



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

Département de génie civil

N° d'enregistrement

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

Master

Domaine : Sciences et Technologie

Filière: Génie civil

Spécialité: structure

Thème

**Influence de l'ajout de LHR sur le
comportement mécanique d'un mélange
sable concassé-sable de dune**

Présenté par : BENRITAB Abdesslem

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

Devant le jury composé de:

DAHEUR EL HADJ GUESMIA

MCA

Université

EXAMINATEUR

LAROU ABDELBASETE

MAA

Université

EXAMINATEUR

NESSIL HAMID

MAA

Université

ENCADRANT

Année universitaire : 2021/2022

Dédicace

Je dédie ce mémoire de fin d'études

A Ma très chère mère

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

A Le meilleur papa

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

A mes très chères sœurs Aïcha et leur petite famille, yassmin , Les mots ne suffisent guère pour exprimer l'attachement, l'amour et l'affection que je porte pour vous

A mes potes

Abderrahman Aziz righi ..houari atalah as toujours été présente dans le travail de ce mémoire malgré la distance je te souhaite un avenir plein de joie et de bonheur

A ma deuxième maman Fatiha dadouche as toujours été présente pour les bons conseils.

Benritab abdesslem

Remerciement

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

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

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

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

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

Résumé

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

L'objectif principal de ce travail est l'étude des potentialités de valorisation de sable concassé de la région zelfana la wilaya de Ghardaïa et le sable de dune d'Oued metlili avec une amélioration de ciment liant hydraulique route pour une utilisation dans la construction des routes sahariennes. Une

première phase expérimentale consacrée à l'étude d'identification de notre matériau, puis le classer. La deuxième phase expérimentale consiste à étudier les effets de traitement par la ciment LHR , l'objectif c'est d'améliorer les caractéristiques physico-mécaniques de notre matériau, en vue de répondre à certains critères géotechniques pour leur utilisation en corps de chaussées dans les zones Saharienne.

Enfin, Les résultats obtenus ne semblent pas être suffisants pour confirmer ou infirmer, d'une manière décisive et définitive, mais l'utilisation du ciment elle donne un bon résultat.

ملخص

أمام الظروف الاقتصادية الصعبة التي من خلال الجزائر، وتقييم المواد المحلية لتلبية احتياجات المناطق الفقيرة من المواد النبيلة، يبدو الحل الأنسب للتعامل مع الاستهلاك المفرط مواد نبيلة.

الهدف الرئيسي من هذا العمل هو دراسة إمكانية تثمين الرمل المسحوق من منطقة زلفانة وولاية غرداية وكثبان الرمل في واد متليلي مع تحسين الاسمنت الهيدروليكي الرابط للطرق لاستخدامه في تشييد الطرق الصحراوية. المرحلة التجريبية الأولى المكرسة لدراسة تحديد المواد الخاصة بنا، ثم تصنيف. تتكون المرحلة التجريبية الثانية من دراسة آثار العلاج بأسمن **LHR** ، والهدف هو تحسين الخصائص الفيزيائية الميكانيكية لموادنا ، من أجل تلبية معايير جيوتقنية معينة لاستخدامها على أنها الطرق في المناطق الصحراوية.

أخيراً، لا يبدو أن النتائج التي تم الحصول عليها كافية لتأكيد أو إبطال، من ناحية، بطريقة حاسمة ونهائية ولكن استخدام الأسمنت يعطي نتيجة جيدة

Abstract :

Summary.

In front of the difficult economic conditions that through Algeria, the valuation of local materials to meet the needs of regions poor in noble materials, seems the most appropriate solution to deal with the excessive consumption of noble materials.

The main objective of this work is the study of the potential for valorization of crushed sand from the zelfana region, the wilaya of Ghardaïa and the dune sand of Oued metlili with an improvement in the road hydraulic binder cement for use in road construction. A first experimental phase devoted to the identification study of our material, then the to classify. The second experimental phase consists in studying the effects of treatment with LHR cement, the objective is to improve the physico-mechanical characteristics of our material, in order to meet certain geotechnical criteria for their use as roads in Saharan areas.

Finally, the results obtained do not seem to be sufficient to confirm or invalidate, on the one hand, decisive and definitive way, but the use of cement it gives a good result.

Table des matières

Sommaire

Dédicace

Remerciement

Résumé

Sommaire

Liste des tableaux

Liste des Figures

Liste des photos

INTRODUCTION GENERALE

CHAPITRE 1 : REVUE BIBLIOGRAPHIQUE SUR LES GRANULATS, mélange ET MORTIER

1.1.	Introduction	3
1.2.	Classification des granulats	3
1.3.	Sable	3
1.3.1	<i>Sable de dune</i>	4
1.3.2.	<i>Mécanismes de formation</i>	5
1.4.	Physique des dunes	5
1.5.	Classification des sables	6
1.5.1.	<i>Granulométrie</i>	6
1.6.	Critères d'acceptabilité des sables pour leur emploi en construction.....	7
1.6.1.	<i>Intérêt de sable de dune</i>	7
1.6.2.	<i>Les aspects économiques</i>	7
1.6.3	<i>Les aspects techniques</i>	7

Table des matières

1.6.4.	<i>Sable de carrière</i>	7
1.6.5.	<i>Fabrication des graviers et sable concassés</i>	8
1.6.6.	<i>La dépendance des sables concassés de la roche maternelle</i>	8
1.6.7.	<i>La technique routière saharienne (TRS)</i>	9
1.6.8.	Principes de la technique routière Saharienne.	9
1.7.	Traitement des sables	12
1.8.	Utilisation des Tufs en technique routière Erreur ! Signet non défini.	
1.8.1	<i>DEFINITION</i>	14
1.8.2.	<i>Types de mortier</i> Erreur ! Signet non défini.	
1.9.	Terrassements	16
1.9.1.	<i>Couche de fondation</i>	16
1.9.2.	<i>Couche de base</i>	16
1.9.3.	<i>Couche de roulement</i>	17
1.10.	CONCLUSION	22

Chapitre II: Méthodes d'essais et matériaux utilisés

2.1	INTRODUCTION.....	24
2.2	Caractéristiques des matériaux	24
2.2.1	<i>Le sable</i>	24
2.3.	ETUDE D'IDENTIFICATION GEOTECHNIQUE	24
2.3.1.	<i>Analyse granulométrique et sédimentométrie</i>	24
2.3.2.	<i>Coefficient d'uniformité et coefficient de courbure d'une courbe granulométrique.</i>	26
2.3.3.	<i>Teneur en eau (NF P 94-050)</i>	26
2.3.4	<i>Domaine d'application</i>	26
2.3.5.	<i>Limites d'Atterberg</i>	26
2.3.6.	<i>Définition</i>	26

Table des matières

2.3.7. <i>Indice de plasticité Ip</i>	27
2.3.8. <i>Indice de consistance Ic</i>	27
2.4. Valeur au bleu de méthylène.....	28
4.1. <i>Bute</i>	28
4.2. <i>Essai d'équivalent de sable</i>	28
2.5. MASSES VOLUMIQUES DES GRANULATS.....	29
2.5.1. <i>Masse volumique apparente</i>	29
2.5.2. <i>Masse volumique absolue: (Ghomari, 2008)</i>	30
2.6. Les Essais d'état (essais mécaniques d'identification).....	31
2.6.1. <i>L'essai Proctor</i>	31
2.7. L'indice portant californien CBR :.....	32
2.8. Essai au bleu de méthylène.....	34
2.9. Classification des sols selon la valeur de VB.....	36
2.10. Essai de compression simple.....	36
2.11. Conclusion.....	38

Chapitre III38: Résultats et Discussions

3.1 Introduction.....	38
3.2 PRESENTATION DES MATERIAUX ETUDIES :.....	38
3.1 <i>Le sable concasse 03</i>	38
3.2 <i>Le sable de dune</i>	38
3.3 ETUDE D'IDENTIFICATION GEOTECHNIQUE :.....	39
3.3.1 <i>Analyse granulométrique</i> :.....	39
3.3.2 <i>Analyse granulométrique par tamisage</i> :.....	39
3.3.3 <i>Analyse granulométrique par sédimentometrie</i> :.....	40
3.4 Qualité des fines :.....	44
3.4.1 <i>Les limites d'Atterberg</i>	44
3.4.2 <i>Essai d'équivalent de sable</i>	44

Table des matières

3.4.3	<i>Essai au bleu de méthylène</i>	46
3.4.4	<i>Essai de compactage et de portance</i>	47
3.4.5	<i>Essai Proctor Modifié</i>	47
3.4.1	<i>Essai CBR</i>	50
3.4.2	<i>Essai de compression simple</i>	51
3.4.3	<i>Analyse chimique</i>	53
3.5	RECAPITULATIF DES ESSAIS D'IDENTIFICATION	53
3.6	CLASSIFICATION.....	55
3.6.1	<i>Classification GTR</i>	55
3.6.2	<i>Classification TRS (technique routière saharienne)</i> :.....	56
3.7	TRAITEMENT DE SABLE DE DUNE PAR L'AJOUT DE SABLE CONCASSE :	56
3.7.1	<i>Essai Proctor modifié</i>	56
3.7.2	<i>Etude de l'influence du traitement au laboratoire avec le ciment LHR</i>	57

CONCLUSION GENERALE

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Liste des tableau

Liste des tableaux

	Désignation	Page
Tableau I.1	Classification GTR (SETRA-LCPC 1980)	12
Tableau II.1	Classification de l'argilite d'un sol selon l'indice I_p	27
Tableau II.2	État de sol en fonction de I_c	27
Tableau II.3	Les conditions de l'essai Proctor et modifié	32
Tableau II.4	Classification des sols selon la valeur de VB.	35
Tableau III.1	Résultats récapitulatifs de l'analyse granulométrique du tuf de concassage zelfana et le sable de dune oued metlili.	43
Tableau III.2	Classes de granulométrie des sols	44
Tableau III.3	Donne les valeurs de ES pour nos échantillons.	46
Tableau III.4	Représente les valeurs de bleu de nos échantillons	47
Tableau III.5	Classification des sols selon la valeur de VB.	47
Tableau III.7	Caractéristiques optimales de Proctor modifié	49
Tableau III.8	Caractéristiques de compactage pour quelques matériaux routiers (Gandil P. 1988).	50
Tableau III.9	Résultats de l'essai de la portance	47
Tableau III.10	Résultats de l'analyse chimique sommaire de sable concasse et de sable de dune.	49
Tableau III.11	Résume les caractéristiques géotechniques et mécaniques de sable concasse de zelfana et de sable de dune de oued metlili	50
Tableau III.12	Résultats de l'essai Proctor modifié.	57

Liste des tableaux

Tableau III.13 Résultats de l'essai Proctor modifié.

59

Liste des figures

Liste des Figures

Liste des Figures

	Désignation	Page
Figure I.1	La barkhane.	5
Figure I.2	Morphologie de la barkhane	6
Figure I.3	Unité de concasseur a sable complète pour production de sable	8
Figure I.4	Fuseau de spécification de la technique routière saharienne (Frenzy, 1966)	11
Figure I.5	Coupes transversales d'une chaussée	17
Figure I.6	Poudre de ciment	19
Figure I.7	Procédure de fabrication du ciment	19
Figure I.8	Microphotographie D'un clinker.	20
Figure I.9	Ciment liant hydraulique routier	21
Figure II.1	Analyse granulométrique par tamisage.	25
Figure II.2	Exemples des courbes granulométriques	25
Figure II.3	Entrain de préparer ES (LTPS)	29
Figure II.4	L'essai d'équivalent de sable	29
Figure II.5	L'essai de la masse volumique apparente	30
Figure II.6	L'essai la masse volumique absolue	31
Figure II.7	L'essai de proctor	31
Figure II.8	L'éprouvette sous la dame de cbr	33

Liste des Figures

	Désignation	Page
Figure II.9	L'appareille cbr	33
Figure II.10	L'essai bleu méthylène	34
Figure II.11	L'appareille de l'essais	34
Figure II.12	Schéma du dosage de l'essai du bleu méthylène	34
Figure II.13	Moules de confection.	36
Figure II.14	L'éprouvette soumis à l'essais de compression jusqu'à la rupture.	36
Figure III.1	Courbe granulométrique de sable concasse et le sable de dune.	42
Figure III.2	Courbe Proctor de sable concasse et sable de dune.	48
Figure III.3	Variation de la pression du piston en fonction de son enfoncement (Sable concasse 03).	51
Figure III.4	Classification des sols fins selon GTR	55
Figure III.5	Courbe Proctor modifié des mélanges (.sable de dune +sable concasse)	56
Figure III.6	Ciment LHR	58
Figure III.7	Mélange de SD+SC+LHR	58
Figure III.8	Courbe Proctor modifié des mélanges (.sable de dune +sc+ciment lhr) d'après la figure III.9	59

Liste des photos

Liste des photos

	Désignation	Page
Photo III.1	Carrière de sable zelfana	38
Photo III.2	Sable de dune de oued mtlili.	39
Photo III.3	Matériel de Proctor modifié. Ok	48
Photo III.4	Presse CBR pour poinçonnement et écrasement Des éprouvettes de compression simple.	50
Photo III.5	presse cbr	52
Photo III.6	Presse hydraulique.	52

Introduction générale

INTRODUCTION GENERALE

Contexte général de la recherche :

Le sud de l'Algérie est connu pour ses dunes de sable, qui ornent les cartes postales et sont des destinations touristiques, mais aussi qui englobent les terres et les palmeraies et envahissent certaines oasis. De nombreux chercheurs, dans des thématiques scientifiques diverses, cherchent à exploiter ce type de sable, propre et présent à l'abondance. Son utilisation pourrait être liée à sa très forte teneur en silice, matériau à la base d'applications dans l'électronique et l'optique par exemple. En génie civil, ce sable présente aussi un grand intérêt économique et environnemental pour l'Algérie. En effet, la hausse de la demande du sable de construction en Algérie, l'incapacité des carrières algériennes à fournir du sable fin et l'arrêt programmé de l'utilisation du sable de plage, qui conduit à un grand problème écologique et touristique pour l'Algérie, sont autant de raisons qui poussent à poursuivre l'exploitation de ce produit

Les dix dernières années L'Algérie à connue une explosion dans le domaine de la construction des bâtiments, des infrastructures, des ouvrages d'art, la construction de routes et de 1300km d'autoroute pour répondre aux besoins toujours en hausse des citoyens et le développement du payé, alors de gros approvisionnements en matériaux sont exigés, les sables roulés alluvionnaires sont les plus couramment utilisés pour la confection des bétons et mortiers entrant dans ces ouvrages, les prélèvements excessifs de ces sables risque fortement de contribué à l'épuisement des ressources et de provoqué des retombées néfastes sur l'environnement.

