées denses	45
Agrégats pour béton bitumineux	55
Sable pour béton	80

I.5.4 Essai de compactage et de portance :**I.5.4.1 Essai Proctor Modifié :**

- **But de l'essai [12] :**

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

- **Principe de l'essai [12] :**

Le principe de cet essai consiste à humidifier un matériau à plusieurs teneurs en eau et à le compacter, pour chacune des teneurs en eau, selon un procédé et une énergie conventionnelle. Pour chacune des valeurs de teneur en eau considérées, on détermine la masse volumique sèche du matériau et on trace la courbe des variations de cette masse volumique en fonction de la teneur en eau. D'une manière générale cette courbe, appelée courbe Proctor, présente une valeur maximale de la masse volumique du matériau sec qui est obtenue pour une valeur particulière de la teneur en eau. Ce sont ces deux valeurs qui sont appelées caractéristiques optimales de compactage Proctor normal ou modifié suivant l'essai réalisé.

- **Matériel nécessaire [12] :**

Moule CBR ; Dame Proctor Modifié ; Règle à araser ; Disque d'espacement Bacs d'homogénéisation pour préparation du matériau ; spatule ; Eprouvette graduée 150 ml environ ; Petits récipients ; Balance portée 20 kg, précision ± 5 g ; Balance de portée 200 g, précision $\pm 0,1$ g; Etuve 105°C $\pm 5^\circ$ C ; Burette à huile.



Figure III.10: Matériel nécessaire de Proctor Modifié

■ Mode opératoire :

- Sécher le matériau à l'air ou à l'étuve (3 à 5 heure à 60°C) ;
- Faire passer au tamis de diamètre 20mm ;
- Prendre 500g de tamisât ;
- Ajouter une quantité d'eau mesurée au sol et homogénéiser le mélange ;
- Assembler moule + embase + disque d'espacement + disque de papier au fond du moule (facilite le démoulage ; puis, peser l'ensemble : soit P_1 et ajouter la hausse ;
- Remplir le moule en 5 couches en damant chacune au moyen de 55 coups ;
- Enlever la hausse et araser la dernière couche ;
- Faire la pesée (sol + moule) ;
- Prélever à la fin de l'expérience un échantillon de la couche supérieure et un autre de celle du milieu afin de déterminer la teneur en eau ;
- Reprendre l'expérience avec l'échantillon ayant précédemment servi et auquel il faudra ajouter % d'eau par poids de l'échantillon (500g) ;

Le tableau III.9 donne les valeurs de la densité sèche maximale γ_d max et la teneur en eau optimale obtenues à l'essai Proctor Modifié pour quelques matériaux de chaussées caractéristiques.

Tableau III.9 : Caractéristiques de compactage pour quelques matériaux routiers.

Nature	γ_d max (g/cm ³)	W _{opt} (%)
Grave non traité	2.2	6
Grave ciment	2.25	6
Grave laitier	2.15	5
Sable ciment	1.9	6
Sable laitier	1.9	6

I.5.4.2 Essai CBR :

C'est un essai de poinçonnement d'une éprouvette de sol compacté suivant des conditions de densité et de teneur en eau fixées au préalable. Il s'exprime par un chiffre CBR proportionnel à la force appliquée sur un piston s'enfonçant de 2.5 ou 5 mm dans le sol.

La valeur CBR chute très vite lorsque la compacité du sol diminue, c'est un bon critère de portance d'un sol. L'indice Portant Immédiat (IPI) exprime la valeur de l'indice CBR immédiat (sans surcharge ni immersion), sur une éprouvette compactée à l'énergie Proctor Normal et à sa teneur en eau naturelle. (D. Didier, 1999) [12].



Figure. III.11: Presse Marshall.

I.5.5. Essai compression simple :**▪ Objet :**

La résistance à la compression permet d'apprécier approximativement la valeur de la cohésion du matériau ou des éléments fins, lorsqu'il est caillouteux ou graveleux.

▪ Mode opératoire LCPC:

- (06) éprouvettes doivent être confectionnées les résultats du Proctor Modifié.
- Doivent être connus et mentionner sur la feuille d'essai ; Les éprouvettes compactés dans le moule de Proctor normal a l'énergie de Proctor Modifie ; les éprouvettes utilisés ø5 cm et H10cm ; avec des matériaux < 5mm.
- Un échantillon représentatif doit être tamisé, passant à 05 mm est recueillir puis sécher à l'étuve ;
- Après malaxage de l'échantillon on procéder ou remplissage des moules ; remplissage des moules (voir mode opératoire) -si on ne dispose que d'un seul moule et que par suite de la chaleur par exemple, l'on peut craindre une perte de teneur en eau du matériau pendant le moulage et la confection des éprouvettes, il est toujours possible d'effectuer le malaxage de celles-ci une par une ;
- Moulages des éprouvettes ;
 - Presse CBR.

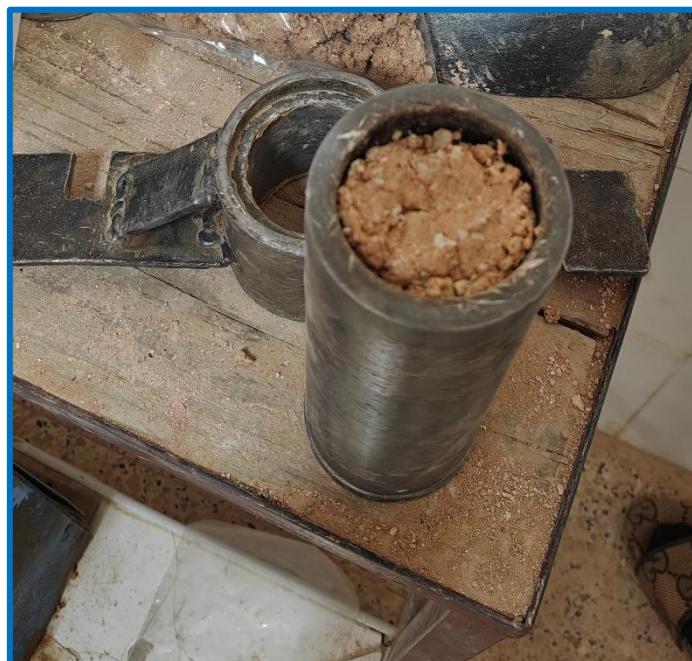


Figure. III.12: Moulages des éprouvettes en sable de dune et de tuf compactés dans le moule de Proctor Modifie.

- Démoulages des éprouvettes (Figure. III.13 et 14) ;



Figure. III.13: Démoulages des éprouvettes de sable de dune compactés dans le moule de Proctor Modifie.



Figure. III.14: Démoulages des éprouvettes de tuf compactés dans le moule de Proctor Modifie.



Figure. III.15: Machine de la compression simple

- Etuvages des éprouvettes : °C pour 72 H pour les matériaux non gypseux ;



Figure. III.16: Conservations des éprouvettes à l'étuve

- Ecrasement des éprouvettes : les éprouvettes conservées pendant la durée voulue dans l'étuve, puis ensuite porté entre les plateaux de la presse CBR. On applique alors la charge à une vitesse de .2 mm min jusqu'à la rupture.



Figure. III.17: l'écrasement des éprouvettes.

