



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

N° d'enregistrement

/...../...../...../.....

كلية العلوم والتكنولوجيا

Faculté des Sciences et de la Technologie

قسم الري والهندسة المدنية

Département Hydraulique et Génie Civil

Mémoire

Pour l'obtention du diplôme de Master

Domaine: ST

Filière: Génie Civil

Spécialité: Structure

Thème

Influence de l'ajout des fines calcaire sur certaines caractéristiques (sec) géotechnique du sable de dune (application dans le domaine de la géotechnique routière saharienne)

Déposé le : 10/06/2023

Par

BENTASSA Sabrina

SAADI Noussaiba

Par le jury composé de :

NESSIL Hamid	M.A.A	Univ Ghardaia	Président
DEMDOUM Abdellah	Docteur	Univ Ghardaia	Examinateur
DAHEUR Elhadj Guesmia	M.C.A	Univ Ghardaia	Encadrant

Année universitaire : 2022/2023

اهداء

"وأخر دعواهم أن الحمد لله رب العالمين"

الحمد لله الذي ما تم جهد ولا ختم سعي الا بفضلله وما تخطى العبد من عقبات

وصعوبات الا بتوفيقه ومعونته

اهدي ثمرة جهدي وفرحة تخرجني

الى من وهبتي الحياة والاملأمي الغالية.

الى من سندني في هذه الدراسةأبي الغالي.

الى سندي وفخريأخي وأختي.

الى من رفقتني ونحن نشق الطريق معا نحو النجاح الى رفيقة

دربيصابرينة بن تاسة.

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

الدراسة.

سائلة المولى عز وجل أن يجزي الجميع خير الجزاء في الدنيا والاخرة.

سعادي نسبية

اهداء

الحمد لله الذي وفقني ونور قلبي بالعلم والمعرفة فيارب لك الحمد كما ينبغي لجلال وجهك
وعظيم سلطانك وصلى الله على خير الانام نبينا محمد عليه افضل الصلاة و السلام.
اهدي ثمرة جهدي المتواضعة الى من قال فيهما الله تعالى (وخفض لهما جناح الذل من
الرحمة وقل ربي ارحمهما كما ربياني صغيرا)

من جعل الله الجنة تحت اقدامها وغمرتني بحبها و حنانها وانارت درب حياتي بدعائها: امي
الغالية

الى روح أبي الغالي رحمه الله.

الى جدتي الحبيبة التي طالما كان دعائها حصنا وتوفيقا لي اطال الله عمرها.

الى اخواتي الاحباء: أسامة، نور التحرير

الى رفيقة دربي ومشواري الدراسي حبيبتي نسبية سعادي متمنية لها التوفيق والصحة والعافية.

الى كل عائلتي و اصدقائي ورفقاء الدراسة واساتذتي الكرام.

والى كل من بدل معي جهدا، ووفر لي وقتا، ونصح لي قولاً اسأل الله ان يجزيهم عني خير الجزاء.

الى كل من ذكرهم قلبي ونسيهم قلمي.

الى دفعة 2023

بن ناسة صابرينة

Remerciement

Nous exprimons nos sincères remerciements et notre gratitude à

*l'honorable professeur **Dr.Daheur Elhadj Guesmia** qui a été*

d'une grande aide pour compléter ce mémorandum au

maximum.

Nous remercions également tous les membres de la famille du

*laboratoire des travaux publics du sud **LTPS***

En particulier le service des matériaux, pour les belles initiatives

et les conseils généraux.

MERCI...

ABSTRACT

The valorisation of local materials for use in road engineering remains topical. The current trend is to adapt road technology to the use of local materials for reasons of economy, availability and the environment. The main objective of this work is to study the potential of integrating dune sand from the Ghardaia region for use in the construction of Saharan pavements. The first part of the experimental study revealed that some dune sand properties are poor and do not meet the requirements of the specifications. The second part is devoted to the study of the effect of the addition of fine limestone on certain geotechnical characteristics of dune sand, which made it possible to choose the mixture containing a rate of fine limestone between 40-50%, as optimum mix that confers the best geotechnical properties.

Key words: local materials, dune Sand, limestone rock, Sharan road technique, flexible pavements.

الملخص

يظل تثمين المواد المحلية لاستخدامها في هندسة الطرق محل اهتمام. الاتجاه الحالي هو تكييف تقنية الطرق مع استخدام المواد المحلية لأسباب الاقتصاد والتوافر والبيئة. الهدف الرئيسي من هذا العمل هو دراسة إمكانية دمج الكثبان الرملية من منطقة غرداية لاستخدامها في بناء أرصفة الصحراء.

أظهر الجزء الأول من الدراسة التجريبية أن بعض خواص الكثبان الرملية رديئة ولا تلبّي متطلبات المواصفات. الجزء الثاني مخصص لدراسة تأثير إضافة الحجر الجيري الناعم على بعض الخصائص الجيوتقنية لرمال الكثبان الرملية، مما جعل من الممكن اختيار الخليط المحتوي على نسبة من الحجر الجيري الناعم بين 40-50% كمزيج مثالي يمنح أفضل الخصائص الجيوتقنية.

الكلمات المفتاحية: المواد المحلية، الكثبان الرملية، الصخور الجيرية، تقنية الطرق الصحراوية، الأرصفة المرنة.