Le même problème se pose dans plusieurs régions du monde et vivent la même situation et doivent aujourd'hui chercher des matériaux de substitution pour faire face à la demande croissante en granulats pour mortier et béton. Les sables de concassage présentent sans aucun doute la meilleure alternative. Il faut cependant qu'ils répondent aux critères de qualité propres à cet usage et être disponibles en quantités suffisantes, à prix raisonnables. Toutefois, les sables issus des carrières sont souvent considérés par les utilisateurs comme des « déchets », car ils sont riches en fines, parfois argileuses au demeurant. Ils sont alors quasi systématiquement écartés pour un usage dans les bétons, bien que les spécifications d'emploi le permettent dans de nombreux cas.

En Algérie, des agrégats fins naturels ont été traditionnellement utilisées dans les mortiers et bétons. Cependant, de plus en plus de restrictions environnementales relatives à l'exploitation du sable de rivières et du sable de dune ont donné lieu à une recherche de matériaux alternatifs pour produire des granulats fins, en particulier près des grandes zones d'extension de grande agglomération et villes. Les granulats fins issus de la fabrication des graviers par les centrales de concassages (carrières) sont alors apparus comme une alternative intéressante aux agrégats fins naturels (sable de dunes) pour la fabrication des mortiers de ciment et de différentes sortes de bétons

Introduction générale

Les propriétés du sable affectent la durabilité et la performance du mortier. Comme les granulats fins sont le composant essentiel du mortier, la forme et la texture des particules de sable concassé pourrait conduire à l'amélioration de la résistance du béton grâce à l'angularité et la rugosité des particules qui offrent un meilleur mode de serrage et une meilleure adhérence pâte ciment particules [6,8

Plusieurs études ont été effectuées sur les mortiers afin de savoir leurs formulations et de déterminer leurs caractéristiques et leurs comportements rhéologique ces études ont pu prouver que le mortier à base de sable de dune pourrait remplacer avantageusement le mortier ordinaire dans certains secteurs des routes et des travaux publics.

L'objectif de ce travail est la valorisation de sable de dune par la correction de sa granulométrie afin de l'exploiter pour la fabrication dans le domaine routier. Pour atteindre cet objectif plusieurs essais ont été réalisés sur le mélange pour examiner son aptitude de l'utiliser dans le secteur des routes.

Dans notre étude la correction de la granulométrie de sable de dune, qui est généralement mal étalée, a été faite par l'ajout des sables concasse 03 de la concassage de zelfana . La formulation des mélanges adoptée se base sur le mélange entre le sable de dune par des déférentes quantités des sables concassages.

Intérêts de la recherche

☒ *Intérêt général*

L'intérêt premier de cette recherche est la valorisation des sables de dune pour la fabrication d'un mélange améliorer par le ciment LHR en route, avec ou sans super plastifiant, en tant que ressource alternative aux sables alluvionnaires surexploités. Ainsi, les ressources alluvionnaires encore disponibles pourront être préservées pour les usages les plus noble (bétons performants par exemple) [9, 15, 17]

Nous nous sommes donc intéressés à la valorisation de ce type de sable. Compte tenu de sa granulométrie, de sa morphologie, de sa propreté et de sa dureté, nous nous sommes focalisés sur sa valorisation dans les routes . Nous pouvons raisonnablement penser que le remplacement d'une partie de sable de dune par le sable concassé permet d'améliorer les caractéristiques le mélange en route et de contribuer à la préservation de la nature des fines générer par les carrières.

D'autre cote en martiaux On propose aussi d'utiliser le sable mixte (de concassage et de dune) pour la réalisation des routes, l'idée innovante étant que les sables calcaires fillérisés apportent directement la majeure partie des fines nécessaires au mélange. Incidemment, il s'agit également d'améliorer la durabilité de mélange actuels car les sables alluvionnaires utilisés sont généralement pauvres en fines (lavage) .

***Synthèse
bibliographique***

CHAPITRE 1 : REVUE BIBLIOGRAPHIQUE SUR LES GRANULATS, mélange ET MORTIER

1.1. Introduction

Dans ce chapitre, on présente une revue générale en ce qui concerne les propriétés principales des granulats, notamment des granulats fin (sable), des adjuvants chimiques et quelques notions sur les mortiers dans lesquels les sables et les adjuvants sont souvent utilisés. Cela concerne l'objectif de cette présente thèse.

Granulats :

1.1 Classification des granulats

Les granulats sont classés en catégories en fonction de leurs dimensions. Les règles AFNOR recommandent la classification et les appellations suivantes en fonction des diamètres des trous de passoire pour tamisage. [20-24

-Farine, fines ou filler - 0 - 0,1mm; -Sable fin - 0,1 – 0,4mm; -Sable moyen - 0,4 - 1,6mm; -Sable gros - 1,6 - 6,3mm; -Gravillons (graviers) petit - 6,3 - 10 mm; -Gravillons moyens - 10 - 16 mm; -Gravillons gros - 16 - 25 mm; -Pierre concassée (matériaux de concassage) et cailloux (matériaux roulés) petits - 25 - 40 mm; - Pierre concassée (matériaux de concassage) et cailloux (matériaux roulés) moyens - 40 - 63 mm; - Pierre concassée (matériaux de concassage) et cailloux (matériaux roulés) gros - 63 - 100 mm.

Cette classification s'avère très détaillée et la limite de séparation du sable (granulat fin) et du gros granulat (gravier) est 6,3 mm. Dans la pratique actuelle cette limite est fixée à 5 mm [20-21-24].

1.2. Sable

On appelle couramment sables les matériaux dont le diamètre maximal est inférieur à 6,3mm et dont le passant à 80 microns n'excède pas 35%. A cette définition se rattachent les sables de concassage mais lorsque l'on parle "sables" on pense essentiellement aux sables naturels ; ces derniers sont abondant dans de nombreux pays où les réserves sont quasi inépuisables

Les sables ainsi disponibles sont le résultat d'un processus souvent complexe d'érosion et de sédimentation comportant à des degrés divers une décomposition sur place des différentes roches suivis d'un transport fluvial et par fois éolien. En règle générale, les différents processus qui conduisent de la roche massive aux sables sont suffisamment Agressive vis-à-vis des minéraux pour que seul subsistent les

plus résistants ; c'est ainsi que la plus grande partie des formations sableuses est constituées de quartz devient de plus en plus abondant à mesure que la taille des grains décroît.

C'est ainsi que la fraction comprise entre 0,2 et 0,5mm est le plus souvent constituée de quartz à plus de 75%. Selon l'importance et la nature de leur transport, ces grains de sable peuvent présenter un aspect différent

- grains émoussés et luisants (usure due au déplacement par l'eau)
- grains ronds et mats (déplacement par le vent) ;
- grains non usés.

On distingue les différents types de sable suivants.

i/ sable de dune : C'est une variété de sable de mer de qualité médiocre, car il est constitué d'éléments très réguliers et très fins.

ii/sable de carrière: Exploité à la carrière, souvent il contient de l'argile qui enrobe les grains de sable et empêchent ainsi la bonne adhérence pour remédier. Il faut un lavage pour débarrasser le sable des poussières et impuretés..

iv/ sable de rivière : Il est extrait par dragage du lit des cours d'eau. En général il est propre, mais il faut éviter que la fraction fine du sable soit emportée par le courant d'eau lors du dragage. Car le manque de la partie fine augmente la quantité du ciment dans le béton ou mortier

v/Sable artificielle: c'est un sable de broyage ou de concassage obtenu à la centrale de concassage en broyant des roches dures, des tuiles, des briques et des scories (sous produits des hauts fourneaux)

Le sable de dune est un sable naturel et le sable de carrière est appelé concassé qui font l'objet d'étude de cette présente thèse

1.3.1 Sable de dune

Le sable de dune est le résultat d'une érosion et d'une sédimentation de différentes roches suivies d'un transport fluviatile et parfois éolien. La plus grande partie des formations sableuses est constituée à partir du quartz. Il se caractérise par une granulométrie fine et très serrée [51].

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 [2].

1.3.2. Mécanismes de formation

Les dunes se forment dans des zones où le sable est abondant et non fixé par la végétation (désert, plage, lit fluvial à l'étiage). Le sable est érodé et pris en charge par le vent (déflation). Il est transporté aux ras du sol par saltation, puis s'accumule quand la compétence du vent chute (versant sous le vent). Une dune peut se déplacer par érosion du versant au vent et accumulation sur le versant opposé [2].

☒. Types des dunes

Les avant-dunes (fore dune pour les anglophones), qui sont des bourrelets plus ou moins fixés par la végétation (oyats par exemples), parallèles au trait de côte et solidaire de la plage, c'est à dire échangeant du sable avec elle, dans un même système sédimentaire. À ne pas confondre avec une ancienne arrière dune en cours d'érosion, ou avec une dune formée par du sable venant de terre sur un secteur ou un avant-dîner actif ne pourrait pas se former. En Espagne et en Tunisie, ces avant-dunes sont systématiquement considérées comme faisant partie du domaine public maritime, ce qui facilite leur protection. L'avant dune se forme à partir de fixation du sable en haut de plage, par des plantes pionnières spasmophiles [2].

. **Les falaises dunaires** (dune Cliff pour les anglophones) n'est pas une vraie dune mais un profil résultant de l'érosion marine d'une dune ancienne fixée par une pelouse ou un boisement qui ont été à l'origine de la formation d'une couche d'humus ou de sol sableux [2].

Les dunes perchées (Cliff-top dune pour les anglophones), qui apparaissent au sommet d'une falaise vive ; alimentée en sable par le vent à partir de l'estran, voire à partir du profil de pente, quand il s'agit d'une falaise dunaire [2]

1.3. Physique des dunes

Nous connaissons tous, au moins par des photos ou les images de télévision, les étendues Majestueuses de dunes ressemblant à une mer de sable dans le désert. Leurs formes répétitives modelées par le vent couvrent d'immenses surfaces et leurs menacent aussi bien les zones de cultures que les routes ou même les villes. Malgré cela, le mouvement des dunes était encore très mal compris [2].



Figure. I.1. La barkhane.

Une barkhane est une dune de la forme d'un croissant allongé dans le sens du vent. Elle naît là où l'apport de sable est faible et sous des vents unidirectionnels. Le vent fait rouler le sable pour qu'il remonte la pente du dos de la dune jusqu'à la crête et vienne former de petites avalanches sur le versant plus pentu du front. Ce phénomène fait avancer la dune [2].

Les dunes les plus simples ont une forme de croissant et portent le nom arabe de barkhane (voir figure. 1.1). Elles se forment dans des conditions particulières avec des volumes de sable limités et se déplacent sur un substrat stable sous l'action d'un vent qui vient toujours de la même direction. Leur crête sépare le dos de la dune, incliné de 5 à 20° et le front nettement plus raide (32 à 35°) qui se prolonge par deux cornes dans la direction du vent (voir fig. 1.2) [2]

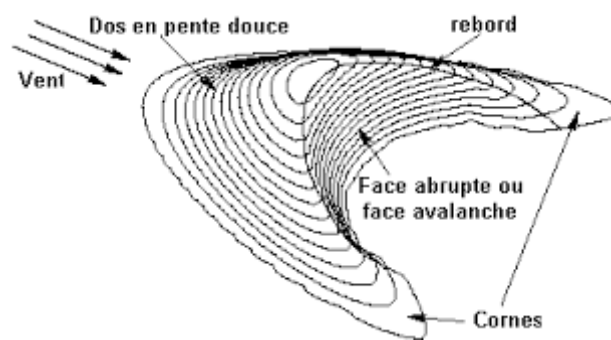


Figure. 1.2. Morphologie de la barkhane [2]

1.4. Classification des sables

On peut classer les sables selon trois paramètres dont :

1.4.1. Granulométrie

Elle permet de séparer les sables en trois catégories

- **Sables fins** : plus de 75% des éléments supérieurs à 80µm, sont inférieurs à 0,5mm. Ces sables doivent être notablement corrigés pour acquérir des propriétés comparables à celles des graves.
- **Sables moyens** : Moins de 20% des éléments sont supérieurs à 2mm et plus de 50% des éléments supérieurs à 80µm sont compris entre 0,2 et 2mm.
- **Sables grossiers** : Plus de 20% des éléments sont supérieurs à 2mm et plus de 50% des éléments supérieurs à 80µm sont compris entre 0,5 et 5mm. Ces sables ont des propriétés qui se rapprochent des graves [3].

1.5. Critères d'acceptabilité des sables pour leur emploi en construction

L'Algérie est un gros consommateur de granulat. Cette consommation s'accroît d'une année à l'autre. Les gros granulats ont tendance à être épuisés dans certaines régions. D'autres régions ne disposent plus de ce matériau. Par ailleurs, notre pays, est notamment le sud algérien, dispose de grands gisements de sables de différents natures (de dune, alluvionnaires et de concassage), ainsi que de grands gisements de fines naturelles et

Artificielles. La réflexion sur l'élaboration de nouveaux bétons tels que les bétons de sable ou de mortier est donc devenue nécessaire [6].

Ce type de sable pourrait bien constituer le squelette d'un béton pour peu que sa formulation soit judicieusement étudiée. Le sable de dune était utilisé depuis longtemps dans l'exécution des travaux de remblais, de fondations et les travaux routiers [6].

De nombreux chercheurs, dans des thématiques scientifiques diverses, cherchent à exploiter ce type de sable, propre et présent à l'abondance. Son utilisation pourrait être liée à sa très forte teneur en silice, matériau à la base d'applications dans l'électronique et l'optique par exemple, en génie civil, ce sable présente aussi un grand intérêt économique et environnemental [6].

1.5.1. Intérêt de sable de dune

L'intérêt d'utilisation de tels agrégats se situe à deux niveaux : technique et économique.

1.5.2. Les aspects économiques

Les aspects ont évidents dans la mesure où l'utilisation du sable de dune permet une économie certaine dans le transport des matériaux, puisqu'il est partout disponible en quantité inépuisable Par ailleurs, son extraction n'engendre pratiquement pas de frais supplémentaires et son mélange avec les autres matériaux sur chantier peut se faire facilement [6].