- Sur la feuille d'essai, les renseignements suivants seront conjoints éprouvettes :
- ✓ La densité sèche maximale Proctor modifie
- ✓ La teneur en eau optimale Proctor modifie
- ✓ Le poids théorique humide de l'éprouvette
- ✓ La teneur en eau réelle du compactage
- ✓ La hauteur de l'éprouvette
- ✓ Le diamètre de l'éprouvette
- ✓ Le volume de l'éprouvette ;
- Ecrasement : RC en Kg /cm².

Le tableau III.8 représente les valeurs de la résistance à la compression des échantillons Etudiés.

Tableau III.10 : Résultat de l'essai compression simple de tuf

Rc (Kg/cm ²) après 3 jours à l'étuve 55°C			
Compacité	C=100	C=98	C=95
Tuf	23.42	20.05	17.42

I.6. Classification GTR (Guide Technique Routier) :

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.

Tableau III.11 : Classification GTR de tuf et de sable de dunes

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

D'après les résultats obtenus lors d'essais d'identification, on a trouvé que le matériaux (tuf et sable de dunes) étudié se classe selon la classification GTR en classe **D** (Sols fins).

Conclusion :

Les essais que nous avons effectués ont permis de conclure que le sable de dune a une courbe granulométrique uniforme très sérieuse et ne contient pas de fines ($< 80\mu\text{m}$). Ce matériau est propre et ne présente aucune plasticité. Le sable de dune est un matériau léger avec une densité sèche égale à **1.76 g/cm³**. Il est insensible à la teneur en eau ainsi qu'à sa portance CBR. Il est classé comme un sable limoneux dans la classe D₂ selon le GTR. 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 IV :

**Etude des mélanges : Tuf +
Sable de dunes**

I.1 Introduction :

Malgré certaines caractéristiques géotechniques médiocres vis-à-vis des règlements en vigueur, le tuf a la propriété particulière de durcir en vieillissant. Afin d'améliorer sa compacité, on a opté pour une correction de sa granulométrie en substituant dans le tuf, une fraction de x% de sable de dune variant de 0 à 30 %, avec un pas de 10. Afin de rechercher la composition optimale du mélange, des essais de compactage et de portance ont été effectués sur les différents mélanges. Des essais de compression simple à différents âges ont été réalisés sur des éprouvettes de différents mélanges compactées à l'optimum Proctor modifié (OPM). La conduite de l'étude est faite selon l'organigramme suivant :

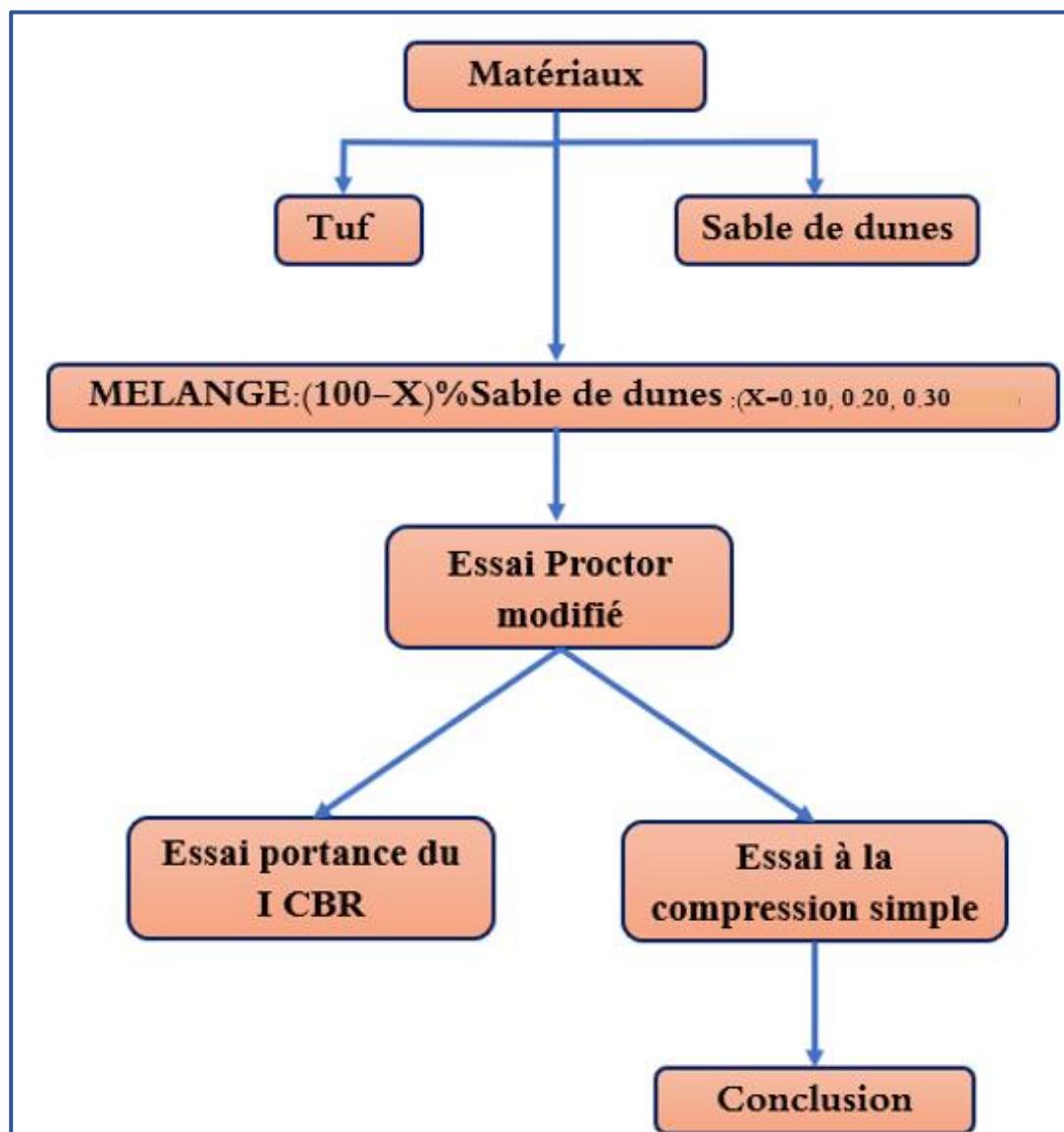


Figure IV.1: Organigramme de recherche d'une formulation optimale

Ce chapitre traite l'influence de l'ajout de différents pourcentages de sable au tuf.

L'objectif principal est de déterminer la variation des caractéristiques physiques (γ_{dmax} , ω_{opt} , w_L , W_p , I_p et V_{Bs}) en fonction du pourcentage de sable de dunes.

I.2. Essai Proctor modifié :

I.2.1. Tracé des courbes Proctor modifiés :

Les essais Proctor Modifié ont été faits selon la norme NFP94-093 pour les différents mélanges Tuf/Sable de dunes.

Pour les différents mélanges, les résultats montrent que l'ajout de sable de dunes tend à améliorer les caractéristiques optimales de compactage des mélanges en comparaison à celles du tuf sans ajout. Nous avons suivi le même protocole de l'essai Proctor Modifié pour les mélanges suivants :

- 90 % de tuf +10 % de sable de dunes ;
- 80 % de tuf +20 % de sable de dunes ;
- 70 % de tuf +30 % de sable de dunes ;

Les figures suivantes IV1, IV2, IV3et IV4.

Montrent la variation de la teneur en eau W en fonction du poids volumique sec γ_d .

Tableau IV.1: Résultat Proctor Modifié (90 % de tuf +10 % de sable de dunes).