RESUME

La valorisation des matériaux locaux pour une utilisation en technique routière reste d'actualité. La tendance actuelle est d'adapter la technique routière à l'emploi des matériaux locaux pour des raisons d'économie, de disponibilité et environnementale. L'objectif principal de ce travail est l'étude des potentialités de l'intégration de sable de dune de la région de Ghardaïa pour une utilisation dans la construction des chaussées sahariennes.

La première partie de l'étude expérimentale permis de constater que certaines propriétés de sable de dune sont médiocres et ne répondant pas aux exigences des spécifications. La deuxième partie est consacrée à l'étude de l'effet de l'ajout des fines calcaire sur certaines caractéristiques géotechniques du sable de dune, ce qui a permis de choisir le mélange contenant un taux de fines calcaire entre 40-50%, comme mélange optimal qui confère les meilleures propriétés géotechniques.

Mots clés : matériaux locaux, sable de dune, roche calcaire, technique routière saharienne

Liste de Tableaux

Tableaux	Titles	Pages
CHAPITRE I : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE		
Tableau I.1	Classification des sables en fonction des compositions (teneures% massique) (Gherzouli, 2019).	6
Tableau I.2	pression nécessaire pour provoquer la rupture par compression de quelques roches (Keller, 2000)	15
CHAPITRE II : ETUDE D'IDENTIFICATION DES MATERIAUX DE BASE		
Tableau II.1	Quelques valeurs des éléments climatologiques de la Wilaya de GHARDAIA (SMO 2022)	24
Tableau II.2	Résultats Récapitulatif de l'analyse granulométrique	27
Tableau II.3 :	Valeur de limites d'Atterberg.	31
Tableau II.4 :	Valeurs de l'équivalent de sable ES.	33
Tableau II.5 :	Valeur de bleu de méthylène VB.	35
Tableau II.6 :	Classe de sol en fonction du VBS (NF P 94-068,1998).	35
Tableau II.7 :	Caractéristiques optimales de Proctor modifié.	37
Tableaux II.8 :	Caractéristiques de compactage pour quelques matériaux routiers (Gandil P. 1988).	38
Tableau II.9 :	Valeurs des indices CBR.	39
Tableau II.10 :	Proposition de Spécifications pour L'Algérie par ALLOUL (1981) et STRULLOU (1984).	41
Tableau II.11	Résultats de l'analyse chimique sommaire.	43
Tableau II.12 :	Caractéristiques géotechniques et mécaniques de sable de dune et fines calcaire d'oued Metlili.	44
CHAPITRE III : ETUDE D'OPTIMISATION		
Tableau III.1	Degré de compactibilité et de traficabilité (Daheur, 2019).	55

Liste de Figures

Figures	Titles	Pages
CHAPITRE I: ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE		
Figure I.1:	Dune de barkhane	8
FigureI.2:	Dune parabolique	8
Figure I.3:	Dunes en étoile	9
FigureI.4:	Dunetransversale	9
FigureI.5:	dune longitudinal	9
Figure I.6:	Répartition des sables de dune dans le monde (Pye, 2009 cité par Boulkhiout, 2015).	11
CHAPITRE II: ETUDE D'IDENTIFICATION DES MATERIAUX DE BASE		
Figure II.1 :	Localisation du matériau utilisé (Google MAP)	21
Figure II.2 :	Courbe granulométrique de sable de dune et des fines calcaire	27
Figure II.3 :	Appareil de CASAGRANDE Avec son équipement (Dahma, 2020)	29
Figure II.4 :	Principe de la limite de plasticité (Dahma, 2020)	30
Figure II.5 :	Représentation des limites d'Atterberg (Dahma, 2020).	30
Figure II.6 :	Le diagramme de Casagrande.	31
Figure II.7 :	Principe d'essai d'équivalent de sable par piston (Khengaoui, 2013).	32
Figure II.8 :	Schéma du dosage de l'essai au bleu	34
Figure II.9 :	comparaison entre les essais Proctor (normal et modifié) (Keddam, 2015).	36
Figure II.10 :	La courbe de Proctor modifié de sable de dune et des fines calcaire	37
Figure II.11 :	Variation de la résistance à la compression des fines calcaire en fonction de la compacité.	40
Figure II.12 :	Classification de nos matériaux selon GTR.	46
CHAPITRE III : ETUDE D'OPTIMISATION		
Figure III.1 :	Organigramme de conduite d'une étude de formulation.	48
Figure III.2 :	Courbes Proctor modifié des mélanges sable de dune + fines calcaires.	49
Figure III.3 :	variation de (a) la densité sèche maximale et (b) la teneur en eau optimale, en fonction de pourcentage des fines calcaire	49

Figure III.4 :	Courbes d'effort de poinçonnement en fonction de l'enfoncement « CBR Immédiat ».	51
Figure III.5	Courbes d'effort de poinçonnement en fonction de l'enfoncement « CBR Imbibé après 4h ».	52
Figure III.6 :	Courbes d'effort de poinçonnement en fonction de l'enfoncement « CBR Imbibé après 3jours »	53
Figure III.7 :	variation des valeurs des indices CBR en fonction des pourcentages des fines calcaire.	54
Figure III.8 :	L'appareil de cisaillement (Chenini, 2021).	56
Figure III.9 :	Principe de l'Essai de Cisaillement Directe (Boudjabi, 2020).	57
Figures III.10 :	Influence de l'ajout des fines calcaire sur la résistance au cisaillement : (1) courbe contraintes – déplacement (2) chemins de contrainte dans le plan	60
Figure III.11 :	variation de la cohésion et l'angle de frottement en fonction de pourcentage des fines calcaire	61