1.5.3. Les aspects techniques

- Le sable peut contribuer à la densification des matériaux. Ceci permet, par la même occasion, l'amélioration de leurs caractéristiques géotechniques en augmentant le frottement interne et en améliorant la portance.

- Il peut être utilisé pour diminuer la plasticité des matériaux de base [6]

1.5.4. Sable de carrière

Les matériaux de carrières calcaires sont des granulats concassés anguleux. Il est souvent admis que leur utilisation dans le béton et les constructions des routes permet d'obtenir des résistances mécaniques plus élevées, par effet de blocage mécanique

du système, du moins si leur résistance intrinsèque le permet. Cependant, l'usage montre qu'ils demandent une quantité d'eau

(efficace) plus élevée qu'avec des granulats roulés, à cause notamment de la baisse de compacité associée à leur forme, leur angularité et à leur rugosité.

Généralement, les sables de concassage présentent une bonne distribution granulaire, comparativement aux sables de rivières lavés qui manquent souvent des fines. Les classes granulaires de la plage [0,1 - 0,5 mm] présentes dans les sables de concassage sont essentielles à la stabilité du béton frais [53].

1.5.5. Fabrication des graviers et sable concassés

Dans la nature la décomposition des roches peut-être naturelle sous l'action des éléments climatiques (gel, ruissèlement des eaux). Pour la décomposition artificielle, on choisit alors des affleurements d'un accès facile que l'on abat par tranches verticales de 3 à 6m de haut au moyen d'explosifs. Les débris d'explosion sont morcelés au marteau piqueur, puis envoyés dans des concasseurs successifs qui les réduisent à la grosseur voulue. Les produits concassés sont tirés les passoirs tournants appelés trommels et les éléments trop gros sont retournés aux concasseurs. On obtient ainsi des graviers de différentes fractions et du sable concassé.[24]



Figure 1.3. Unité de concasseur à sable complète pour production de sable

1.5.6. La dépendance des sables concassés de la roche maternelle

Le sable concassé dépend de la roche maternelle en composition chimique, minéralogique, description pétrographique, dureté, stabilité physique et chimique et même de la couleur. Mais les autres propriétés sont différentes de la roche maternelle la forme, la texture de la surface, l'absorption d'eau,...etc. [20]

Les granulats en générale et le sable en particulier doivent provenir des roches :

- Stables, c'est-à-dire inaltérables à l'air, à l'eau et au gel. Ce qui exclut les roches feldspathiques et les schistes;

- Dures et n'ayant pas tendance à se feuilletter (comme nombreux, calcaires et schistes). Inattaquables par les ciments (certaines roches alcalines sont attaquées par les ciments alumineux).[24].

1.5.7. La technique routière saharienne (TRS).

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

1. L'immensité des territoires, dont la superficie totale avoisine 1 500 000 km² ;
2. Les très longues distances de parcours qui relient les agglomérations et centres de vie (énormes investissements que nécessite la construction des milliers de km) ;
3. Le caractère désertique et aride prédominant, les périodes humides étant courtes, l'imbibition de la chaussée n'est pas à craindre car trop improbable.
4. Les très faibles trafics automobiles recensés sur le réseau qui est composé essentiellement de camions gros-porteur ;

Et établir une propre spécification nommée la Technique Routière Saharienne (TRS) (établie en 1965, lors du 1er congrès de la route déroulé à Béni-Abbés).

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

1.5.8. Principes de la technique routière Saharienne.

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

- A cause de faible trafic qui est composé essentiellement de camions gros-porteur ; les déflexions sous les pneus peuvent être grandes ; mais doivent être entièrement réversibles et ne pas laisser de trace de déformation permanente ;
- La forme et l'état de la surface doivent faciliter l'écoulement des eaux pluviales afin de réduire les risques d'imbibition
- Le problème des chotts et cuvettes doit être dissocié de la technique saharienne et considéré comme une exception.

Les conséquences pratiques des idées générales sont :

- La couche de roulement doit être suffisamment souple pour se plier sans se rompre

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

5.4.2 Domaine d'application

Cette technique n'est donc applicable que :

- Sous un climat très sec (moyenne annuelle des pluies < 100 mm) et dans les conditions telles que les risques d'imbibition des sols sous chaussées soient très réduits .
- Pour un trafic prévisible relativement faible. Cette technique, a permis d'établir un fuseau discriminant propre à ces matériaux : le fuseau dit « Saharien » ou « fuseau de Béni Abbés » (Figure I-2), qui est une adaptation locale du fuseau de référence AASHO. Le fuseau permet de partager l'espace granulométrique en trois zones, définissant ainsi trois familles de matériaux.

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

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

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

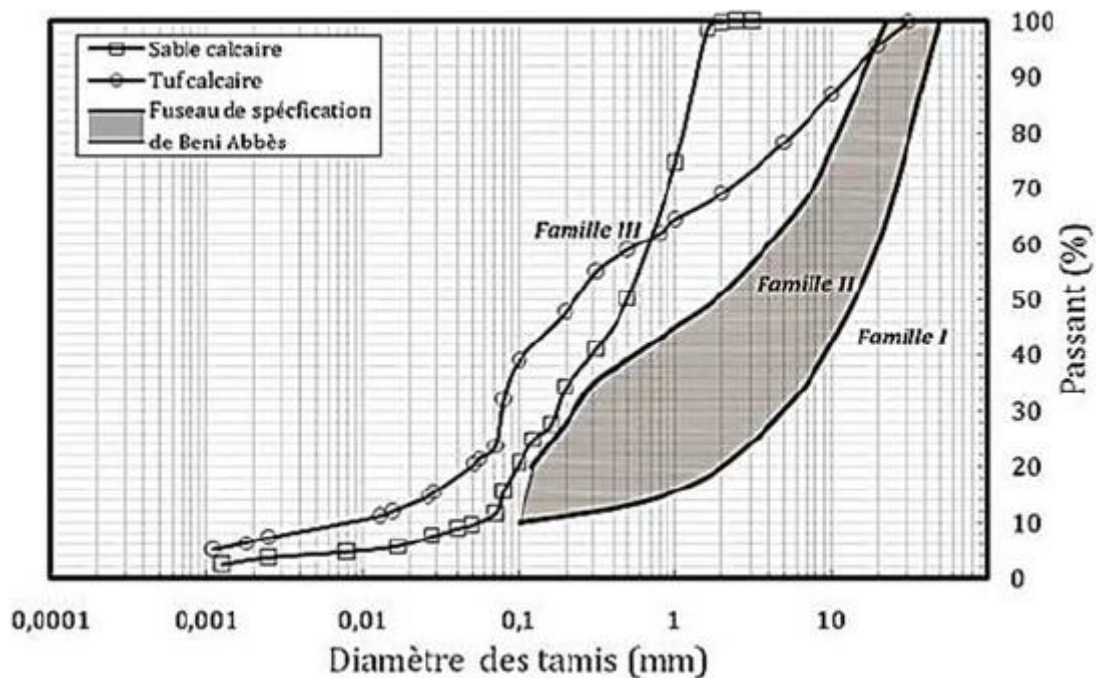


Figure I-4 : Fuseau de spécification de la technique routière saharienne (Frenzy, 1966)

Le guide technique routière (GTR) :

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

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

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

• Cas particulier des sols fins :

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

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

- Son argilo site ;

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.

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...)

Tableau I-1 : Classification GTR (SETRA-LCPC 1980)

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

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

1.6. Traitement des sables

Le traitement du sable consiste à le faire débarrasser de ces éléments nuisibles à sa qualité c'est-à dire le faire débarrasser des impuretés des éléments poussiéreux, **argileux**, vaseux, des sels, des sulfates, mica, ...etc.

Afin d'obtenir un sable de qualité fiable et de composition granulométrique acceptable, et parmi les méthodes de traitement nous citons : Méthode de lavage, méthode de ventilation et méthode de mélange de sables

- **Méthode de lavage**

Cette méthode consiste à éliminer une partie des grains fins c'est-à-dire éliminer l'excès de filler et diminuer le taux d'impureté existant dans le sable. Cette méthode présente des avantages et des inconvénients. Parmi les avantages on cite : Méthode simple et propre, élimine en même temps les grains fins et les impuretés de toutes natures. Parmi les inconvénients on cite : demande beaucoup d'énergie pour le séchage après lavage et un coût élevé [61].

- **Méthode de ventilation:**

Cette méthode à pour but d'éliminer l'excès de filler et elle présente les avantages et les inconvénients suivants :

- Avantages :

- * Le sable sera utilisé directement après traitement, car il reste à l'état naturel sec;
- * Pas besoin d'eau qui est rare dans certaines régions ;
- * la réalisation est facile et plus rapide par rapport à la méthode de lavage.

- Inconvénients :

- * Elimine uniquement les grains fins mais les impuretés peuvent rester encore dans le sable,
- * Demande beaucoup d'énergie pour faire fonctionner les ventilateurs,
- * Pollution de l'environnement par la poussière [61].

☒ **Méthode de mélange des sables**

Cette méthode de mélange de deux sables est destinée pour l'obtention d'un sable de bonne composition granulométrique si la granulométrie du sable s'avère incompatible (courbe granulaire ne se trouve pas entièrement dans le fuseau de spécification). Il faut l'améliorer en ajoutant les fractions manquantes ou insuffisantes ou en éliminant les fractions superflues. Ceci est difficile à réaliser en pratique pour les grandes quantités de sable aux chantiers, par suite du manque d'équipements nécessaires en particulier les tamis de différentes dimensions.

On utilise souvent la méthode du mélange de deux sables avec un ou deux sables pour obtenir un sable mixte compatible. Alors il faut déterminer la proportion de chaque sable dans le mélange en employant " le diagramme rectangulaire " cette méthode est exposée en détail dans [35].

- **Choix des sables :**

Le choix des granulats (gravier et sable) pour les bétons et mortiers peut-être fait en fonction de plusieurs critères dont les principaux sont :

- La résistance aux ambiances agressives ;
- Les caractéristiques mécaniques (du granulat et de la roche maternelle);
- L'adhérence au liant. [16]

D'après [15], quand le choix est possible, il porte principalement sur la nature minéralogique, la masse volumique, la propreté, la dureté, la forme, la granulométrie et l'altérabilité. En fait dans bien des cas le choix est restreint, du fait de la distance qui sépare le chantier de la carrière et de l'indice de coût du transport sur le prix de revient. Mais il est parfois nécessaire de s'approvisionner à une carrière plus éloignée afin de satisfaire aux exigences des cahiers de charges.

1.6.1. Utilisation des Tufs en technique routière

1.6.2. DEFINITION

La conception et la construction des chaussées en zones désertiques présentent une spécificité évidente liée à la nature du sol, au trafic et au climat.

Avant de présenter les principes de la technique routière saharienne et ses particularités,

Nous proposons un bref aperçu sur quelques aspects du contexte saharien.

1.6.3. DIFFERENTS ASPECTS DU CONTEXTE SAHARIEN :

Le Sahara est un immense espace désertique, aride et peu peuplé, il couvre plus de 3/4 de la superficie du territoire algérien.

Cette zone désertique présente certains aspects liés à la nature du sol, au climat et au trafic, ces caractéristiques ont été mises à profit par les ingénieurs et les techniciens routiers.

1.6.4 Le sol saharien :

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

a) Les roches :

Elles sont anciennes ou récentes et composées le plus souvent de calcaires massifs de grès de tufs d'encroûtements calcaires, gypseux ou mixtes, etc.

b) Les éboulis :

Sont des matériaux accumulés au pied des montagnes, dans les gorges et dans les oueds et formant les ergs. Les éboulis sont formés de fragments de roches ou de granulats de formes et de tailles variables. Leurs dimensions sont d'autant plus faibles qu'ils se trouvent éloignés des montagnes où ils sont formés.

1.6.5 Le climat :

D'après cette classification, le Sahara est caractérisé par une pluviométrie moyenne annuelle inférieure à 100 mm, à la quelle s'ajoutent d'autres paramètres (Touat T. 1994) :

- ▶ Des températures très variables et élevées en été (entre 38 et 45°C);
- ▶ Un écart thermique entre le jour et la nuit (12 à 15.4°C en été et de 9.6 à 15°C en hiver) ;
- ▶ Une extrême sécheresse atmosphérique;
- ▶ Une fréquence des vents de sable;
- ▶ Une rareté et irrégularité des pluies.

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

Mode de construction des routes au Sahara

Le principe d'une assise unique est souvent retenu ; son épaisseur varie entre 15 cm et 30 cm. Elle est réalisée, à chaque fois que c'est possible avec un matériau identique soumis à des normes strictes découlant de la TRS. Lorsque les matériaux performants ne sont pas disponibles en quantité suffisante, les 10 cm inférieurs jouant le rôle de couche de fondation, sont alors réalisés avec un matériau ayant des caractéristiques moins bonnes.; la structure de chaussée se présente alors selon le schéma de la typique représenté par la figure I-6

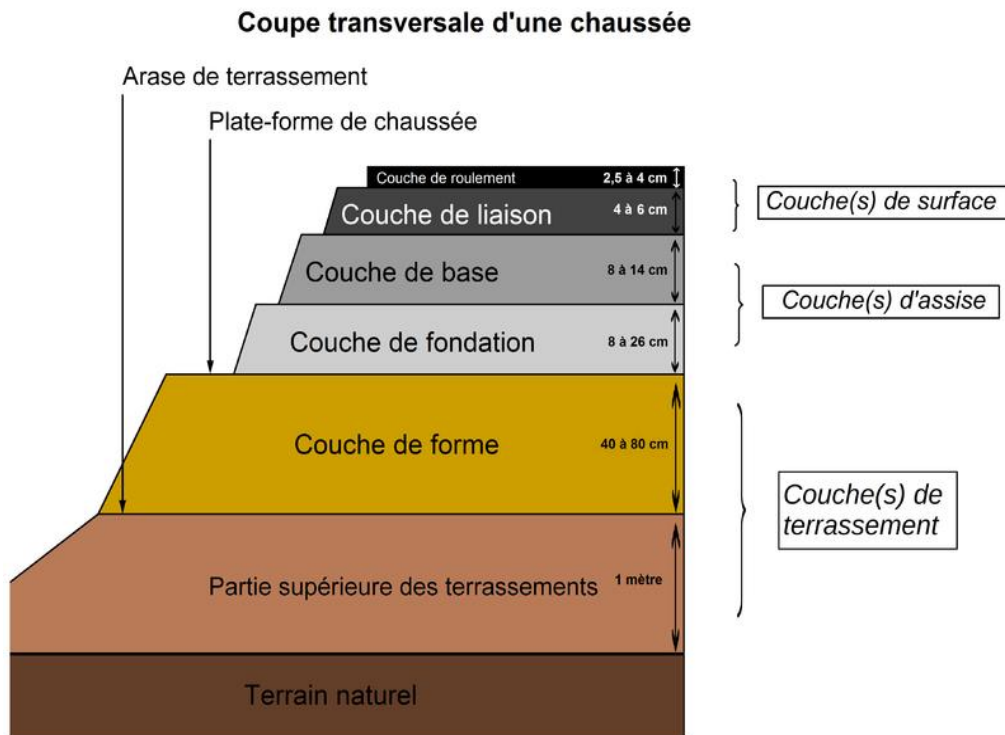


Figure 1-5 coupes transversales d'une chaussée

1.7. 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 (Moesli, et al 2002 ; Abdelhamid, 1980). Les couches supérieures des terrassements sont compactées à sec de manière à atteindre des densités de l'ordre de 90% de l'OPM (Amer oui, 2002). Un choix judicieux des matériaux du remblai permet de réduire le corps de chaussée d'une simple couche de base d'environ 15cm (Boulera, 1989)

1.7.1. 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

1.7.2. 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.) (Dôme, 1980). Les matériaux utilisés en couche de base appartiennent soit à la famille I (matériaux à ossature), soit à la famille III (matériaux fins) (Moesli, 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).