Poids d'eau ajoutée	8%	10%	12%
Densité sèche	1.81332	1.85837	1.84870

Figure IV.2: Courbe Proctor Modifié (90 % de tuf +10 % de sable de dunes).

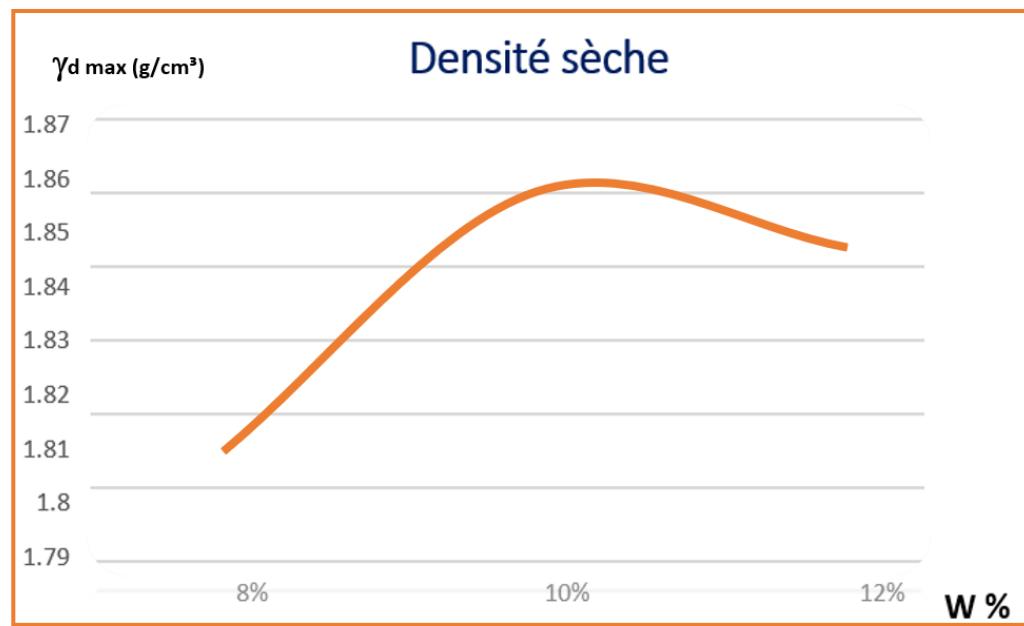


Tableau IV.2: Résultat Proctor Modifié (80 % de tuf +20 % de sable de dunes).

Poids d'eau ajoutée	8%	10%	12%
Densité sèche	1.92221	1.94348	1.87933

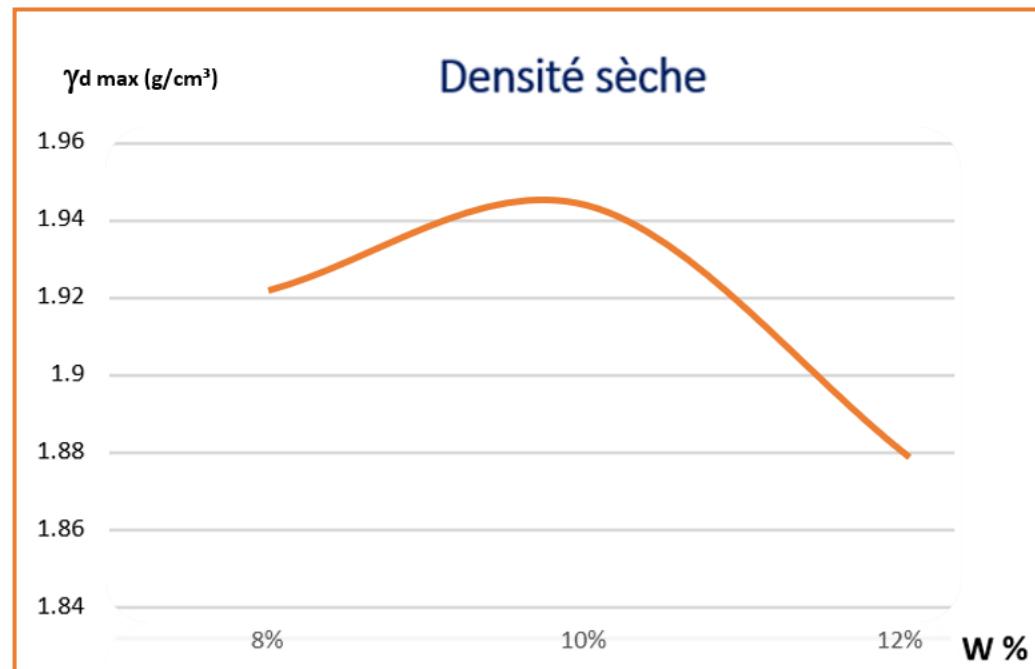
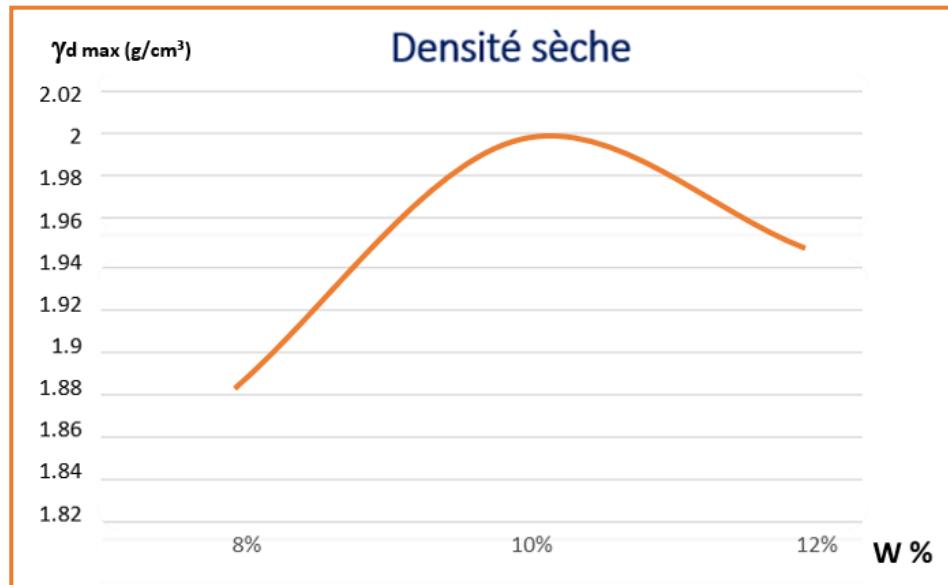


Figure IV.3: Courbe Proctor Modifié (80 % de tuf +20 % de sable de dunes).

Tableau IV.3: Résultat Proctor Modifié (70 % de tuf + 30 % de sable de dunes).

Poids d'eau ajoutée	8%	10%	12%
Densité sèche	1.88650	2.00515	1.95448

**Figure IV.4:** Courbe Proctor Modifié (70 % de tuf + 30 % de sable de dunes).**Tableau IV.4:** Résultat Proctor Modifié (100 % de sable de dunes).