Listes des photos

Photos	Titles	Pages
CHAPITRE I: ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE		
PhotoI.1	sable de dune	8
Photo I.2	Roche calcaire	13
CHAPITRE II: ETUDE D'IDENTIFICATION DES MATERIAUX DE BASE		
Photo II.1 :	Sable de dune	21
PhotoII.2 :	fines calcaire (étape de préparation)	22
Photo II.3 :	Analyse granulométrique par tamisage	26
Photo II.4 :	Détermination la Limite de Liquidité	29
Photo II.5 :	Les étapes de Essai des équivalentes des sables	32
Photo II.6 :	VB Fines calcaire et Sable de dune	33
Photo II.7 :	Moule Proctor modifié	37
Photo II.8 :	Dame Proctor	37
Photo II.9 :	Préparation d'essai CBR imbibé	39
Photo II.10 :	Presse CBR	39
Photo II. 11 :	Essai de Compression simple de Fines calcaire	40
Photo II.12 :	Essai de traction de Fines calcaire	43

Liste de symbol

SD : sable de dune

FC : fines calcaire

ES : Equivalente de sable

VB : valeur au bleu de méthylène

CBR : california Bearing Ratio : Indice portant californien

ICBR_{imb} : Indice CBR imbibé

ICBR_{imed} : Indice CBR immédiat

IP : Indice de plasticité

WL : Limite de plasticité

W_p : Limite de liquidité

W : Teneur en eau

RC : Résistance à la compression simple

Cu : coefficient d'uniformité ou COEFICIENT DE HAZEN

Cc : coefficient de courbure

γ_{Dax} : Densité séché optimale de l'essai Proctor modifié

ESV : Valeur de l'Equivanle de sable visuel

C : terme de cohésion

ϕ : Angle de frottement

σ : contrainte normale.

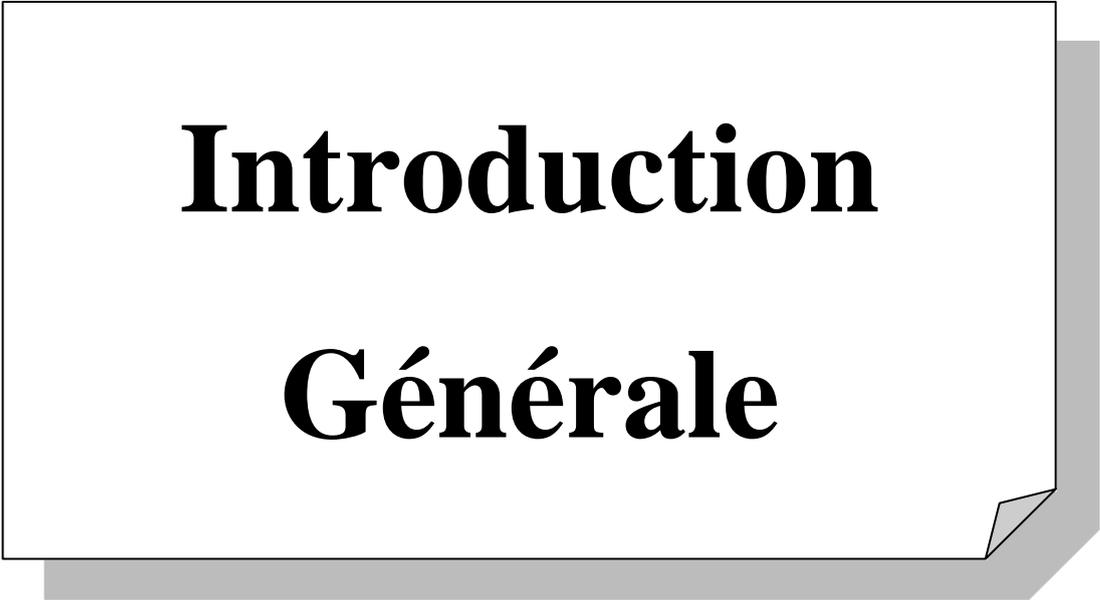
Table des matières

Dédicace	
Remerciement	
Résumé	V
Abstract	V
المخلص	VI
LISTE DES TABLEAUX	VII
LISTE DES FIGURES	VIII
LISTE DES PHOTOS	X
Liste de symbol	XI
Table de matières	XII
Introduction Générale	1
CHAPITRE I : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE	
I.1. INTRODUCTION	3
I.2. LES SABLES	3
I.2.1. Définition	3
I.2.2. Origine des sables	3
I.2.3. Type des sables	4
I.3.2.1 Type du sable dans le Sahara	5
I.2.4. Classification des Sables	6
I.3. SABLE DE DUNE	7
I.3.1. Définition	7
I.3.2. Différentes formes des dunes	8
I.3.2.1. Dune de barkhane	8
I.3.2.2. La dune parabolique	8
I.3.2.3. Les dunes en étoile	9