1.7.3. Couche de roulement

➤ Imprégnation

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

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

➤ **Revêtement**

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

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

➤ **Ciment (liant hydraulique)**

Définition du ciment

Le ciment est un produit moulu du refroidissement du clinker qui contient un mélange de silicates et d'aluminates de calcium porté à 1450-1550 C° , température de fusion . Le ciment usuel est aussi appelé liant hydraulique, car il a la propriété de s'hydrater et durcir en présence d'eau, et par ce que cette hydratation transforme la pâte liante, qui a une consistance de départ plus ou moins fluide, en un solide pratiquement insoluble

dans l'eau. Ce durci ciment est du à l'hydratation de certain composés minéraux, notamment des silicates et des aluminates de calcium.



Figure 1-6 poudre de ciment

Principe de fabrication des ciments courants :

Le principe de la fabrication du ciment est le suivant : calcaires et argiles sont extraits des carrières, puis concassés, homogénéisés, portés à haute température (1450 °C) dans un four. Le produit obtenu après refroidissement rapide (la trempe) est le clinker.

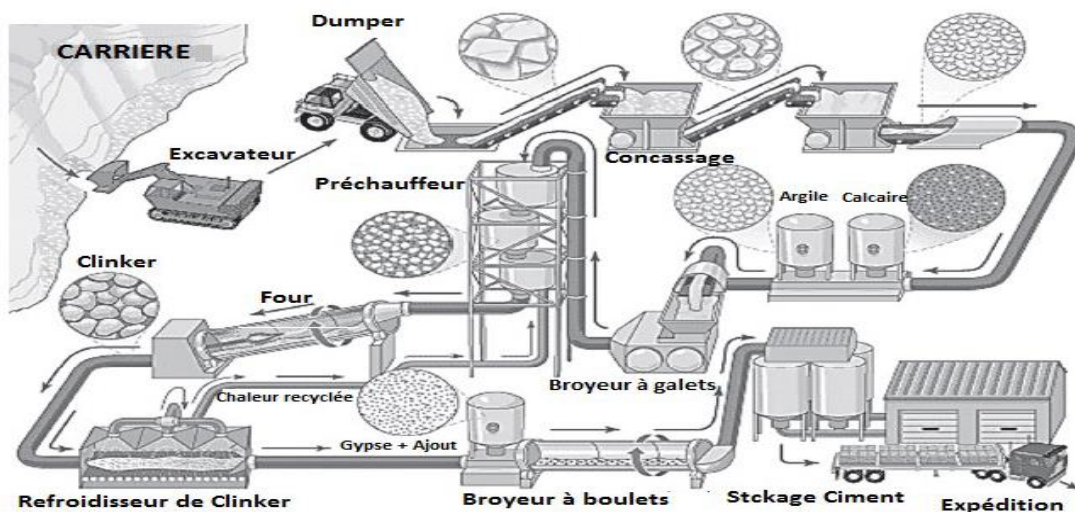


Figure1-7 Procédure de fabrication du ciment

I.4-Les Constituants du ciment ;

I.4.1-Clinker

C'est un produit obtenu par cuisson jusqu'à fusion partielle (clin irisation) du mélange calcaire + argile, dosé et homogénéisé et comprenant principalement de la chaux (CAO) de la silice (SiO2) et de l'alumine (Al2O3).

Le mélange est en général constitué à l'aide de produits naturels de carrière (calcaire, argile, marne...). C'est le clinker qui, par broyage, en présence d'un peu de sulfate de chaux (gypse) jouant le rôle de régulateur, donne des Portland. [1]

Les éléments simples (CAO, SiO₂, Al₂O₃ et Fe₂O₃) se combinent pour donner les constituants minéraux suivants (Figure (1.2)).

- Silicate tricalcique (C₃S) : 3CaO.SiO₂ (Alite).
- Silicate bicalcique (C₂S) : 2CaO.SiO₂ (Bélite).
- Aluminate tricalcique (C₃A) : 3CaO.Al₂O₃.
- Ferro aluminate calcique (C₄AF): 4CaO .Al₂O₃ .Fe₂O₃ (Célie).

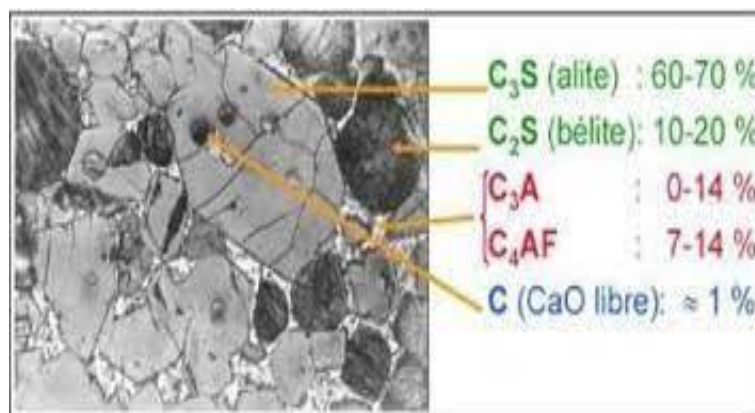


Figure 1-8 : Microphotographie D'un clinker.

• Action du ciment et des liants hydrauliques routiers (LHR) sur les sols

Le traitement des sols au ciment ou aux LHR permet d'améliorer les caractéristiques initiales des matériaux et s'appliquent à des sols fins prétraités à la chaux ou des sols peu ou pas plastiques, dont les teneurs naturelles en eau trop élevées ne permettent pas de réaliser des remblais ou des couches de forme dans de bonnes conditions et avec des garanties suffisantes de qualité. Il est surtout utilisé dans le but d'obtenir un développement rapide et durable des résistances mécaniques et des stabilités à l'eau et au gel.

Compte tenu de leurs propriétés, le ciment et les LHR modifient de façon sensible le comportement des sols peu ou pas plastiques, grâce à deux actions distinctes :

- Des modifications immédiates et à long terme des propriétés géotechniques et mécaniques du sol

Les réactions du ciment et du LHR avec un sol consistent essentiellement en une hydratation des silicates et aluminates de calcium anhydres, avec passage par la phase soluté suivie de la cristallisation des produits hydratés : c'est la prise hydraulique.

La croissance des microcristaux formés, leur enchevêtrement, leur feutrage progressif, enrobent et relient les grains du matériau entre eux, formant des ponts de plus en plus nombreux et solides. Ce qui conduit rapidement au durcissement du mélange, à l'obtention de caractéristiques mécaniques élevées et sa stabilité à l'eau et au gel.

• Une diminution de la teneur en eau La teneur en eau

d'un mélange sol-ciment ou sol-LHR se trouve abaissée en raison de :

- L'apport de matériaux secs ;

- La consommation de l'eau nécessaire à la prise hydraulique du ciment ou du LHR ;

- L'évaporation d'eau par l'aération du sol lors du malaxage. En revanche, on ne note pas de modifications importantes de la courbe Proctor.



Figure 1-9 : ciment *liant hydraulique routier*

• **Domaines d'emploi selon le couple sol-liant.**

Dans le cas des sols fins, comme les limons et argiles, des graves et sables fortement argileux, humides, le traitement à la chaux est adapté pour l'utilisation en remblai ou pour l'amélioration de la portance de la partie supérieure des terrassements (PST), grâce essentiellement à ses effets immédiats (assèchement et floculation des éléments fins). Pour l'utilisation en couche de forme, où les propriétés mécaniques élevées de la plate forme sont rapidement requises et

recherchées, le traitement à la chaux de ces mêmes sols plastiques peut constituer un traitement en soi (dans certaines applications), mais est surtout utilisé comme traitement préliminaire à un traitement au ciment ou aux LHR de ces mêmes matériaux : on parle alors de traitement mixte. Dans le cas de matériaux peu argileux, il n'est pas conseillé d'utiliser le traitement à la chaux pour réduire la teneur en eau, car l'amélioration obtenue n'est alors que temporaire et ne modifie en rien la nature du matériau. Ainsi, pour l'utilisation en remblai ou en couche de forme, le traitement au ciment ou au LHR convient plus particulièrement aux sols peu plastiques ou peu argileux, comme les sables, certains matériaux graveleux ou sablo-graveleux, les limons calcaires peu plastiques, certains calcaires et certaines craies... Le traitement des sols au ciment ou au LHR convient pour une réutilisation en remblai plus importante de certains matériaux humides, comme les craies. A titre indicatif, d'après le guide technique Stéra / LCPC sur la "réalisation des remblais et des couches de forme" (plus communément nommé GTR) et la norme NF P 11-300, les sols non argileux sont les sols de classes B1 ; B2 ; D1 ; C1B1 ; C1B2 ; B3 ; B4 ; D2 ; D3 ; C1B3 ; C1B4 ; C2B3 ; C2B4 et éventuellement les sols de classes B5 ; C1A1 ; C1B5 et C2B5 si ces derniers sont très peu argileux ($VBS < 0,5$), et les sols argileux sont les sols de classes A2 ; B6 ; C1A2 ; C1B6 ; C2A2 ; C2B6 ; C2A1 ; A3 ; C1A3 ; C2A3 ; A1 ; B5 ; C1A1 ; C1B5 et C2B5.

1.8. CONCLUSION

Des nombreuses études se sont intéressées à la recherche des voies alternatives à l'utilisation des ressources alluvionnaires en voie d'épuisement, notamment les sables alluvionnaires, pour la fabrication des bétons hydrauliques et même dans le domaine routier. Parmi les solutions proposées, l'emploi d'un mélange des sables calcaires de concassage avec le sable de dune est souvent recommandé. Cependant, dans les régions sahariennes, en Algérie, leur utilisation est jusqu'à présent écartée quasi systématiquement de tout usage dans le bâtiment et les ouvrages d'art mais dans notre étude on utilise dans les routes avec amélioration d'un ciment liant hydraulique (LHR), malgré les avantages économiques et environnementaux que cette solution peut présenter. Notons que les spécifications normatives autorisent leur utilisation. Cette situation résulte essentiellement de l'absence de références scientifiques fiables à l'échelle du pays, et d'un manque d'exemples de réalisation d'ouvrages de références pouvant convaincre les maîtres d'ouvrages et les entreprises.

Chapitre II

Méthode d'essais et matériaux utilise

Chapitre II

Méthodes d'essais et matériaux utilisés

2.1 INTRODUCTION

Dans ce chapitre nous avons défini l'importance des essais appliqués sur le sable, le ciment, et le mortier dans toutes les étapes, pour connaître l'effet des ajouts minéraux sur les propriétés mécaniques et sur la durabilité des mortiers confectionnés à base de ciment liant hydraulique routie (LHR)..

Des essais physiques, chimiques, et mécaniques ont été effectués au sein des laboratoires suivants :

- Laboratoire L.T.P .S de Ghardaïa.

2.2 Caractéristiques des matériaux

La caractérisation des matériaux de construction nécessite connaissance de la nature de ses composants .Par ailleurs ,la détermination des dosage optimaux, ainsi que l'illustration des certains interprétation ne pourraient être possible que si les différents constituant sont bien caractérisés.

2.2.1 Le sable

Le sable est le constituant du squelette granulaire qui a le plus d'impact sur le mortier [14]. Il joue un rôle primordial en réduisant les variations volumiques, les chaleurs dégagées et le prix de revient des constructions des routies . Il doit être propre et ne pas contenir d'éléments nocifs.

2.2.2 ETUDE D'IDENTIFICATION GEOTECHNIQUE

2.3.1. Analyse granulométrique et sédimentométrie

L'analyse granulométrique permet de mesure la distribution dimensionnelle en poids des éléments d'un matériau. elle comprend deux opération :

- Le tamisage pour la distribution dimensionnelle en poids des particules de dimension supérieur ou égale à 80 micron.
- La sédimentométrie pour la distribution dimensionnelle des particules de dimension inférieur à 80 microns. la sédimentométrie est basé sur la loi de stokes qui donne la vitesse limite d'une particule tombant sous l'action de la pesanteur dans un liquide visqueux.

L'analyse granulométrique se traduit par la courbe granulométrique (fig. I.4). cette courbe contribue à l'identification du matériau et permet de prévoir certaines propriétés.

Des photos dans laboratoire pour la préparation d analyse granulométrique ;



Figure II-1 Analyse granulométrique par tamisage.