Poids d'eau ajoutée	8%	10%	12%
Densité sèche	1.60045	1.72144	1.76969

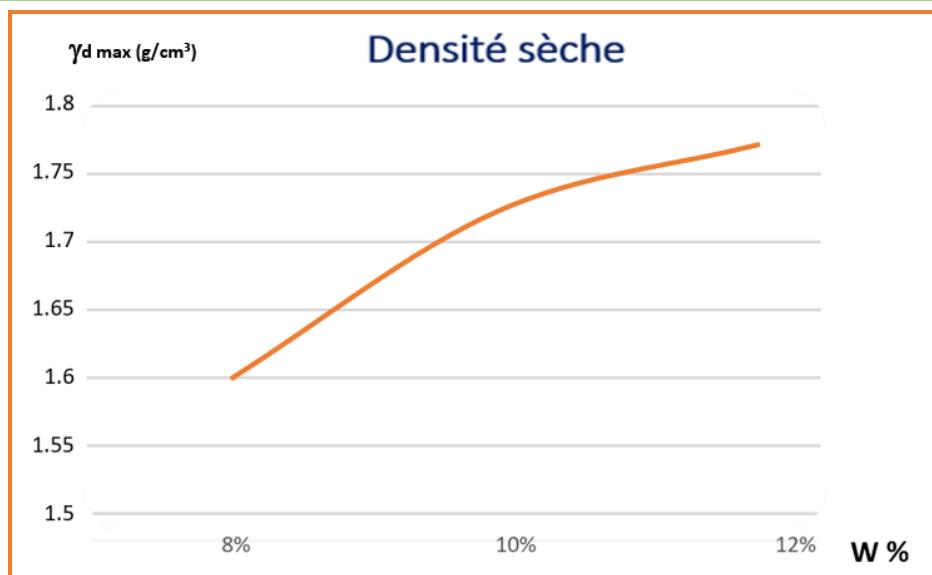
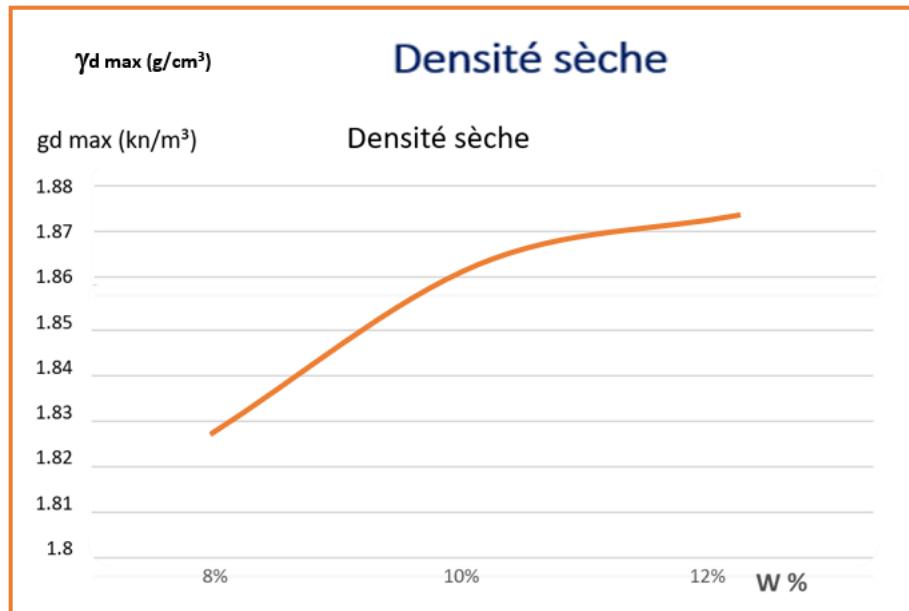
**Figure IV.5:** Courbe Proctor Modifié (100 % de sable de dunes).

Tableau IV.5: Résultat Proctor Modifié (100 % de Tuf).

Poids d'eau ajoutée	8%	10%	12%
Densité sèche	1.82698	1.86371	1.87389

**Figure IV.6:** Courbe Proctor Modifié (100 % de Tuf).

▪ Comparaison des résultats :

Les essais Proctor Modifié ont été faits selon la norme NFP94-093 pour les différents mélanges Tuf/Sable de dune.

Le Tableau IV.7 indique les valeurs de masse volumique sèche et de teneur en eau correspondantes à l'optimum Proctor Modifié pour les différents mélanges.

Tableau IV.6: Influence de l'ajout de sable de dunes sur la densité sèche γ_{dmax} et la teneur en eau W_{opt}

	90% tuf + 10% sable de dunes	80% tuf + 20% sable de dunes	70% tuf + 30% sable de dunes	100% sable de dunes
γ_d max (g/cm ³)	1.86	1.94	2.01	1.77
W _{opt} (%)	13.42	12.66	12.44	11.46

La variation de la masse volumique sec $\gamma_{d\max}$ et Wopt du sable des dunes et tuf + un pourcentage de sable des dunes est présenté sur la courbe suivante :

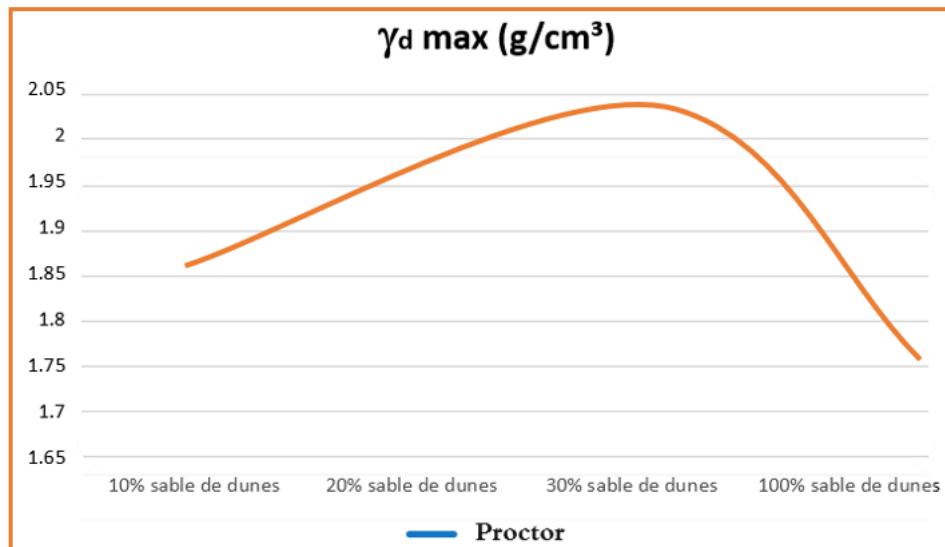


Figure IV.7: Variation de la densité sèche en fonction du pourcentage de sable de dunes.

On remarque que plus on augmente le pourcentage de sable des dunes la valeur du poids volumique sec à l'optimum augmente, par contre la teneur en eau optimale (matériau argileuse).

I.3. Essai à la compression simple :

La résistance à la compression permet d'apprécier la valeur de la cohésion du matériau.

I.3.1 Influence sur la Résistance à la compression simple :

Le tableau IV.8 résume les valeurs de résistance à la compression simple en fonction du pourcentage du sable de dunes.

Tableau IV.7: Influence de l'ajout de sable de dunes sur à la compression simple.