I.3.2.4. Les dunes transversales	9
I.3.2.5. Les dunes longitudinales	9
I.3.4. Intérêt de sable de dune	10
I.3.4.1. Les aspects économiques	10
I.3.4.2. Les aspects techniques	10
I.3.5. Formation et localisation des sables de dune	10
I.3.6. caractéristique des sables de dunes du Sahara	11
I.4. ROCHE CALCAIRE	12
I.4.1. Définition	12
I.4.2. Les origines des roches calcaires	13
I.4.3. La formation des roches calcaire	14
I.4.4. Les caractéristiques physiques et les aptitudes mécaniques des calcaires	14
I.4.4.1. Les caractéristiques physiques	15
I.4.4.2. Les aptitudes mécaniques	15
I.4.5. L'utilisation des roches calcaires	16
I.4.5.1. L'utilisation des roches calcaires dans la construction	16
I.5. UTILISATION DU SABLE DE DUNES DANS LE DOMAINE ROUTIER	16
I.6. Tuf-Sable de dune	17
I.7. Les tuf-sable-bitume	18
I.8 CONCLUSION	19
CHAPITRE II : ETUDE D'IDENTIFICATION DES MATERIAUX DE BASE	
II.1. INTRODUCTION	20
II.2. PRESENTATION ET LOCALISATION DES MATERIAUX	20
II.2.1. Présentation de la Wilaya de GHARDAIA	22
II.2.1.1. Climatologie de GHARDAIA	22
II.3. ETUDE D'IDENTIFICATION GEOTECHNIQUE	24
II.3.1. Analyse granulométrique	25

II.3.1.1. Analyse granulométrique par tamisage (NF P18-560)	25
II.3.1.2. Analyse granulométrique par sédimentométrie (NFP 94-057)	26
II.3.2. Qualitatif fines	28
II.3.2.1. Limites d'Atterberg (NFP 94 – 051)	28
II.4.2. Equivalent de sable (NF P 18 598)	32
II.4.3. Valeur de bleu de méthylène VBS (NF P 94-068)	33
II.5.3. Essai de compactage et de portance	35
II.5.3.1. Essai de compactage	35
II.5.3.2. Essai de portance (Essai CBR) (NF P 94-078)	38
II.5.3.3 Essai de compression simple	39
II.5.4. La résistance à la traction	42
II.5.5. Analyse chimique sommaire	43
II.5.6. Récapitulatif des essais d'identification	44
II.5.7. Classification de nos échantillons	45
II.6. CONCLUSION	46
CHAPITRE III : ETUDE D'OPTIMISATION	
III.1. INTRODUCTION	47
III.2. Etude de l'influence de l'ajout des fines calcaire sur le sable de dune au laboratoire	48
III.3. L'influence sur les caractéristiques de compactage et de portance	49
III.3.1. Essais Proctor modifié	49
III.3.2. Essais CBR	50
III.4. L'influence sur résistance au cisaillement directe (NFP94-071-1)	55
III.4.1. Appareillage	55
III.4.2. Le Principe	56
III.4.3. Préparation des échantillons	57
III.5. CONCLUSION	61

Conclusion Générale	62
Références bibliographiques	63
Annexes	67



Introduction

Générale

Introduction Générale

La valorisation des matériaux locaux en géotechnique **leur** reste un thème d'actualité ; il s'agit de mieux maîtriser **leur** comportement et **leur** mise en œuvre dans diverses situations afin d'en tirer des caractéristiques qui l'aident **leur** classification et **leur** utilisation par les ingénieurs et techniciens routiers.

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

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

Les sables de dunes sont considérés comme des matériaux de qualité médiocre (non compactables, de faible portance, de pourcentage de vides élevé, de granulométrie homogène...). Leurs utilisations à l'état brut dans la construction des routes ~~est non acceptable~~. La nécessité d'améliorer ces performances mécaniques (stabilités, compacité, résistances à la compression et à la traction) avec des liants hydrocarbonés (bitumes purs, fluidifiés) ou hydrauliques (ciment), ou les mélanges avec d'autres matériaux riches en fines est l'une des solutions les plus **appropriées** pour leurs intégrations dans le domaine de la construction des routes.

La roche calcaire est une roche sédimentaire carbonatée principalement composée de calcaire ou de carbonate de calcium elle occupe une grande surface dans la région saharienne.

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

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

La première partie se compose d'un seul chapitre qui est consacré à une étude bibliographique sur les sables de dune (définition, formulation et localisation, caractéristique, utilisation dans le domaine routier ...etc.)

La seconde partie (pratique), présente l'étude expérimentale qui s'est déroulées dans le Laboratoire des Travaux Public du Sud (LTPS), elle comporte deux chapitres :

Le chapitre II : présente l'étude identification des matériaux des bases (caractéristiques géotechniques du sable de dune et des fines calcaire).

Le chapitre III : s'intéresse à l'étude d'optimisation (amélioration des caractéristiques de sable de dune). L'objectif est de choisir un mélange optimal sable de dune- fines calcaires qui présente les meilleures caractéristiques mécaniques.

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

CHAPITRE I :

ETUDE

BIBLIOGRAPHIQUE

Chapitre I

ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

I.1. INTRODUCTION:

Dans ce premier chapitre, nous présenterons un aperçu sur les sables leurs origines, leurs classifications et leurs principales caractéristiques. Nous passerons également en revue pour donner un aperçu sur leurs applications dans la construction des routes sahariennes.