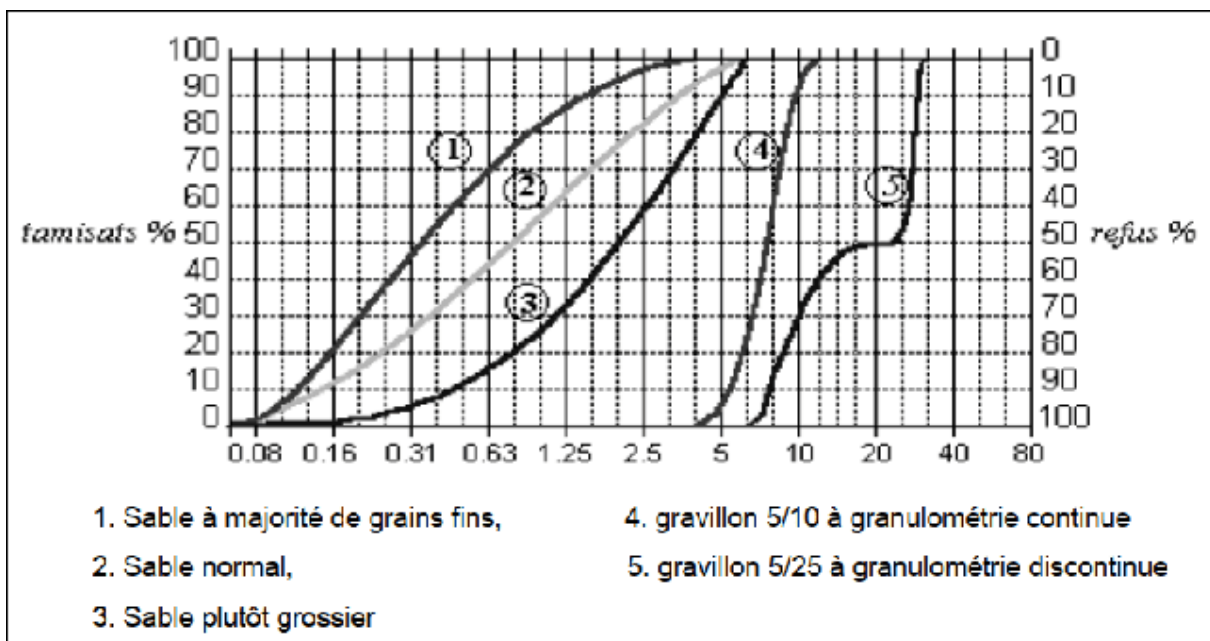


Figure II.2 Exemples des courbes granulométriques

2.3.2. Coefficient d'uniformité et coefficient de courbure d'une courbe granulométrique.

- **Coefficient d'uniformité**

Ou COEFFICIENT DE HAZEN exprimée l'uniformité ou encore le degré d'étalement de la granulométrie défini par le rapport:

$$Cu = \frac{D60}{D10}$$

- si $Cu < 2$, la granulométrie est uniforme (ou serrée),
- si $Cu > 2$, la granulométrie est étalée (ou variée).

☒ **Le coefficient de courbure CC:**

$$Cc = \frac{D30 \times D30}{D60 \times D60}$$

Permet de déterminer si la granulométrie est bien graduée ou mal graduée (un sol est mal gradué si une fraction de grains prédomine). Un sol est bien gradué si 'il est compris entre 1 et 3. (Cllaud, 2004).

2.3.3. Teneur en eau (NF P 94-050)

Objet Détermination de la teneur en eau d'un matériau (W), C'est la caractéristique la plus facile à déterminer.

La teneur en eau se détermine par deux pesées. Une première pesée de l'échantillon à l'état initial donne la masse m de l'échantillon humide et une deuxième pesée, après passage à l'étuve à **105°C** pendant **24heures** (évaporation de l'eau libre et de l'eau capillaire), donne la masse sèche de l'échantillon Ms.

$$W = \frac{Mw}{Md} \times 100$$

2.3.4. Domaine d'application

Elle est effectuée à partir d'un échantillon intact, remanié, ou reconstitué, de tout le sol et de tous les matériaux cite dans la norme NF P 11-300.

2.3.5. Limites d'Atterberg

2.3.6. Définition

Les limites d'Atterberg sont des essais qui permettent de définir des indicateurs qualifiant la plasticité d'un sol, et plus précisément de prévoir le comportement des sols pendant les opérations de terrassement, en particulier sous l'action des variations de teneur en eau (LCPC, 1973). Notons que cet essai se fait uniquement sur les éléments fins du sol définis comme ayant des grains de diamètres inférieurs à

0.06 mm (F. Weill, 2010), et il consiste à faire varier la teneur en eau de l'élément en observant sa consistance, ce qui permet de faire une classification du sol.

Le but de ces tests est de déterminer les limites de consistance qui sont exprimées en termes de teneur en eau marquant les limites entre état solide, plastique, et liquide.

A partir des limites d'Atterberg, on peut calculer les indices suivants qui expriment la sensibilité à l'eau du sol (I_p) et sa consistance (I_c) par rapport sa teneur en eau (LCPC, 1973)

2.3.7. Indice de plasticité I_p

$$I_p = WL - WP$$

Tab. II.1: classification de l'argilite d'un sol selon l'indice I_p

<i>INDICE DE PLASTICITE</i>	<i>ETAT DU -SOL</i>
0 -5	NON PLASTIQUE
5-15	PEU PLASTIQUE
15-40	PLASTIQUE
40>	TRES PLASTIQUE

2.3.8. Indice de consistance I_c

$$I_c = \frac{WL-W}{I_p}$$

Tab. II.2 : Etat de sol en fonction de I_c

<i>INDICE DE CONSISTANCE</i>	<i>ETAT DU -SOL</i>
$I_c > I_p$	Solide
$0 < I_c < 1$	PLASTIQUE
$I_c < 0$	Liquide

4. Valeur au bleu de méthylène

4.1. But

Le but de l'essai est d'évaluer la richesse en argile d'un sol en mesurant sa capacité d'adsorption de molécules de bleu de méthylène.

Le résultat VBS s'exprime donc en grammes de bleu pour 100g de sol. On considère que cet essai exprime globalement la quantité et la qualité de l'argile contenue dans un sol. (il est effectué sur la fraction 0/2 mm du sol et on distingue les valeurs suivantes :

- $vbs \leq 0.2$: sols sableux (sol insensible à l'eau)
- $0,2 < vbs \leq 2.5$: sols limoneux (sol peu plastique et sensible à l'eau)
- $2,5 < vbs \leq 6$: sols limono-argileux, (sol de plasticité moyenne)
- $6 < vbs \leq 8$: sols argileux
- $8 < VBS$: sols très argileux.

4.2. Essai d'équivalent de sable

L'essai d'équivalent de sable (figure 4) imaginé par le Laboratoire routier de Californie est basé partiellement sur ce principe. Il n'a pas de sens physique intrinsèque, mais sa détermination liée à un mode opératoire très précis permet de comparer les matériaux naturels peu plastiques.

L'essai d'équivalent de sable, permettant de mesurer la propreté d'un sable, est effectué sur la fraction d'un granulat passant au tamis à mailles carrées de 5 mm. Il rend compte globalement de la quantité et de la qualité des éléments fins, en exprimant un rapport conventionnel volumétrique entre les éléments sableux qui sédimentent et les éléments fins qui flocculent.

La valeur de l'équivalent de sable (ES) est le rapport, multiplié par 100, de la hauteur de la partie sableuse sédimentée, à la hauteur totale du floculat et de la partie sableuse sédimentée (NF P18-598). Il est effectué sur les éléments de dimensions inférieures à 5 mm (fraction 0/5 mm du sol).

Par définition, elle est

$$ES = 100 \frac{hs}{hs+hf}$$



FIGURE II.3. ENTRAIN DE PREPARER ES (LTPS)



FIGURE II.4. L'ESSAI D'EQUIVALENT DE SABLE.

2.4. MASSES VOLUMIQUES DES GRANULATS

2.4.1. Masse volumique apparente

2.4.1.1. Définition

La masse volumique apparente est une propriété physique intrinsèque couramment mesurée pour les pierres naturelles selon la norme NF EN 1936.

paramètre s'exprime en kg/m^3 et renseigne sur le degré de compacité du matériau et permet donc d'évaluer **la masse** d'un volume donné.

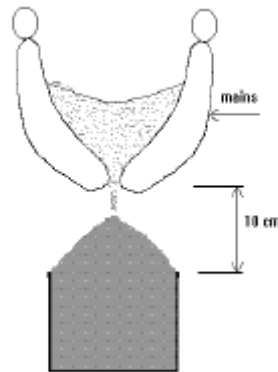


FIGURE II.5 L ESSAI DE LA MASSE VOLUMIQUE APPARENTE

La masse volumique apparente est donnée par : $\rho = \frac{m}{v}$

L'essai est répété 5 fois pour un volume de 1 litre et la moyenne de ces essais donne la valeur de la masse volumique apparente

2.4.2. Masse volumique absolue: (Ghomari, 2008)

2.4.2.1. Définition

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

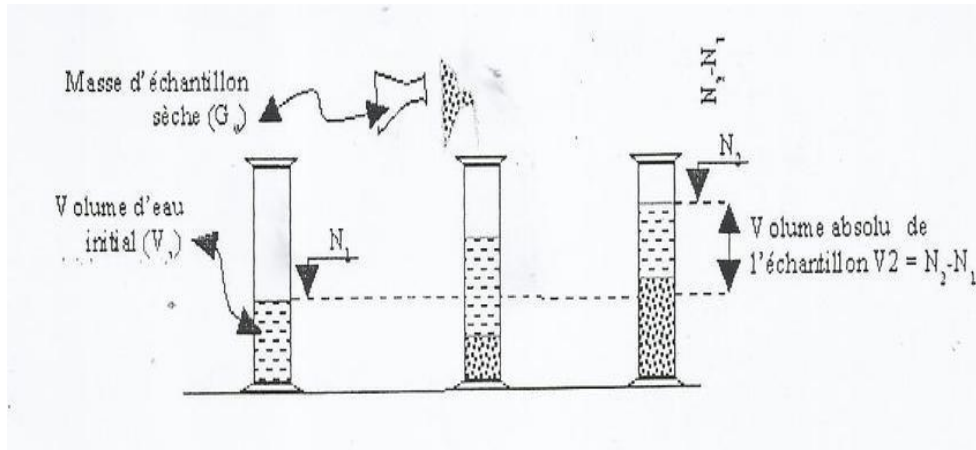


Figure II.6. L'essai la masse volumique absolue

- La masse volumique absolue est:

$$\rho_s = \frac{M}{V_2 - V_1}$$

2.5. Les Essais d'état (essais mécaniques d'identification)

2.5.1. L'essai Proctor

L'essai Proctor (figure. I.14) 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



FIGURE II.7 L'ESSAI DE PROCTOR

L'essai Proctor permet de tracer la courbe du poids volumique sec en fonction de la teneur en eau, pour une énergie de compactage donnée. Cette courbe permet de mettre en évidence un optimum de poids volumique. En construction de remblai en grande masse (barrages, remblais routiers...) on se réfère presque exclusivement à l'essai Proctor Normal ; en couches de chaussée on se réfère presque exclusivement à l'essai Proctor Modifié, réalisé avec une énergie supérieure. (Cllaud, 2004) Le tableau ci-dessous précise les conditions de chaque essai.

Tableau II.3.les condition de l'essai Proctor et modifie

	<i>Masse de dame (kg)</i>	<i>Hauteur de chute (cm)</i>	<i>nombre de coups</i>	<i>N de couche</i>	<i>Energie Compactage Kj/dm</i>
<i>Essai proctor</i>	<i>normal</i>	<i>30.50</i>	<i>25Moule proc</i>	<i>3</i>	<i>0.59</i>
	<i>2.490</i>		<i>55 moule cbr</i>	<i>3</i>	<i>0.53</i>
	<i>modifie</i>	<i>45.70</i>	<i>25</i>	<i>5</i>	<i>2.71</i>
	<i>4.540</i>		<i>55</i>	<i>5</i>	<i>2.41</i>

2.6. L'indice portant californien 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) , sous une éprouvette compacté à l'énergie Proctor normal et a sa teneur en eau naturelle. (D. Didier, 1999)

Imbibe 4h ;, permet de réaliser la caractérisation mécanique des sols naturels et de sols compactés dans des remblais et des couches de forme, de fondations et de sous-fondations de routes et aéroports. Il mesure la résistance à l'effort tranchant

d'un sol et le gonflement du sol lorsqu'il est immergé dans l'eau pendant 4 jours. Il

Nous permettons de calculer la portance du sol, en estimant sa résistance au poinçonnement.

Cet essai est utilisé partout dans le monde pour déterminer l'épaisseur des couches de fondation, établir une classification des sols et permettre d'étudier la traficabilité. Il peut être réalisé soit en laboratoire, soit in-situ. Cependant cette dernière option n'est pas souvent réalisée. Il nous donne un des paramètres indispensables dans les essais géotechniques précédant la construction. Il y a différents types d'essai



Figure II.08 | éprouvette sous la dame de cbr.



Figure II .09 | appareille cbr

2.7. Essai au bleu de méthylène

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

La tache formée se compose d'un dépôt central du matériau, coloré d'un bleu soutenu, entouré d'une zone humide incolore. La saturation des fines en bleu de méthylène se traduit par la formation d'une auréole bleu clair persistante autour de dépôt central

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

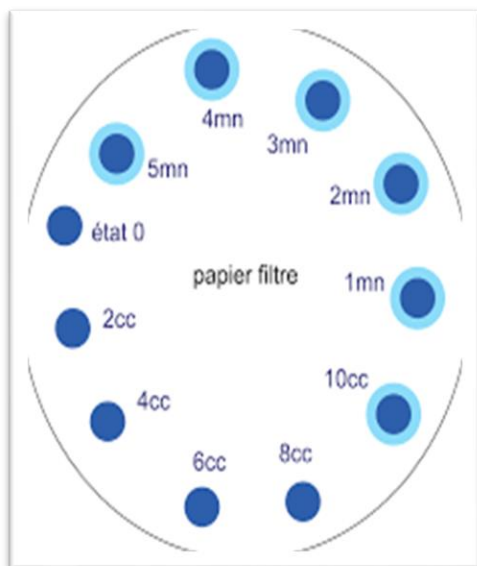


Figure II – 10 | essai bleu méthylène

figure II -12 | appaillage de l'essais

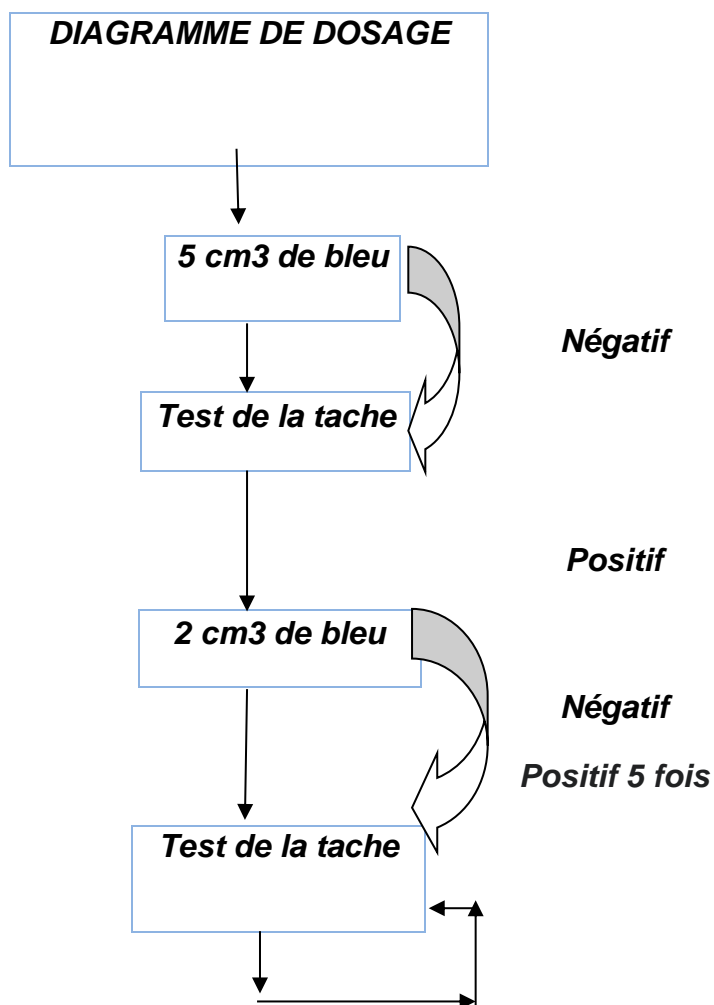


Figure II - 12: Schéma du dosage de l'essai du bleu méthylène

2.8. Classification des sols selon la valeur de VB.

Valeur de VB	
$VB < 0.2$	Matériau propre
$0.2 < VB < 0.5$	Matériau légèrement pollué
$0.5 < VB < 1$	Matériau pollué
$1 < VB$	Matériau très pollué

Tableau II-4 : Classification des sols selon la valeur de VB.