La Résistance à la compression(kg/cm ²)			
% Sable de dunes	Compacité=100	Compacité=98	Compacité=95
0	8,95	8,24	5,49
10	7,94	6,49	7,43
20	11,36	13,05	9,36
30	10,81	11,40	10,21

La variation de mélange est présentée sur le courbe suivant :

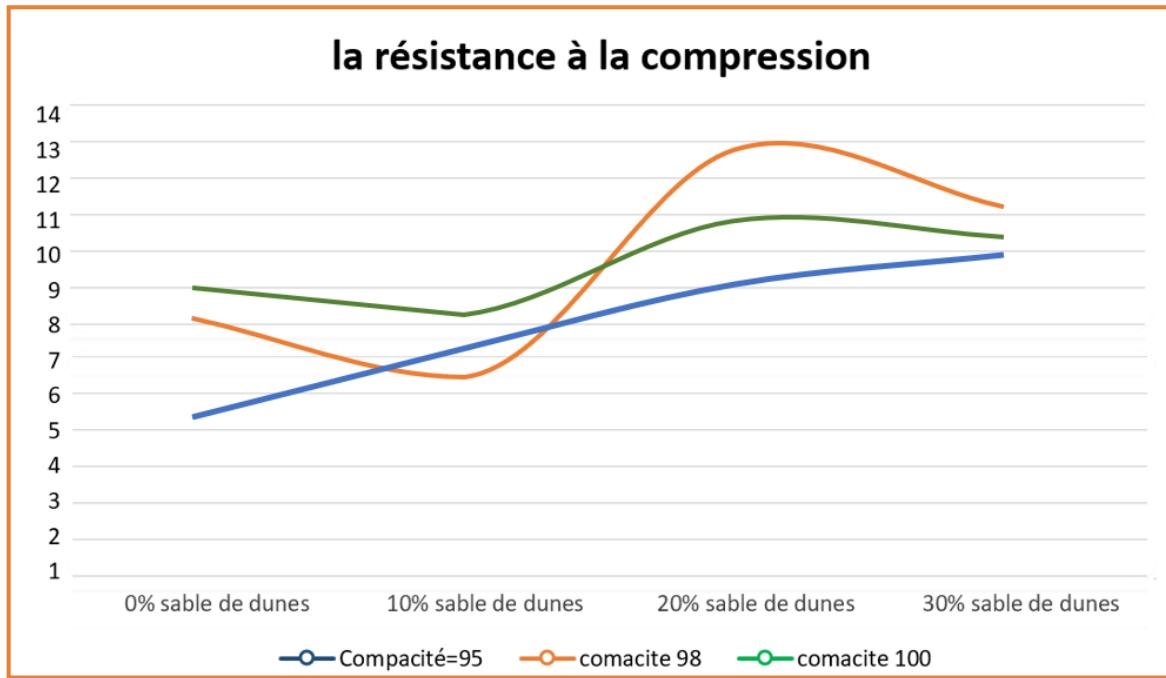


Figure IV.8 : la résistance à la compression en fonction de pourcentage de sable de dunes

Les courbes de la figure IV.8 qui reflètent de pourcentage de sable de dunes, la résistance à la compression diminue proportionnellement avec l'augmentation du pourcentage de sable de dunes, on remarque à 28 jours que ce mélange acquiert une résistance à la compression simple maximale de l'ordre de **13,05 kg/cm²** correspondant à un gain de (80 % de tuf).

Les valeurs des résistances à la compression simple des mélanges de tuf + (0 à 30 %) de sable de dunes, sont diminué jusqu' **6,49 kg/cm²**, pour la compacité 98 et la même remarque pour la compacité 100-95 ce qui explique l'efficacité du correcteur granulaire utilisé pour améliorer la compacité des mélanges.

I.4. Résumé de l'étude des mélanges : tuf + sable de dunes :

Le tableau IV.9 récapitule les caractéristiques physico-mécaniques et des matériaux étudiés du pourcentage du sable de dunes.

Tableau IV.9: Influence du Pourcentage de sable de dunes sur les propriétés physicomécaniques.

La Résistance à la compression			
% Sable de dunes	Rc (kg/cm²) c=100	W_{opt} (%)	γ_d max (g/cm³)
10	7,94	13.42	1.86
20	11,36	12.66	1.94
30	10,81	12.44	2.01

D'après le tableau IV.9 qui présente les résultats obtenus, on remarque que les essais de compactage ont montré une nette amélioration de la densité sèche liée à une diminution de la teneur optimale de l'eau de compactage. La portance elle augmente jusqu'à un taux de 20% de sable de dunes. La résistance à la compression simple, seule caractéristique mécanique qui se voit diminuer avec l'ajout de sable, cela peut s'expliquer que la cohésion du sable est tellement faible voir même nul, que les éléments fins du tuf n'arrivent pas à se coller aux grains de sable vu leur nature siliceuse. Ce point faible peut être résout par un éventuel traitement avec de la chaux ou au ciment.

Conclusion :

Les essais de compactage Proctor modifié effectués sur des mélanges de tuf et de sable des dunes qui ont été présenté, avaient d'abord pour but de montrer l'intérêt d'une présentation de l'effet d'ajout de sable de dunes au matériau locale le tuf, fréquemment utilisés en construction routière dans la région de Ghardaïa. Cette présentation permet de suivre l'évolution des caractéristiques des mélanges compactés, notamment le poids volumique sec et la teneur en eau optimale.

En comparant les paramètres de l'optimum Proctor sur les mélanges de tuf et de sable des dunes, il est fortement conseillé d'utiliser le sable des dunes car il influe considérablement sur l'augmentation de la valeur de γ_{dmax} .

Conclusion générale :

D'après cette étude, on propose la définition des matériaux à usage routière appelé " Tuf " Les tufs sont type de roche, friables, poreuses, légères et de couleur varie selon les impuretés. Elles se regroupent en trois catégories (Les tufs calcaires ; Les tufs gypseux ; Les gypso-calcaires), dont les caractéristiques géotechniques et plus encore les propriétés d'usage sont précisées à partir de constatation sur chantier et d'essais au laboratoire effectues sur un grand échantillonnage.

Cette étude, utilisant des données bibliographiques et les résultats d'essais de laboratoire, a permis de présenter le contexte saharien avec ses caractéristiques géotechniques et ses matériaux de construction. Dans ces régions, comme partout ailleurs, il y a un grand intérêt à minimiser autant que possible le transport des matériaux et de l'eau. L'incorporation du sable de dune dans les matériaux routiers dans les opérations de compactage.

A partir des résultats obtenus dans les chapitres on peut dire que :

Lorsqu'ils sont utilisés en assises de chaussées, ils présentent un comportement de tuf et mélange tuf-sable de dunes bien meilleur. Ce qui laisseraient à supposer leurs caractéristiques, si on les compare aux spécifications habituelles des matériaux de construction routière. Mais par apport de l'essai à la compression simple des mélanges un comportement faible. Lors que le sable de dunes faible la cohésion entre les gains. Je constate ; Comme solution qu'on le traite avec le ciment ou la chaux.

L'incorporation du sable de dune dans les matériaux routiers et dans les opérations de compactage sont des solutions convenables pour atteindre cet objectif car les résultats trouvés lors de cette étude sont encourageants. Leur application dans des chantiers réels présente des avantages économiques certains.

Par rapport aux matériaux routiers conventionnés nous avons constaté que certaines caractéristiques géotechniques de ces matériaux ne correspondent pas totalement aux règles d'utilisations actuelles des tufs en construction routière en Algérie. Mais c'est ça qui est disponible maintenant et les projets devront être réalisé. Donc on utilise ces matériaux momentanément jusqu'à ce qu'on trouve ce qui est meilleur et moins coûteux.