I.2. LES SABLES:

I.2.1. Définition :

On définit les sables comme étant la fraction des granulats pierreux dont les grains ont des dimensions comprises entre 80 μm et 05 mm ; il s'agit d'une définition globale, dont les bornes varient d'une classification à une autre. Ce sont aussi les matériaux dont le diamètre maximal est inférieur à 6,3mm et dont le passant à 80 microns n'excède pas 30% (Chauvin, 1987).

Dans le sens le plus courant, on entend par "sable" les éléments de dimensions 0 à 5 mm, non compris les fillers. A cette définition se rattachent les sables de concassage ; mais lorsqu'on dit sable, on pense essentiellement aux sables naturels abondants dans de nombreux pays et dont les réserves sont quasi inépuisables.

En fait, la définition granulométrique du sable est plus compliquée, elle varie suivant les époques et diffère suivant la paysse selon la destination (Kettaf, 2007).

I.2.2. Origine des sables :

Les sables rencontrés sont le résultat d'une décomposition chimique ou d'une désintégration mécanique des rochers, suivie par un processus de transport qui est à l'origine de leurs caractéristiques physico-chimiques ; les sables ainsi disponibles sont le résultat d'un processus souvent complexe d'érosion et de sédimentation.

Ils comportent, à des degrés divers une décomposition sur place, des différentes

roches, suivie d'un transport fluvial et parfois éolien (Marouf, 2019).

I.2.3. Type des sables :

a) Sable alluvionnaire :

Le sable alluvionnaire, dit aussi roulé, dont la forme a été acquise par l'érosion. Il est issu de roches meubles des dépôts des alluvions trouvés dans les lits des fleuves ou des rivières.

Bien qu'on puisse trouver différentes roches selon la région d'origine, le sable utilisé pour le béton est le plus souvent siliceux.

Ce sable, plus recommandé à la confection des bétons, doit présenter une granularité telle que les éléments fins ne soient ni en excès, ni en trop faible proportion (Saidane, 2020).

b) Sable de carrière :

Le sable de carrière, dit aussi concassé, est un sous-produit des processus industriels contrôlés de concassage, de lavage et de criblage appliqués à des roches massives généralement calcaires.

Ce sable, qui se trouve couramment dans la classe granulaire 0/3 mm, est rarement utilisé dans la confection des bétons en raison de leur taux élevé en fines qui varie de 8 à 30 % et provoquant ainsi un problème de stockage au niveau des carrières. Plusieurs recherches ont été menées pour la valorisation de sable de carrière dans la confection des mortiers, bétons et dans la conception des routes. En effet, elles ont trouvé que la morphologie de ces grains angulaires est plus adaptée à un meilleur accrochage à la pâte de ciment que celle de sables roulés, ce qui offre plus de résistances au béton.

L'utilisation de sable de carrière est déterminée par sa granulométrie et ses caractéristiques physiques, mécaniques et chimiques. En générale, il s'utilise pour des sous-fondations et fondations, des applications liées au ciment, par exemple du béton, la production de mélanges bitumineux et dans les couches des chaussées sahariennes (Ben Fettacha, 2016).

C) Sable de dune:

Le sable de dune est un produit de la désagrégation lente des roches sous l'action des agents d'érosion tels que l'air, la pluie etc. Les déserts de sable, ou ergs, se localisent dans les vastes cuvettes d'épandage ou des puissantes accumulations alluviales se sont concentrées par de grands écoulements liés aux périodes pluviales du début du quaternaire. Les grands ergs coïncident avec des zones où des vents saisonniers de directions variées se compensent.

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 opposer.

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 propriété apparente, forme une solution au problème d'épuisement des ressources naturelles est présente comme un matériau d'avenir (Ben Fettacha, 2011).

I.3.2.1 Type du sable dans le Sahara :

1/ L'ERG : C'est ainsi que l'on nomme les grandes dunes de sable, si spécifiques au Sahara. Elles ont la particularité d'être fixe, même si le vent les balaye fréquemment à la surface.

2/ LE REG : Contrairement à l'Erg, le Reg est un désert de pierres et de cailloux. Il forme de grandes plaines à perte de vue qui donnent un aspect très lunaire avec parfois, par accumulation, des monticules qui se forment, comme les champignons que l'on retrouve dans le Reg de l'Hoggar.

3/ L'HAMADA : C'est un plateau surélevé, qui ressemble beaucoup au reg. Ils sont d'ailleurs souvent assimilés car également formés de cailloux et de pierres.

4/ L'OUED : Ce sont les lits des fleuves et des rivières. Presque tout le temps secs, ils forment souvent des plaines ponctuées de quelques arbres.

5/ L'OASIS : C'est magique quand on se retrouve au milieu d'une Oasis et qu'on profite d'un peu de fraîcheur. Les oasis n'arrivent pas là naturellement : ce sont les hommes qui profitent d'un point d'eau (nappe phréatique ou lit de rivière) pour y planter quelques arbres, souvent des palmiers pour développer un peu de culture.

6/ LES MONTAGNES : Et oui, vous trouverez également des montagnes dans le désert. Elles sont souvent volcaniques mais peuvent également être le résultat de l'érosion de plateaux, comme les tassilis.

7/ LES TASSILIS : Ces plateaux de gré, sont par érosion, creusés et forment alors des canyons spectaculaires. On en trouve par exemple en Libye avec le Tassili de Maghidet (Chenini, 2021).