2.9. Essai de compression simple

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

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

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



Figure II – 13 Moules de confection.

Le compactage est réalisé selon la norme NFP 98- 230-2, sur la fraction 0/5, à l'aide d'une presse hydraulique et des moules à double piston (Photo IV-6). Le matériau est compacté en une seule fois dans le moule.

Le séchage des éprouvettes démoulées se fait à l'étuve à 55°C pendant 48h.

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

Les résultats exprimés pour chaque essai sont les moyennes de 3 valeurs.



Figure II – 14 L'éprouvette soumise à l'essai de compression jusqu'à la rupture.

2.10. Conclusion

Les essais physiques, les analyses chimiques et les analyses minéralogiques effectués dans les différents laboratoires donnent une idée générale sur les caractéristiques principales des matériaux servant à la formulation des mortiers qui seront étudiés au chapitre suivant du point de vue mécanique et durabilité. La connaissance de ces caractéristiques nous aide d'une façon significative à commenter les résultats des essais expérimentaux.

Chapitre III: Résultats et discussion

Chapitre III

Résultats et Discussions

3.1 Introduction

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

3.2 PRESENTATION DES MATERIAUX ETUDIES :

3.1 Le sable concassé 03

Le sable utilisé est un sable de concassage provient de zelfana (70 km à l'est de la wilaya de Ghardaïa) ce gisement se trouve à 50 m à droite de la RN°1 en allant vers zelfana . (Voir figure III -2).



Photo - III 1 - Carrière de sable zelfana

3.2 le sable de dune

Les matériaux choisis (sable de dune) provient de l'oued de metlili située à 40km au sud-est de la wilaya de ghardaia.



Photo - III 2 sable de dune de oued mtlili.

3.3 ETUDE D'IDENTIFICATION GEOTECHNIQUE :

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

3.3.1 Analyse granulométrique :

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

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

3.3.2 Analyse granulométrique par tamisage :

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

Nous avons effectué cette analyse par voie humide pour le tuf. Etant donné la sensibilité du tuf à l'eau, nous avons imbibé notre échantillon pendant 24h avant l'essai. Cette opération permet aux mottes de se désagréger afin d'arriver aux conditions les plus défavorables de friabilité. Pour le sable de dune l'analyse est effectuée par tamisage à sec.

Les étapes de cet essai sont résumées dans le tableau **III -1**

3.3.3 analyse granulométrique par sédimentometrie :

L'analyse granulométriques des éléments à 80 μm est effectuée par sédimentation. Selon la norme NFP94-057, qui complète l'analyse granulométrique par tamisage ou il n'est pas possible d'utiliser des tamis. Le principe de cet essai est basé sur la loi de Stokes qui exprime la vitesse de décantation d'une particule sphérique dans un liquide visqueux en fonction du diamètre de la particule, selon la relation :

$$V = (2gr^2) (D1- D2) / 9\mu$$

V : Vitesse de chute (cm sec^{-1}).

g: Accélération due à la gravité (cm sec^{-2}).

r : Rayon équivalent de la particule (cm).

D1 : Densité de la particule (g cm^{-3}).

D2 : Densité du fluide (g cm^{-3}).

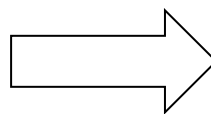
μ : Viscosité du fluide (Pa. s).

La figure I III -2 présente la courbe granulométrique de nos échantillons. Les paramètres les plus significatifs tirés de cette analyse sont regroupés dans le schéma III -2.

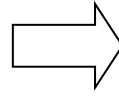
A : commencer par dresser la colonne des tamis.

Les ouvertures des tamis doivent être croissantes de bas en haut.

(Versement du sol dans la série de tamis).



B : prendre un kilogramme de sol (vibration manuelle).



C : verser le sol sur le tamis supérieur puis fermer la colonne par le couvercle (pesée cumulée des refus).

D : placer la colonne des tamis sur le vibreur (la pesée de l'échantillon de sol).



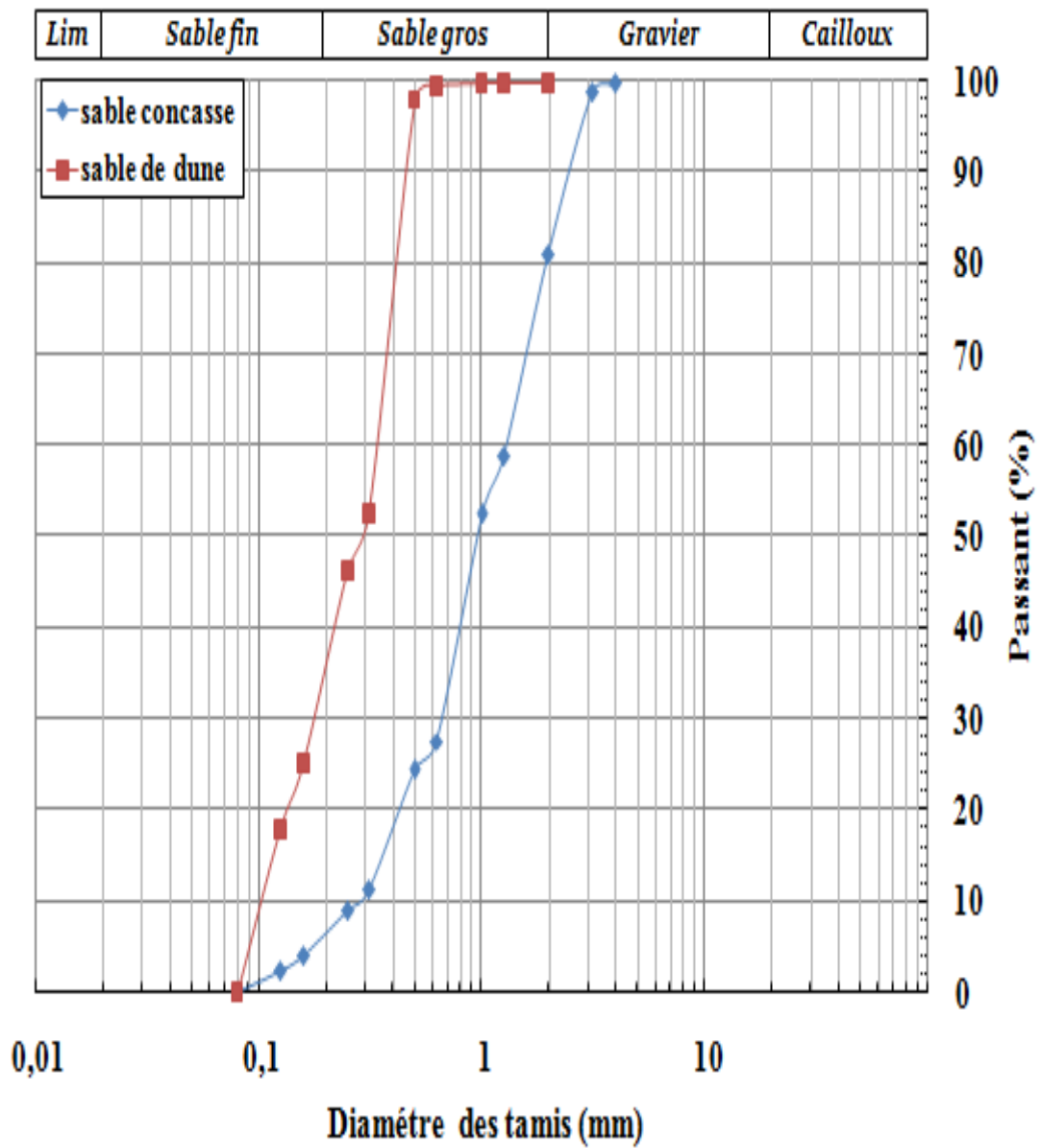


Figure III -2 Courbe granulométrique de sable concasse et le sable de dune.

Sable concasse 03	Sable de dune	
/	/	argile (%)
/	/	Limon (%)
40	34	Sable fin(%)
62	66	Sable gros(%)
14	/	Gravier (%)
/	/	Cailloux(%)
/	/	% < 80µm
0,30025564	0,10529511	D10
0,66673339	0,18093912	D30
1,29179775	0,34531718	D60
4.30	3.27	Cu = D60/D10
1.14	0.89	Cc = (D30) 2 / D10D60

Tableau III -2 : Résultats récapitulatif de l'analyse granulométrique du tuf de concassage zelfana et le sable de dune oued metlili.

D'après ces résultats,

- Pour le sable concasse on trouve que notre matériau est propre (éléments inférieur 80 µm est de l'ordre de).Donc La classe Granulométrie serrée. $2 < Cu \leq 5$.
- Pour le sable de dune les éléments inférieur à 80µm est de l'ordre de 3%. La courbe est très uniforme ($2 < Cu \leq 5$).

Tableau III-1 représente la classes de granulométrie en fonction de la valeur du coefficient d'uniformité, on reconnait cinq classes de granulométrie.

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

Tableau III-1: Classes de granulométrie des sols

3.4 Qualité des fines :

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

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

3.4.1 Les limites d'Atterberg

L'essai est réalisé selon la norme NFP 94-051, sur la fraction inférieure à 400 µm .

Dans notre étude et notre matériaux sable de concasse de zelfana a manque de fine et la cohésion c est a dire le matériaux n est pas qualifie a la plasticité (non

plastique) même le sable de dune alore notre matériaux ne permet pas définir ces indicateurs(limite liquidité , limite de plasticité) on constate que l essai non mesurable..

3.4.2 Essai d'équivalent de sable

L'essai est réalisé selon la norme NFP 18-598. Il consiste à séparer, dans une éprouvette, au moyen d'une « solution lavant », les éléments grossiers qui sédimentent

et les éléments fins qui restent en suspension. L'essai est effectué sur 120g de sol. Le schéma III - illustre les étapes de cet essai.

❖ 1) Remplissage chaque éprouvette avec une solution de lavage jusqu'au premier trait et ajoutez ($m = 120\text{ g}$) de matériau sec.



❖ 2) Imbibition du matériau pendant 20 minutes dans la solution lavante.



❖ 3) Placer le tube dans la machine vibrante (90 vibres en 30 secondes).



❖ 5) Mesure de la hauteur h_2 et de la hauteur h_1 de l'ensemble sable plus flocculat après 20 minutes de décantation



Matériaux	ES (%)
Sable concasse	42
Sable de dune	60

Tableau III-2 donne les valeurs de ES pour nos échantillons.

Le résultat de sable concasse coïncide bien avec les résultats des limites de consistance et l'analyse granulométrique où nous avons trouvé un pourcentage des fractions inférieurs à 80µm de (35%). la valeur 42(%) montre bien que le matériaux non plastique . Ce qui n'est pas forcément vrai,. Donc il faut compléter cette analyse par l'essai au bleu de méthylène pour étudier la qualité des fines.

- Le résultat du sable de dune montre que notre échantillon est matériau propre.

3.4.3 Essai au bleu de méthylène

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

La tache formée se compose d'un dépôt central du matériau, coloré d'un bleu soutenu, entouré d'une zone humide incolore. La saturation des fines en bleu de méthylène se traduit par la formation d'une auréole bleu clair persistante autour de dépôt central.

La tache formée se compose d'un dépôt central du matériau, coloré d'un bleu soutenu, entouré d'une zone humide incolore. La saturation des fines en bleu de méthylène se traduit par la formation d'une auréole bleu clair persistante autour de dépôt central.

On appelle valeur de bleu de méthylène VB, la quantité exprimée en gramme de bleu de méthylène absorbée par 100 g de fines.

$$V_b = \frac{\text{qantite du bleau absorbe (cm2)}}{\text{poid sec de la prise}}$$

Tableau III-3 représente les valeurs de bleu de nos échantillons.

Matériaux	Sable concasse	Sable de dune
Valeur de VB	0.03	0.02

Si nous adoptons la classification du tableau III-4, nous trouvons que le sable concasse est un matériau presque propre même le sable de dune est un matériau propre.

Tableau III-4 Classification des sols selon la valeur de VB.

Valeur de Vb	
$Vb < 0.2$	Matériau propre
$0.2 < Vb < 0.5$	Matériau légèrement pollué
$0.5 < Vb < 1$	Matériau pollué
$Vb > 1$	Matériau très pollué

3.4.4 Essai de compactage et de portance.

3.4.5 Essai Proctor Modifié.

L'essai a été réalisé selon les prescriptions de la norme NF P 94-093. Il a pour but de déterminer les conditions optimum de compactage des sols, pour obtenir la meilleure compacité, la meilleure cohésion et la meilleure stabilité avec une énergie d'intensité normalisée.