Conclusion Générale

Conclusion générale:

Conclusion générale:

D'après cette étude, on propose la définition des matériaux à usage routière appelé " Tuf " Les tufs sont type de roche, friables, poreuses, légères et de couleur varie selon les impuretés. Elles se regroupent en trois catégories (Les tufs calcaires ; Les tufs gypseux ; Les gypso-calcaires), dont les caractéristiques géotechniques et plus encore les propriétés d'usage sont précisées à partir de constatation sur chantier et d'essais au laboratoire effectues sur un grand échantillonnage.

Cette étude, utilisant des données bibliographiques et les résultats d'essais de laboratoire, a permis de présenter le contexte saharien avec ses caractéristiques géotechniques et ses matériaux de construction. Dans ces régions, comme partout ailleurs, il y a un grand intérêt à minimiser autant que possible le transport des matériaux et de l'eau. L'incorporation du sable de dune dans les matériaux routiers dans les opérations de compactage.

A partir des résultats obtenus dans les chapitres on peut dire que :

Lorsqu'ils sont utilisés en assises de chaussées, ils présentent un comportement de tuf et mélange tuf-sable de dunes bien meilleur. Ce qui laisseraient à supposer leurs caractéristiques, si on les compare aux spécifications habituelles des matériaux de construction routière. Mais par apport de l'essai à la compression simple des mélanges un comportement faible. Lors que le sable de dunes faible la cohésion entre les gains. Je constate ; Comme solution qu'on le traite avec le ciment ou la chaux.

L'incorporation du sable de dune dans les matériaux routiers et dans les opérations de compactage sont des solutions convenables pour atteindre cet objectif car les résultats trouvés lors de cette étude sont encourageants. Leur application dans des chantiers réels présente des avantages économiques certains.

Par rapport aux matériaux routiers conventionnés nous avons constaté que certaines caractéristiques géotechniques de ces matériaux ne correspondent pas totalement aux règles d'utilisations actuelles des tufs en construction routière en Algérie. Mais c'est ça qui est disponible maintenant et les projets devront être réalisé. Donc on utilise ces matériaux momentanément jusqu'à ce qu'on trouve ce qui est meilleur et moins coûteux.

Références bibliographies

- [1] BOUMRIGA ILYES & ALOUANI SMAIL, MEMOIR DE MASTER "Etude de l'influence de sable carrière sur les caractéristiques mécaniques et physiques de sable de dune", 2023.
- [2] Z. B. E. B. Salah, MEMOIR DE MASTER "Utilisation du filler du sable de dune dans le domaine", 2022.
- [3] K. Khadidja, MEMOIR DE MASTER " mécanique d'un mélange : Tuf + sable de dunes", 2016.
- [4] Ben Ouakhir Abdel Hakim « Utilisation du sable de dunes en technique routière Etude bibliographique ». Mémoire de Master, Université Mohamed Khider Biskra.
- [5] BENTASSA Sabrina SAADI Noussaiba « Influence de l'ajout des fines calcaire sur certaines caractéristiques (sec) géotechnique du sable de dune (application dans le domaine de la géotechnique routière saharienne) ». Mémoire de Master, 2023, Université de Ghardaïa.
- [6] AFNOR, Nf p11-300 Classification des matériaux, LA NORME FRANÇAISE, 2018
- [7] Hadjer Amel / GOUI Intissar : « Étude des performances mécaniques d'un mélange, tuf-sable de dunes-déchets de briques broyés, traité à la chaux », Mémoire de Master, 2023, Université Kasdi Merbah Ouargla.
- [8] [Https://www.futura-sciences.com/planete/definitions/geologie-tuf](https://www.futura-sciences.com/planete/definitions/geologie-tuf)
- [9] Akacem Mustapha (2008) : « Contribution à l'étude de la stabilisation aux liants hydraulique des tufs de région d'Adrar ». Mémoire de Magister, Université Mohamed Boudiaf-Oran.
- [10] Ministères Des Travaux Publics : « Cahier des charges ‘enrobes a chaud’.Ponts et chaussées ». Luxembourg.
- [11] Afnor, « Analyse granulométrique, méthode par tamisage après lavage ». Normalisation française.
- [12] Khalili Khadidja « caractérisation mécanique d'un mélange : Tuf + sable de dunes». Mémoire de Master, Université Colonel Ahmed Draïa d'Adrar.
- [13] Chalhi, Med. Moussaoui, Med. M : « Valorisation des granulats disponibles dans le sud de Bechar ». Projet fin étude. Université de Béchar.
- [14] Afnor 1992 : « Analyse granulométrique, méthode par sédimentation » Normalisation française.
- [15] LTPO Laboratoires des travaux publics de l'ouest. Adrar

[16] **Goual Idriss (2012** « Comportement mécanique et hydrique d'un mélange de tuf et de sable calcaire de la région de Laghouat : Application en construction routière ». Thèse de doctorat, Université Aboubakr Belkaid – Tlemcen.

[17] Annuaire statistique wilaya de Ghardaïa édition 2022

[18] Decoupageadministratifalgerie.blogspot.com

الملحق

LABORATOIRE DES TRAVAUX PUBLICS DU SUD

ANALYSE GRANULOMÉTRIQUE DES GRANULATS NF P 18- 560 Septembre 1990

Structure: U.GHARDAIA
N° Dossier interne:

Classe granulaire:

Prise d'essai:

Équipements utilisés: Balance/Etuve

Lieu de travail: SERVICE MATERIAUX
Date:
Opérateur:

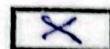
N° D'inventaire : L21.51.15/L49-01-15

Ouverture Tamis	Refus partiel	Refus cumulé	Pourcentage refus	Pourcentage passant	Observations
80					
63					
50					
40					
31.5					
25					
20					
16					
12.5					
10					
8					
6.3					
5					
4					
3.15					
2.5					
2	000	000	00	100	100%
1.60					
1.25					
1	00	00	00	100	100%
0.80					
0.63					
0.500	6,2	61,2	2106	99,94	98,4%
0.400					
0.315					
0.250	117,3	123,5	41,16	58,84	59%
0.200					
0.160					
0.125	120,7	244,2	81,4	18,6	19%
0.100					
0.080					
0,063	50,3	294,5	98,16	1,84	2%
<u>L'opérateur</u>					
Visa du responsable					

345 → 145 mm
6,2 → 2 mm

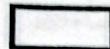
Λ 00 - Λ = 29,7 . 10
F-5-5p.(3)

LABORATOIRE DES TRAVAUX PUBLICS DU SUD
ANALYSE GRANULOMETRIQUE DES SOLS



(Méthode par tamisage à sec après lavage)

NF P 94-056 Mars 1996



(Méthode de tamisage par voie humide)

XP P 94-041 Dec. 1995

Structure : U.GHARDAIA

Lieu de travail : SERVICE COTROLE

N° Dossier interne : 14/ES/2025/006 EG

Équipements utilisés : balance – étuve

TUF

Échantillon : PK

Date :

Opérateur :

N° D'inventaire : L21.51.15 / L49.10.15

Poids de l'échantillon (g)	Tamis (mm)	Poids refus partiels (g)	Poids refus cumulés (g)	Poids refus cumulés (%)	Complément à 100	Tamisats %
76000 g	80	617,3	617,3	3,85	96,15	96 %
	50	231,7	849	5,30	94,7	95 %
	31,5	725,8	1574,8	9,83	90,17	90 %
	20	910,7	2486,5	15,53	84,47	85 %
	10	1700,4	4186,9	26,16	73,84	74 %
1000g	5	79	79	7,9	92,1	92
	2	91	170	17	83	83
	1	70	240	24	76	76
	0.4	118	358	35,8	64,2	64
	0.2	202	560	56	44	44
	0.1	22	582	58,2	41,8	42
	0.08	0	582	58,2	41,8	42

Visa du responsable

L'Opérateur

LABORATOIRE DES TRAVAUX PUBLICS DU SUD

ESSAI DE COMPRESSION SIMPLE MODE OPÉRATOIRE

Structure:.....
 Dossier n°:.....
 Échantillon:.....
 Température de séchage:.....
 γ_d max:..... 1,86
 TUF + 10% sable

Lieu de travail:.....
 Nature du matériau:.....