I.2.4. Classification des Sables :

a) Selon son origine:

Le sable, en fonction de son origine, peut être classé en trois catégories :

- **Naturel:** d'origine minérale, issus de roches meubles (alluvions des fleuves ou des rivières), de roches massives (sédimentaire, éruptives, métamorphique, etc.) ou de dunes. Le sable naturel n'ayant subi aucune transformation autre que mécanique (tels que concassage, broyage, criblage, lavage).
- **Artificiel:** d'origine minérale résultant d'un procédé industriel comprenant des transformations thermiques ou autres.
- **Recyclé :** obtenu par traitement d'une matière inorganique utilisée précédemment dans la construction, tels que des bétons de démolition.

b) Selon sa composition:

En fonction de sa composition minéralogique (teneurs en silice, alumine et chaux), le sable peut être classé en quatre catégories (Tableau I.1).

Tableau I.1 : Classification des sables en fonction des compositions (teneurs% massique) (Gherzouli, 2019).

Composition	SiO₂ (%)	CaO (%)	Al₂O₃ (%)
Siliceux	70 à90	0,1 à1	1 à10
Silico- alumineux	50 à70	1 à5	10 à25
Silico-calcaires	15 à20	15 à30	3 à10
Calcaires	2 à10	30 à50	0,5 à2

c) Selon sa densité:

Selon la densité de sable, on distingue trois types :

- **Léger** : de masse volumique comprise entre 1200 et 2000 kg/m³, et le plus usuel est à base d'argile expansée, des chiste expansé soudé la ite expansé.
- **Courant** : de masse volumique entre 2000 et 3000 kg/m³, et il est généralement les basaltes, quartzites, grès, porphyre, diorite, granites, schistes, laitier.
- **Light** : de masse volumique varie de 4000 à 8000 kg/m³, et le plus utilisé est la barytine (d'une densité absolue de 4,2 à 4,7), la magnétite (d'une densité absolue de 4,5 à 5,1), les riblons (d'une densité absolue de 7,6 à 7,8) et la grenaille (d'une densité absolue de 7,6 à 7,8).

d) Selon sa forme :

Selon la forme de sable, on peut désigner deux grands types:

- Roulé: dont la forme a été acquise par l'érosion de roches meubles (alluvions des fleuves ou des rivières) ou des dunes.
- Angulaire ou Concassé : dont la forme a été obtenue par battage et concassage de roches massives et dures (Gherzouli, 2019).

I.3. SABLE DE DUNE :**I I.3.1. Définition:**

Les sables, que l'on trouve dans les dunes mouvantes, sont composés de particules siliceuses pratiquement de même taille et de petites dimensions. Ces sables sont accumulés sous forme de dunes mouvantes de hauteur très variable D'après Fookes et Higginbotham (1968). (Ben Dhia, 1998), le Sahara est constitué d'environ 40 % de montages désertiques, 15 % de plaines désertiques et 30 % de dunes de sable, le reste étant constitué de sebkhas, de chotts, etc., quant à lui, couvre environ le tiers du continent africain. Ces chiffres montrent bien l'intérêt que l'on doit apporter à la construction routière dans le Sahara, qui reste Fort démunie infrastructures, et aussi l'importance que l'on doit accorder au sable dans toute investigation visant la valorisation des matériaux locaux dans ces lieux (Khengaoui, 2013).



PhotoI.1 : sable de dune

I.3.2. Différentes formes des dunes:

I.3.2.1. Dune de barkhane:

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

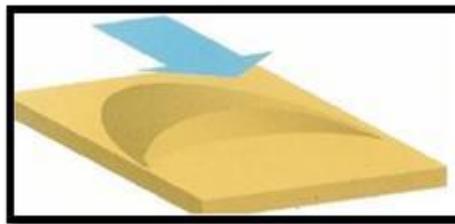


Figure I.1: Dune de barkhane

I.3.2.2. La dune parabolique:

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



FigureI.2: Dune parabolique

I.3.2.3. Les dunes en étoile:

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

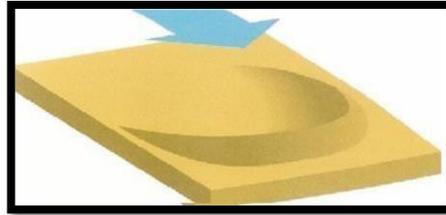


Figure I.3: Dunes en étoile

I.3.2.4. Les dunes transversales:

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

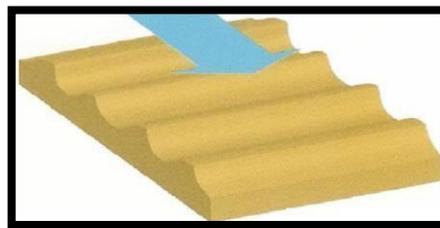


Figure I.4: Dune transversale

I.3.2.5. Les dunes longitudinales:

Allongées dans le sens du vent. Elles peuvent apparaître si le vent change de direction au cours de l'année. Plus précisément elles peuvent apparaître si le vent possède deux directions privilégiées. La dune est alors étirée dans le sens du vent moyen. On parle aussi du « Seif » dunes. Leur dynamique est bien plus complexe que pour les barkhanes puis que leur forme évolue beaucoup au cours du temps (Khalili, 2016).

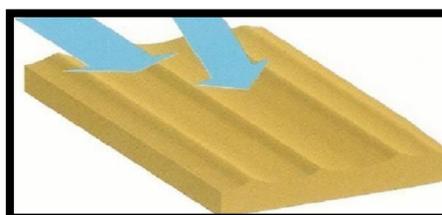


Figure I.5: dune longitudinal

I.3.4. Intérêt de sable de dune:

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

I.3.4.1. Les aspects économiques :

Les aspects sont 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.