L'essai consiste à compacter un certain nombre d'échantillons à différentes teneurs en eau et à même niveau d'énergie de compactage (2472kj/m³). Cette énergie est appliquée au sol en 5 couches de 55 coups de dames dans le moule CBR (sols dans les plus gros éléments ont un diamètre inférieur à 20mm). A chaque teneur en eau on utilise un nouvel échantillon de matériau pour déterminer la densité sèche maximale. Lors de la préparation de l'essai on remarque que le malaxage et le compactage de sable s'effectue normalement jusqu'à 8% de teneur en eau. Au-delà de cette limite, il y a formation de grumeaux très plastiques, le matériau devient alors très difficile à malaxer et à compacter. Lors du démoulage, même en frappant l'échantillon avec la dame, celui-ci s'arrache difficilement.



Photo III-3 : Matériel de Proctor modifié. Ok

Les résultats de cet essai sont représentés dans la figure III -3.

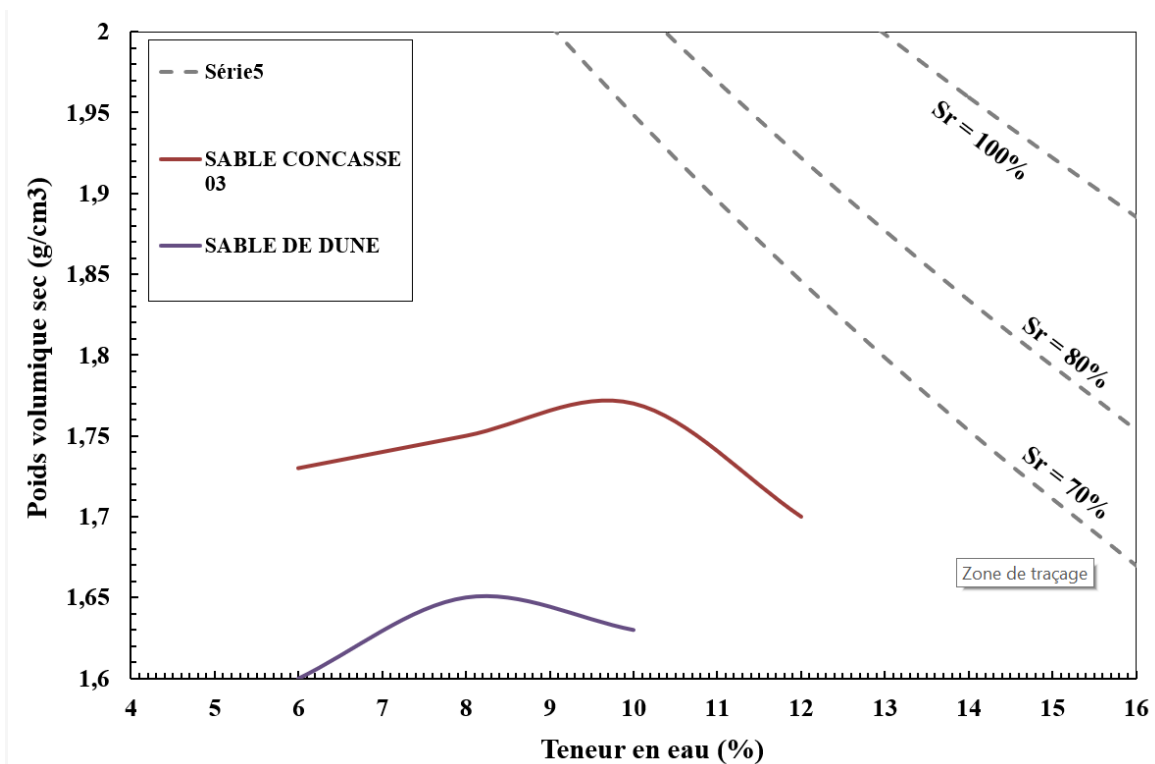


Figure III -3. : Courbe Proctor de sable concasse et sable de dune.

	Sable concasse	Sable de dune	TRS
Poids volumique sec maximal γ_{dmax} (g/cm ³)	1.77	1.65	
Teneur en eau optimale w_{opt} (%)	13	12.90	

Tableau III-5: Caractéristiques optimales de Proctor modifié.

D'après la Figure III -3 on remarque que :

Pour le sable concasse.

- La densité sèche maximal est égale à 1.77 (g/cm³) qui est obtenue pour une teneur en eau optimale de 13%,
- La courbe représente une pente, ceci explique la sensibilité de la densité sèche de notre échantillon à la teneur en eau lorsque celle-ci varie jusqu'à l'optimum de Proctor. Ce qui explique bien l'influence de l'eau sur les fines existantes
- La teneur en eau optimale est assez élevée par rapport à celle des matériaux routiers habituels cités dans le tableau Tableau III-5.
- Donc ce matériau est relativement sensible à la variation de la teneur en eau.

Pour le sable de dune la densité sèche maximal est égale à 1,65 (g/cm³) qui est obtenue pour une teneur en eau optimale 12,90%. La courbe Proctor est l' légèrement aplatie par rapport à la courbe de sable de dune, cela signifie que la densité sèche est peu sensible à la teneur en eau jusqu'à l'optimum Proctor. Ce qui veut dire que les fines existantes est peu sensible à l'eau.

Les valeurs de la densité sèche maximale de sable concasse et le sable de dune sont inférieurs à la limite minimale exigée par la TRS.

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

Tableau III-6 : Caractéristiques de compactage pour quelques matériaux routiers (Gandil P. 1988).

3.4.1 Essai CBR

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

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

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

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

La Variation de la pression du piston en fonction de son enfoncement pour les essais CBR immédiat et imbibé sont représentés dans les figures Photo III-2



Photo III-4: Presse CBR pour poinçonnement et écrasement Des éprouvettes de compression simple.

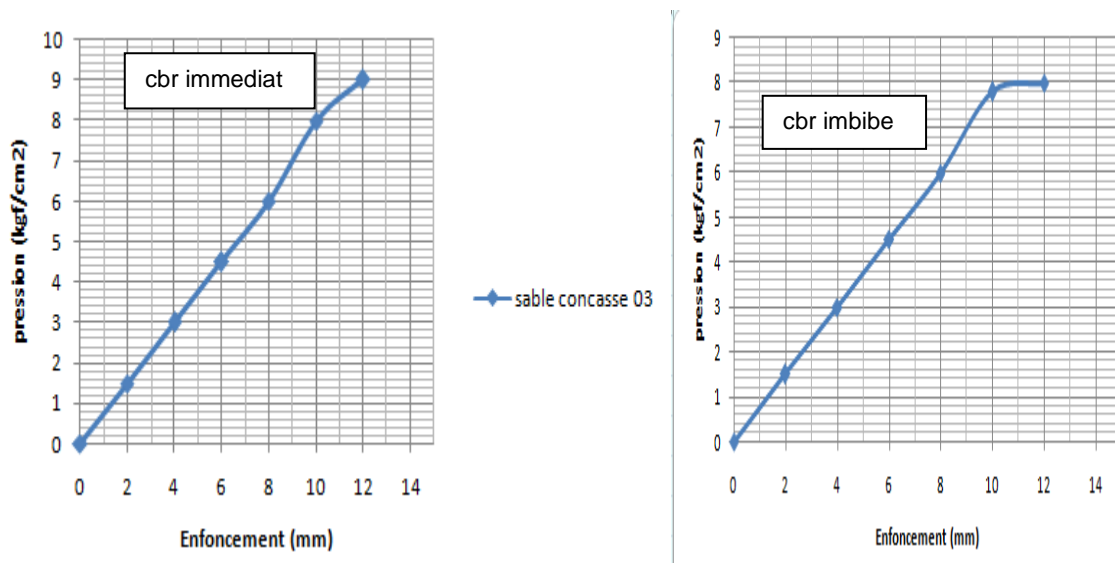


Figure III -4: Variation de la pression du piston en fonction de son enfoncement (Sable concasse 03).

L essai cbr sur le sable de dune est négligeable (non mesurable) donc le Tableau III-6 : représente les valeurs de la portance de nos échantillons. D’après ces résultats on remarque que l’indice CBR immédiat et imbibé de sable de concasse 03 est inférieurs au seuil préconisé par la TRS. Même Les indices portants après 4 heures d’immersion, sont plus faibles que les indices immédiats. En effet, On constate,. Ces valeurs montrent la sensibilité de le sable concasse et le sable de dune à l’eau.

	Matériaux		Spécifications		
	Sable concassée	Sable de dune	TRS	CTTP	GTR
I CBR Immédiat (%)	20.68	0	> 40	-	-
I CBR Imbibé (4h) (%)	17.75	0	-	-	-

Tableau III-6 : Résultats de l’essai de la portance.

3.4.2 Essai de compression simple

Dans cette essai sur une série d’éprouvettes cylindriques de dimensions ($\varnothing = 5\text{cm}$; $H = 10\text{cm}$), confectionnées à la teneur en eau optimale du Proctor modifié et à

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

Les principales étapes de préparation des échantillons sont :

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

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



Photo III-5 : presse cbr



Photo III-6 : Presse hydraulique.

- Les résultats de cet essai sont négligeables car le sable concassé 03 de la station concassage de Zelfana a une cohésion très faible, donc présente une faible résistance à la compression.

3.4.3 Analyse chimique

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

Tableau III-7 résume les résultats de de cet essai :

	Matériaux		Spécifications		
	Sable concasse	Sable de dune	TRS	CTTP	GTR
Analyse chimique	/	/	/	/	/
Insolubles (%)	31.1	95.9	/	/	/
CaCO ₃ (%)	58	0	/	≥ 45	/
CaSO ₄ ,2H ₂ O (%)	1.41	/	/	/	/

Tableau III-7: Résultats de l'analyse chimique sommaire de sable concasse et de sable de dune.

D'après ces résultats on remarque que le sable concasse est de nature chimique calcaire avec une teneur en CaCO₃ de l'ordre de 58%. Le taux de CaCO₃ pour le sable de dune est égale 0%.

3.5 RECAPITULATIF DES ESSAIS D'IDENTIFICATION

Le tableau III-8 résume les caractéristiques géotechniques et mécaniques de sable concasse de zelfana et de sable de dune de oued metlili. Nous constatons que certaines caractéristiques de sable concasse et de sable de dune ne répondent pas aux exigences de la technique routière saharienne TRS (Fenzy, 1966), catalogue de dimensionnement des chaussées neuves (CTTP, 2001) et le guide technique routière GTR (GTR, 1992). Donc les deux matériaux ne peuvent pas être utilisés à l'état brute dans les corps de chaussés

Le tableau III-8 ; résume les caractéristiques géotechniques et mécaniques de sable concasse de zelfana et de sable de dune de oued metlili

	MATERIAUX		Spécifications		
	SABLE CONCASSE	SABLE DE DUNE	TRS	CTTP	GTR
Analyse granulométrique					
Dmax (mm)	4	2	-	20-40	< 50
% < 0.425 mm	-	-	-	36 - 52	-
% < 80 µm	-	-	< 30	22 - 32	≤ 35
Cu	4.30	3.27	-	-	-
Cc	1.14	0.89	-	-	-
EQUIVALENT DE SABLE					
ES (%)	42	60	-	-	-
VALEUR DE BLEU METHYLINE	0.03	0.02	-	-	< 1,5
COMPACTAGE					
γ dmax (kN/ m 3)	1.77	1.65	> 17	-	-
wOPM (%)	13	12.90	-	-	-
PORTANCE					
I CBR Immédiat (%)	20.86	0	> 40	-	-
ICBR Imbibé (4h) (%)	17.75	0	-	-	-

Essai de compression simple à 98% de γ dmax (MPa)	NM	NM	NM	NM	NM
Analyse chimique Insolubles (%)					
CaCO3 (%)	31.1	95.9	-	-	-
CaSO4 ,2H2O (%)	58	0	-	≥ 45	-
	1.41	/	-	-	-

3.6 CLASSIFICATION.

3.6.1 Classification GTR

Selon la Classification GTR (NF P 11-300) (cas des sols fins), on peut classer le sable concasse03 de zelfana comme suit :

Dmax = 4mm

Passant à 80µm = 12 (%)

Ip non mesurable.

Donc selon ces valeurs des caractéristiques géotechniques la classification de notre matériau est D1 sachant que la classe D1 est « Sols insensible l'eau avec fines »

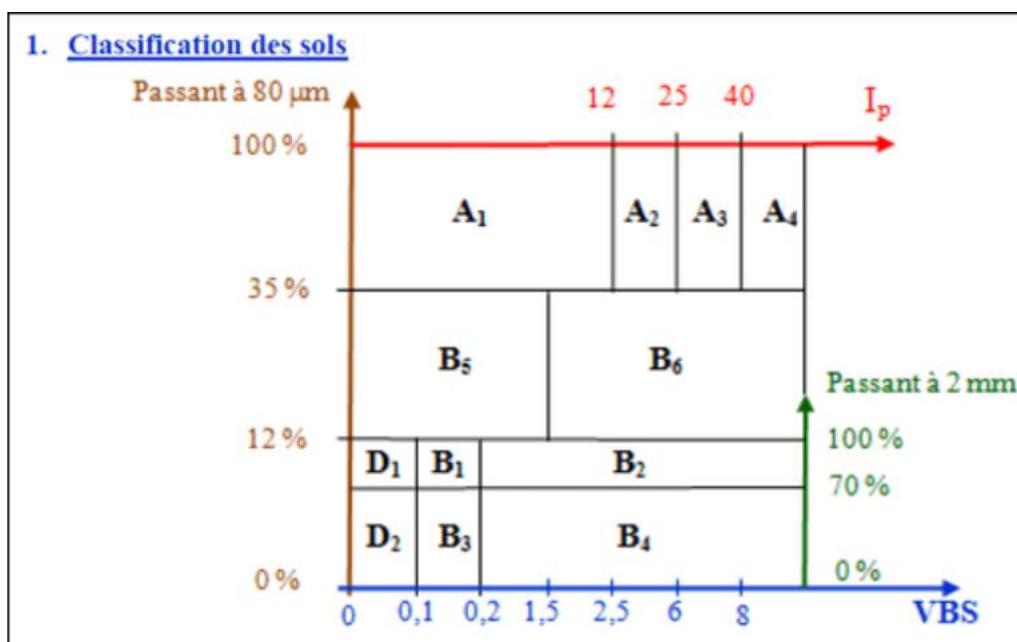


Figure III -5: Classification des sols fins selon GTR

3.6.2 Classification TRS (technique routière saharienne):

Selon la technique routière saharienne notre matériau est classé comme : sable , famille des matériaux fins.