Temps de séchage:.....
 W_{opm} :..... 13,42

Date:.....
 Opérateur:.....
 Équipements utilisés:.....
 N° D'inventaire:.....

Compacité théorique	Densité	Poids du sol sec	Poids de l'eau	Poids du sol humide
100	1,86	365,025	48,98	414,005
98	1,82	357,72	48	405,72
95	1,77	346,77	46,53	393,3

TUF + Sab
2372,66
318,3

N° d'éprouvette	Poids réel après compactage	Poids réel à l'écrasement t	Teneur en eau	Diamètre éprouvette	Hauteur éprouvette	Volume éprouvette	Densité sèche à l'écrasement t	Compacité à l'écrasement t	Lecture	Résistance en (Kg/cm²)	RC Moyenne (bars)
100	356,9	355,7	12,14	5	10	196,25	1,81	97	1,892	9,83	7,94
100	405,8	361,7	12,19	5	10	196,25	1,84	98	1,166	6,06	
98	401,1	357	12,35	5	10	"	1,81	97	1,166	6,06	
98	398,1	354,1	12,42	5	10	"	1,8	96	1,335	6,93	6,49
95	388,4	345,4	12,44	5	10	"	1,76	94	1,335	6,93	
95	390,2	346,1	12,74	5	10	"	1,76	94	1,525	7,92	7,42

L'Opérateur

Visa du Responsable

F-5-5s.03

LABORATOIRE DES TRAVAUX PUBLICS DU SUD

ESSAI DE COMPRESSION SIMPLE MODE OPÉRATOIRE

Structure:.....
 Dossier n°:.....
 Échantillon:.....
 Température de séchage:.....
 γ_d max:..... 1,94

Lieu de travail:.....
 Nature du matériau:.....
 Temps de séchage:.....
 W_{opm} :..... 12,66

Date:.....
 Opérateur:.....
 Équipements utilisés:.....
 N° D'inventaire:.....

TUF + Sable (20%)

Compacité théorique	Densité	Poids du sol sec	Poids de l'eau	Poids du sol humide
100	1,94	380,72	48,19	428,91
98	1,9	373,10	47,22	420,32
95	1,84	361,68	45,78	407,46

2474,71 313,2
TUF 1979,768
Sable 49

N° d'éprouvette	Poids réel après compactage	Poids réel à l'écrasement t	Teneur en eau	Diamètre éprouvette	Hauteur éprouvette	Volume éprouvette	Densité sèche à l'écrasement t	Compacité à l'écrasement t	Lecture	Résistance en (Kg/cm²)	RC Moyenne (bars)
100	426,7	381,6	11,81	5	10	196,25	1,94	100	2,088	10,85	11,36
100	426,2	382,0	11,57	4	u	u	1,94	100	2,285	11,87	
98	417,9	373,9	11,76	4	u	u	1,9	98	2,877	14,95	
98	418,4	374,8	11,63	4	u	u	1,9	98	2,147	11,15	13,05
95	406,8	365,4	11,33	u	u	u	1,86	95	1,808	9,39	
95	405,6	364,0	11,42	4	u	u	1,85	95	1,797	9,33	9,36

L'Opérateur

Visa du Responsable

F-5-5s.03

LABORATOIRE DES TRAVAUX PUBLICS DU SUD

ESSAI DE COMPRESSION SIMPLE

MODE OPERATOIRE

Structure :
 Dossier n° :
 Échantillon :
 Température de séchage :
 Temps de séchage :
 Tièrres :
 TUF + Salbe

Lieu de travail :
 Nature du matériau :
 Temps de séchage :
 Wcm :
 12,44

Date :
 Opérateur :
 Équipements utilisés :
 N° D'inventaire :

Compacité théorique	Densité k sec	Poids du sol sec	Poids de l'eau	Poids du sol humide
100	2,101	394,46	4,9	443,46
98	1,97	386,57	4,8	434,57
95	1,9	374,73	4,6755	421,28

TUF + Salbe	RC moyenne (bars)
2,564	37,9
17,94,8	
Salbe	7,69,2

N° d'éprouvette	Poids réel après compactage	Poids réel à l'écrasement	Teneur en eau	Diamètre éprouvette	Hauteur éprouvette	Volume éprouvette	Densité sèche à l'écrasement	Compacité à l'écrasement	Lecture	Résistance en (Kg/cm²)	RC Moyenne (bars)
100	440,1	392,6	12,69	5	10	196,25	0,9	2,224	11,55		
100	438,8	391,4	12,11	11	11	199	0,9	1,936	10,06		
98	432,6	395,7	9,32	11	11	200	1,00	2,196	11,41		
98	430,9	384,1	12,18	11	11	195	0,97	2,199	11,40		
95	419,5	374,1	12,16	11	11	199	0,94	1,1586	8,94		
95	420,4	377,5	11,95	11	11	192	0,95	2,344	12,78		

L'Opérateur

Visa du Responsable

L'ANALYSTE DES TRAVAUX PUBLICS DU SUD

sable

ESSAI DE COMPRESSION SIMPLE
MÉTHODE OPÉRATOIRE

Structure:
 Dossier n°:
 Échantillon:
 Température de séchage:
 Pmax: 1177

Lieu de travail:

Nature du matériau:

Temps de séchage:

W_{cpm}: 111,46

Date:

Opérateur:

Équipements utilisés:

D'inventaire:

P.T

C.T

2257,66

2587,

Compacité théorique	Densité	Poids du sol sec	Poids de l'eau	Poids du sol humide
100	1,77	347,36	39,81	387,17
98	1,73	340,41	39,01	379,42
95	1,68	329,99	37,82	367,81

N° épruvette	Poids net après compactage	Poids réel à l'érasement	Largeur en eau	Diamètre épruvette	Hauteur	Volume épruvette	Densité sèche à l'érasement	Compacité à l'érasement	Lecture	Résistance en (Kg/cm ²)	RC Moyenne (bars)
100	384	342,5	12,11	5	10	196,25	1,74	98			
100	365	324,5	12,44	5	9	n	1,65	93			
98	347	310,4	11,79	4	9	n	1,58	89			
98	369,1	331,3	11,4	4	n	n	1,68	94			
95	330,1	296,2	11,44	n	5	n	1,5	84			
95	354,6	317,3	11,75	n	5	n	1,61	90			

L'Opérateur

Visé du Responsable

F-5-5s.03

$\pi R^2 h$

LABORATOIRE DES TRAVAUX PUBLICS DU SUD

MASSE VOLUMIQUE APPARENTE ET ABSOLUE

MODE OPÉRATOIRE COURS DE LABORATOIRE R.LANCHON

BTS DUT

Structure : U.GHARDAIA

N° Dossier interne:

Échantillon:

Équipements utilisés: balance

Masse volumique apparente : الن้ำ الماء Volume du récipient $V = 2000$ Poids $P = 1810 \text{ g}$ $P_1 + T = 4194,5$ $P_2 + T = 4140,9$ $P_3 + T = 4137,5$ $P_4 + T = 4131,4$ Poids moyen $M = (P_1 + P_2 + P_3 + P_4) / 4 = 2386,075$ Masse volumique apparente $P/V = 0,905 \text{ g/cm}^3$ $P_1 = 2384,5$ $P_2 = 2330,9$ $P_3 = 2327,5$ $P_4 = 2321,4$ $2386,075$
 $0,905$
 $2,16 \text{ g/cm}^3$ L'opérateur

Lieu de travail : SERVICE MATERIAUX

Date:

Opérateur:

N° D'inventaire: L21.51.15

Masse volumique absolue : الن้ำ الماء Poids des agrégats secs $P_1 = 300 \text{ g}$ Poids du récipient plein d'eau $P_2 = 2186,5 \text{ g}$ $P_3 = P_1 + P_2 = 2486,5$

Poids récipient + agrégats + eau = 2368,2

 $P_4 = 2368,2$ Volume des agrégats $V = P_3 - P_4 = 118,3$ Masse volumique absolue $P_1/V = 2,5 \text{ g/cm}^3$ Visa du responsable

ESSAI PROCTOR

MODIFIE

NF P 94-093 September 1997

NORMAL



$\gamma_d =$
 $w_y =$

Structure :

N°Dossier interne :

Echantillon :

Prise d'essai :

Lieu de travail :

Température de séchage :

Teneur en eau Opin :

Densité sèche Max :

Date :
Opérateur:

Poids d'eau ajoutée :	8%	10	122
Poids total humide :	7900	8232	8137
Poids du moule :	3652	3795	3652
Poids du sol humide :	4248	4437	4485
Poids du sol sec :	3933,33	4033,63	4004,46
Volume du moule :	2104	2104	2104
Densité sèche :	1,86	1,91	1,9
N° de la tare :	S1	W39	564 C10
Poids total humide :	105	134	100
Poids total sec :	96,3	122,1	107,7
Poids de la tare :	19	18	18
Poids de l'eau :	8,7	11,9	11,3
Poids du sol sec :	77,3	104,1	89,7
Teneur en eau :	11,25	11,43	12,59
Moyenne :	11,34	13,42	15,38
	1,81	1,85	15,19

L'opérateur

Visa du responsable
W.Y.

ESSAI PROCTOR **NORMAL**
MODIFIÉ
NF P 94-093 September 1997

Structure :	.....	Date :	.....
N° Dossier interne :	.....	Lieu de travail :	.....
Echantillon :	.....	Température de séchage :	.....
Prise d'essai (UF → 20% Sec)	.....	Teneur en eau Optm :	.....
Poids d'eau ajoutée :	.....	Densité sèche Max :	.....
Poids total humide :	8716	10%	12%
Poids du moule :	4220	8475	8357
Poids du sol humide :	4496	3866	3795
Poids du sol sec :	4196	4609	4598
Volume du moule :	2104	2104	2104
Densité sèche :	1,97	1,99	1,95
N° de la tare :	A14	08	562
Poids total humide :	128	123	123
Poids total sec :	117	120,7	111,1
Poids de la tare :	1,9	1,9	1,9
Poids de l'eau :	1,9	1,9	1,9
Poids du sol sec :	98	101,7	93,1
Teneur en eau :	11,22	11,11	93,3
Moyenne :	11,47	12,66	92,8
L'opérateur	1,92	1,94	97,2
		Visa du responsable	15,3
			15,22
			15,26

ESSAI PROCTOR
MODIFIÉ

NF P 94-093 September 1997

NORMAL

Structure :

N°Dossier interne :

Echantillon :

Prise d'essai : (T.U.F. + 30% de balle)

Lieu de travail :

Température de séchage :

Teneur en eau Opm :

Densité sèche Max :

Date :

Opérateur :

Poids d'eau ajoutée :	510	10,10	12,60
Poids total humide :	8082	8612	8430
Poids du moule :	3652	3866	3866
Poids du sol humide :	4430	4746	4564
Poids du sol sec :	4101,85	4314,54	4075
Volume du moule :	2104	2104	2104
Densité sèche :	1,95	1,93	1,93
N° de la tare :	119	451	551
Poids total humide :	124	122	121
Poids total sec :	13,8	12,5	12,7
Poids de la tare :	100	105	103
Poids de l'eau :	10,2	10,5	10,3
Poids du sol sec :	9,8	9,5	9,5
Teneur en eau :	10,64	10,05	10,41
Moyenne :	10,34	12,44	14,28
L'opérateur	1,91	2,01	Visa du responsable 1,94

F-5554.02

LABORATOIRE DES TRAVAUX PUBLICS DU SUD

NORMAL

ESSAI PROCTOR

MODIFIE



NF P 94-093 Septembre 1997

Structure: U.GHARDAIA

N° Dossier interne :

Echantillon: *Sabre*

Prise d'essai: 5000 g

Lieu de travail: SERVICE COTROLE

Température de séchage: 55C°

Teneur en eau Opm:.....

Densité sèche Max:.....

Date:

Opérateur:

Équipements utilisés: balance - étuve - dame p

N° D'inventaire: L21.51.15/L49.10.15/L54.03.15

Poids d'eau ajoutée :	% 8	% 10	% 12	% 14	14 %
Poids total humide :	7417,1	7867,6	8019,4	8034,5	8098,7
Poids du moule :	3795	3892	3866	3866	3866
Poids du sol humide :	3622,1	3975,6	4153,4	4168,5	4232,7
Poids du sol sec :	3353,79	3614,18	3708,39	37656,58	3772,89
Volume du moule :	2104	2104	2104	2104	2104
Densité sèche :	1,59	1,71	1,76	1,73	1,76
N° de la tare :	GR	CO	A1	C6	MS
Poids total humid :	58,5	55,1	61	55,4	70,3
Poids total sec :	55	51,8	56	51,5	64
Poids de la tare :	8,5	8,4	8,3	8,4	8,4
Poids de l'eau :	3,5	3,3	3,5	3,9	6,3
Poids du sol sec :	46,5	43,4	47,7	43,1	55,6
Teneur en eau :	7,53	7,6	10,48	9,65	11,33
Moyenne :	7,565	9,765	11,465	11,465	10,02

L'opérateur

Visa du responsable

1,73

F-5-5q.0



إذن بالإيداع (مذكرة ماستر)

بعد الاطلاع على التصحيحات المطلوبة على محتوى المذكرة المنجزة من طرف الطلبة التالية:
أسماؤهم:

1. الطالب (ة): نور الدين عبد الرحمن
2. الطالب (ة): لين ليلى محمد

تخصص: هندسة مدنية - هيكل

نمنح نحن الأساتذة:

الامضاء	الصفة	الرتبة-الجامعة الأصلية	الاسم و اللقب
	رئيسا		د.وحى عبد الله
	مفتاح		لشرين هليلة
	مؤطر	M.A	د.سليمان حميم

الإذن لإيداع النسخة النهائية لمذكرة الماستر بعنوان:

*l'influence de l'agent de saumure d'une
sur les caractéristiques physiques et mécaniques du sable
dans la dune Souterraine (Région de Ghardaïa)
رئيس القسم*