I.3.4.2. 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 (Balhachemi, 2017).

I.3.5. Formation et localisation des sables de dune :

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

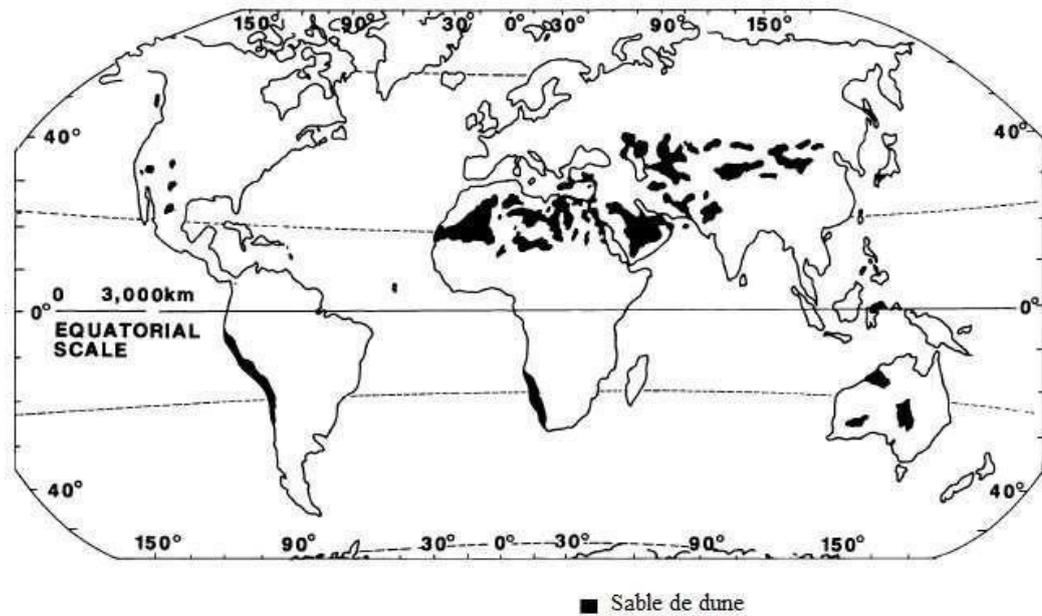


Figure I.6 : Répartition des sables de dune dans le monde (Pye, 2009 cité par Boulkhiout, 2015).

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

I.3.6. caractéristique des sables de dunes du Sahara :

➤ Composition chimique

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

➤ Granulométrie

Le diamètre des plus gros éléments des sables des dunes du Sahara est de l'ordre de 0,5mm. Il est maximal aux endroits les plus proches de la roche mère et diminue de plus en plus quand on s'en éloigne. Les particules deviennent aussi de plus en plus arrondies. Le diamètre des éléments les plus fins est de l'ordre de 0,04 mm

Le coefficient d'uniformité ($C_u = D_{60} / D_{10}$) est de l'ordre de 1,8 et le coefficient de courbure ($C_c = D_{30}^2 / [D_{10} \cdot D_{60}]$) est de l'ordre de 10. Il s'agit donc d'un sable très fin mal gradué.

➤ **Propreté**

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

➤ **Comportement mécanique**

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

-l'effet de la teneur en eau sur le compactage est peu significatif quand la teneur en eau est faible (0 à 6%);

- La cohésion à une valeur très faible, de l'ordre de 5kPa;
- l'angle de frottement interne varie de 30 à 35°, selon la densité du sable.

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

I.4. ROCHE CALCAIRE :

I.4.1. Définition :

Les calcaires sont des roches sédimentaires, inégalement résistants, plus ou moins perméables. Ils sont composés d'au moins 70% de calcite et peuvent contenir de la silice, de l'argile et de la matière organique, ainsi que d'autres minéraux dont les plus courants la dolomite.

Le calcaire est reconnaissable par sa teinte blanche et généralement la présence des fossiles (Derville, 1931).



Photo I.2: Roche calcaire

I.4.2. Les origines des roches calcaires :

- **Origine détritique**

- Calcaires détritiques.

- **Origine organique**

- 1- **Calcaires construits (calcaires coralliens)**

- Calcaires à rudiste.
- Calcaires à bryozoaires.
- Calcaires d'algues.

- 2- **Calcaires d'accumulation (calcaires à entroques)**

- Calcaires à foraminifères.
- Lumachelles.

- **Origine chimique ou biochimique**

- Calcaires lacustres.
- Tufs ou travertins.
- Calcaires grumeleux ou noduleux
- Calcaires marneux et les marnes. (Castaing et Geisle, 1972).

I.4.3. La formation des roches calcaire :

On pense que les roches calcaires existent depuis plus de 3 milliards d'années, ce qui correspond à l'ère précambrienne. Les mers peu profondes de l'époque fournissaient un terrain idéal pour la formation du carbonate de calcium.

Les roches calcaires peuvent se former :

- Soit, par accumulation biologique de carbonate de calcium se produit dans une eau (de mer de préférence) comprise entre 25 et 30 C° contenant des coraux, des algues et des coquillages. Les eaux ne doivent pas être trop profondes pour permettre aux organismes de profiter des rayons solaires : on parle alors de calcaire d'origine organique.
- Soit, par précipitation chimique ou biochimique de carbonate de calcium : on parle alors de calcaire d'origine chimique.