3.7 TRAITEMENT DE SABLE DE DUNE PAR L'AJOUT DE SABLE CONCASSE :

Dans cette partie on va faire l'étude de traitement du sable de dune manque de fine et propre , par l'ajout de sable concasse avec des pourcentages bien précis

Les pourcentages de sable de concasse sont choisis dans un domaine économique réaliste: 10%, 20%, 30%, 40%.

L'objectif de ce traitement est :

- Améliorer la stabilité immédiate (la compactibilité et la traficabilité).
- Amélioration des caractéristiques mécaniques.
- Réduire le coût global d'un projet routier.

L'atteinte de ces objectifs a pour but de fabriquer un matériau pouvant être utilisé en couches de base et de fondation en assise des chaussées à moyen et fort trafic.

Etude de l'influence du traitement au laboratoire :

Notre étude au laboratoire c'est de voir l'effet de l'ajout de sable concassée sur l'essai de proctor modifié.

3.7.1 Essai Proctor modifié

Les résultats de l'essai Proctor modifié sont représentés dans la figure III-6

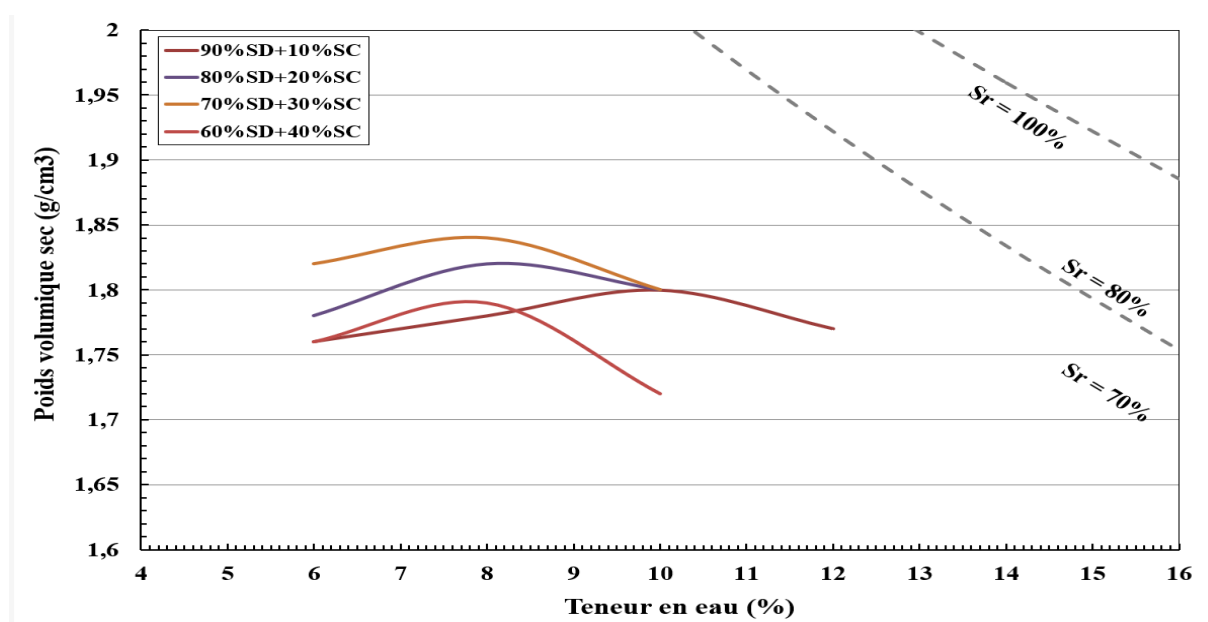


Figure III-6 Courbe Proctor modifié des mélanges (.sable de dune +sable concasse)

D'après la figure III-6 on remarque que plus qu'on ajoute le sable concasse, les courbes Proctor modifié se déplacent vers le haut elle augmente jusque on atteint une densité sèche max égale 1.84 t/m³ et une teneur en eau 10.04% dans le cas de (70% sable de dune+30%sable concasse) ,.L'influence de l'ajout de sable de concasse sur les caractéristiques optimales déduites des courbes Proctor est présentée dans le tableau III-9. Nous constatons que l'ajout de sable concasse conduit à :

- Une augmentation de la densité sèche optimale suite à l'augmentation du pourcentage de sable concasse, Cette augmentation atteint un maximes (1,84 g/cm³) dans le cas des mélanges avec 30%de sable concasse, puis elle diminue dans le cas dernier de 40% de sable concasse à 1.80g/cm³ .
- la consommation de la teneur en eau reste dans les normes . Cela est un avantage concernant le manque d'eau dans les régions sahariennes .

Formule	Wopm	γ_{dma}
100% Sable de dune	1.64	12.90
90%SD+10%SC	1.82	12.3
80%SD+20%SC	1.82	11.2
70%SD+30%SC	1.84	10.4
60%SD+40%SC	1.80	10.7

Tableau III-9 : Résultats de l'essai Proctor modifié.

3.7.2 Etude de l'influence du traitement au laboratoire avec le ciment LHR.

Dans cette partie on va faire l'étude du traitement du sable de dune+sable concasse améliorer avec une pourcentage du ciment LHR . D'après l'étude du multitude pourcentage on prend (70%sable de dune +30% sable concasse) car le cas a une pourcentage du teneur en eau moindre par rapport les autre mélange , par l'ajout de défèrent pourcentage du ciment LHR .

Les pourcentages du ciment LHR sont choisis : 4% et 8%.



figure III-7 ciment LHR



figure III-8 MELANGE DE SD+SC+LHR

Dans le cas de 4% de ciment LHR on mélange de 70% de sable de dune+30% sable concasse c'est à dire on obtient le totale 10kg entre le sable de dune et le sable concasse puis on prend 9600kg de SD+SC et on ajoutant une quantité de 400g du ciment LHR après nous mélangeons bien le mélange on commence ajouter une différent teneur en eau a partir de 10%, on refaire même les démarches de pourcentage de 8% .

L'objectif de ce traitement est :

- Nous recherchons un bon résultat de ciment LHR pour utiliser dans le domaine des routes.
- Amélioration la résistance des deux matériaux par le ciment LHR.
- Réduire le coût global d'un projet routier.

Les résultats de l'essai Proctor modifié avec le ciment LHR sont représentés dans la figure III-9

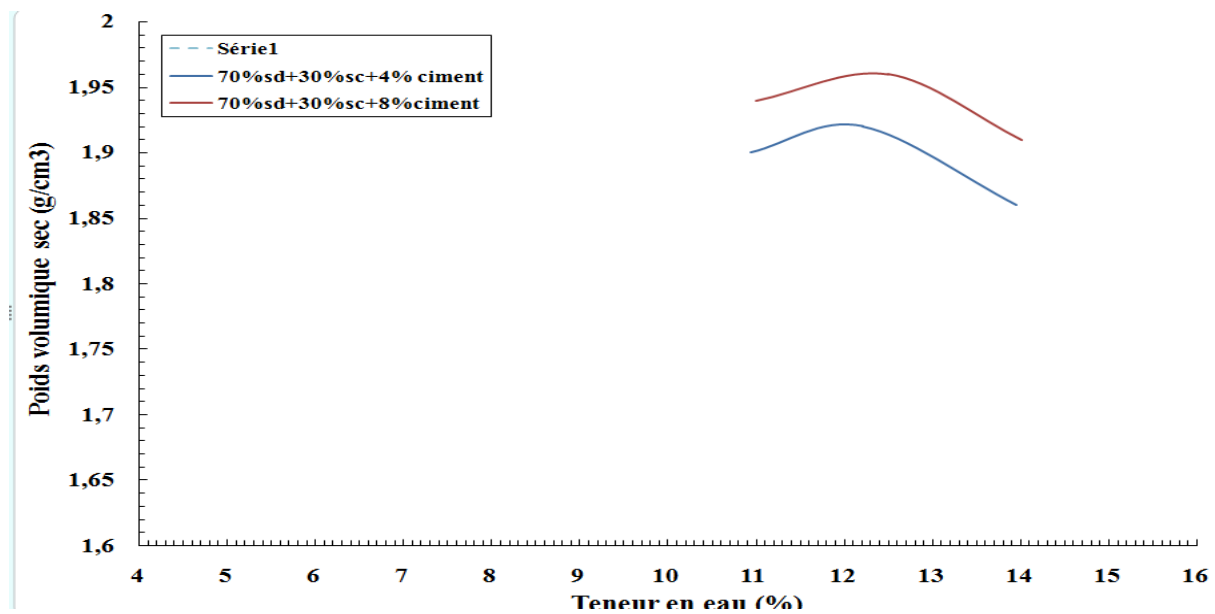


Figure III-9 ; Courbe Proctor modifié des mélanges (.sable de dune +sc+ciment lhr) d'après la figure III-9 on remarque que , la densité sèche max égale 1.84 t/m3 et une teneur en eau 10.04% dans le cas de (70% sable de dune+30% sable concasse) sans ciment Lahr après l'utilisation de 4% et 8% on trouve une densité sèche max égale 1.92 t/m3 et une teneur en eau égale 12.21 l'un et 12% la deuxième ,la différence entre les densités on constate que le ciment a rempli l'espace vide des particules par ailleurs a donné un bon résultat même dans le cote de l'eau au niveau saharienne en plus à élève la résistance de mélange . L'influence de l'ajout de ciment sur les caractéristiques optimales déduites des courbes Proctor est présentée dans le tableau III-10.

Mélange	Wopm	γ_{dma}
70%sd+30%sd+4%ciment	12.21	1.92
70%sd+30%sc+8%ciment	12.5	1.96

Tableau III-10 : Résultats de l'essai Proctor modifié.

***CONCLUSION
GENERALE***

CONCLUSION GENERALE

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

La tenue de l'ensemble des chaussées en sable concassée a été satisfaisante à chaque fois que les conditions liées aux critères de choix sont remplies et que des précautions de mises en œuvre ont été respectées. L'utilisation possible des tufs en cas d'augmentation du trafic, ou en cas de matériaux non performants, passera par une amélioration des qualités du matériau et non par une augmentation de l'épaisseur de la chaussée. L'amélioration des qualités de ces matériaux le ciment LHR passe par une meilleure connaissance de ses particularités et par une réappropriation de la capitale expérience dont dispose nos entreprises.

L'amélioration des qualités de sable concasse de zelfana par incorporation de sable de dune a permis mettre en évidence l'effet positif de l'ajout le ciment LHR , sur la plasticité d'un matériau pulvérulent .

Nous avons vu que certaines caractéristiques de nos matériaux (le taux et la qualité des fines, la plasticité, et la portance) sont médiocres par rapport aux matériaux routiers habituels et ne répondent pas aux exigences de la technique routière saharienne TRS, catalogue de dimensionnement des chaussées neuves CTTT et le guide technique routière GTR.

L'étude d'optimisation a révélé que l'ajout du sable concasse et diminue les limites d'Atterberg des mélanges par contre lorsque on ajout le ciment lhr . La teneur en eau optimale diminue en fonction de l'augmentation du pourcentage du sable concasse et le ciment, tandis que le poids volumique sec maximal élève jusqu'à atteindre un maximas pour un taux de sable concasse comprise entre 20 et 30%.

La formule optimale retenue et qui satisfait les conditions technique et économique est « 70% de sable de dune+ et 30% de sable concasse».

D'après notre étude, nous pouvons confirmer ou l'utilisation l'utilisation le sable concasse, traités ou non traités par l'ajout de sable de dune, mais a condition améliore avec le ciment lhr dans la construction des routes . Pour cela il est évident que des études complémentaires doivent être réalisées :

- L'étude de comportement avec ou sans traitement à long terme ;
- Dimensionnement des structures des chaussées avec les logiciels disponibles ;
- La recherche d'autres procédés de traitement par des liants hydraulique ou avec d'autres.

REFERENCES
BIBLIOGRAPHIQUE

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

AFNOR NFP 98-280-2 : Essais relatifs aux chaussées –préparation des matériaux traités aux liants hydrauliques ou non traités- fabrication des éprouvettes de sables ou de sols fins par compression statique.

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

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

Bederina M, Makhloufi Z, Bounoua A, Bouziani T, Queneudec M,2013. Effect of partial and total replacement of siliceous river sand with limestone crushed sand on the durability of mortars exposed to chemical solutions, Construction and Building Materials, 47 146-58

Référence

Çelik T., Marar T., 1996, Effect of crushed stone dust on some properties of concrete, Cement and Concrete Research, Vol 26, N°7, 1996, 1121-1

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

Cabrera OA, Traversa LP, Ortega NF, 2011. Effect of crushed sand on mortar and concrete rheology, Materiales de Construcción, 61, 401-416.

Dordi CM, Tendulkar MT, 1996. Aggregate for mortar and concrete, The Indian Concrete Journal, 269-76.

Haque M, Ray S, Mahzuz HMA, 2012. Use of Stone Powder with Sand in Concrete and Mortar: A Waste Utilization Approach, ARPN Journal of Science and Technology, 613-618.

Kim JK, 1997. The fracture characteristics of crushed limestone sand concrete, Journal of Cement and Concrete Research, () 1719-29.

Mahzuz HMA, Ahmed AAM, Yusuf MA, 2011. Use of stone powder in concrete and mortar as an alternative of sand, African Journal of Environmental Science and Technology, 5, 381-8. [

Menadi B, Kenai S, Khatib J, Aït-Mokhtar A, 2009. Strength and durability of concrete incorporating crushed limestone sand, Construction and Building Materials, 625-633.

Narasimha C, Atil BT, Sanni SH, 1999. Performance of concrete with quarry dust as fine aggregate - An experimental study, Civil Engineering and Construction Review, 12, 19-24.

Praveen KK, Krishna R, 2015. Strength and workability of cement mortar with manufactured sand, International Journal of Research in Engineering and Technology, 186-9.

Rajput SPS, Chauhan MS, 2014. Suitability of Crushed Stone Dust as Fine Aggregate in Mortars, International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering, 87-94.

Safiuddin M, Raman SN, Zain MFN(2007). Utilization of quarry waste fine aggregate in concrete mixtures, Journal of Applied Sciences Research, 3, 202-8.

Vijayaraghavan N, Wayal AS, 2013. Effect of manufactured sand on durability properties of concrete, American journal of engineering Research, 2, 437-440.