Parmi les calcaires d'origine organique, on trouve les calcaires à foraminifères comme la craie.

Parmi les calcaires d'origine chimique, on trouve la calcite, le calcaire oolithique, pisolithique ou encore lithographique (utilisé en imprimerie avec un grain très fin).

Les zones les plus favorables pour la formation du calcaire se trouvent sur le bord des continents (essentiellement en zones tropicales et équatoriales). Les récifs qui s'y développent, forment une barrière qui casse les courants marins. On distingue alors trois milieux.

- La barrière de corail et sa faune associée.
- La plateforme interne, protégée des courants est donc favorable au développement de la faune et de la flore.
- La plateforme externe, soumise à la violence des courants marins où les coquilles seront brisées (Brouri, 2020).

I.4.4. Les caractéristiques physiques et les aptitudes mécaniques des calcaires :

Un matériau est une substance solide, destinée à un emploi donné, présentant un certain caractère de permanence.

I.4.4.1. Les caractéristiques physiques:

- La densité apparente : détermine la résistance à l'écrasement, elle varie entre 2 et 2.8 une bonne pierre de calcaire devra avoir une densité apparente au moins égale à 2.5 ;
- Le coefficient de taille : Il est initialement prévu pour apprécier la difficulté de taille du matériau et estimer le temps nécessaire au travail. Les professionnels de la pierre classent les matériaux selon une échelle de dureté, en leur attribuant un coefficient de taille de 1 à 14, de la plus tendre à la plus froide ;
- Porosité : La porosité est conditionnée par l'indice de taille et la densité du matériau. Plus l'indice de taille est élevé, moins la roche est poreuse ;
- La gélivité : conséquence de la perméabilité et de la capillarité de la roche ; dépend de la taille des pores (Beauchamp, 2003).

I.4.4.2. Les aptitudes mécaniques :

- La résistance à l'écrasement: est conditionnée par la densité du matériau, elle consiste à mesurer la charge de compression nécessaire à provoquer la déformation, la fracturation, l'éclatement ou l'écroulement d'un échantillon.

Tableau I.2 : pression nécessaire pour provoquer la rupture par compression de quelques roches (Keller, 2000)

Roches	Résistance à la Compression (MPa)
Granit	100-280
Grès	40-110
Calcaire	50-60
Quartzite	150-600
Marbre	100-125

- La largeur de la rayure: elle permet de déterminer la dureté superficielle du matériau, sa résistance à l'usure, à l'érosion et aux chocs;
- La vitesse de propagation du son : elle est utilisée pour déterminer la qualité d'un matériau, plus les compétences techniques du matériau sont élevées, plus la propagation du son est rapide. Elle dépend des propriétés élastiques de la roche ainsi que de son état (lié à la porosité, à la présence de fissures...) (Dercourt et Paquet, 1995).

I.4.5. L'utilisation des roches calcaires :

Le calcaire est une roche sédimentaire composée en grande partie ou entièrement de carbonate de calcium (CaCO_3). Les roches carbonatées, et dans certains cas le marbre, qui ressemblent étrangement au calcaire, sont importantes dans l'industrie de la construction comme pierre de construction et granulat, et en tant que première composante du ciment portland et de la chaux.

Le calcaire est aussi utilisé dans la fabrication du verre et de bon nombre de produits chimiques, comme matières de charge, abrasifs ou amendements pour le sol.

I.4.5.1. L'utilisation des roches calcaires dans la construction :

- Comme matériau en sculpture.
- Comme roche à bâtir.
- Comme matériau d'empierrement de la voirie: macadam, graves calcaires, ballast, d'un usage très fréquent.
- Comme matière première entrant dans la fabrication du ciment.
- Comme sable et granulat dans la fabrication des bétons, plus rarement dans les enrobés bitumineux, pour les calcaires les plus durs (Brouri, 2020).

II I.5. UTILISATION DU SABLE DE DUNES DANS LE DOMAINE ROUTIER :

III L'utilisation des sables en techniques routières n'est pas nouvelle. A l'état brut, les sables de dunes n'ont pas des caractéristiques mécaniques satisfaisantes aussi bien pour les structures que pour la réalisation des différentes couches de chaussées, permettant ainsi de reprendre les sollicitations dues à la circulation. Ils sont pratiquement non compactables et leurs portances sont très faibles. L'utilisation du sable de dune seul ne peut être envisagée malgré la facilité qu'il présente au reprofilage, car sa stabilité de surface est souvent incertaine, ce qui augmente la résistance au roulement et provoque parfois des enlissements (Ben Dhia, 1998).

IV Ould Sid et al. (1995) cité par Ben Dhia, 1998 a réalisé des essais de compactage puis decisaillage direct sur le sable de dune. Les principaux résultats trouvés sont :

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

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

Le traitement des sables de dune devient indispensable dans la plupart des structures ; il a pour but d'améliorer leurs performances mécaniques en leur conférant des caractéristiques mécaniques et de stabilité suffisantes leur permettant de résister aux sollicitations imposées.

Plusieurs études de traitement des sables de dune aux liants hydrocarbonés ou hydrauliques ou mélangés avec d'autres granulats (Ben Dhia, 1998 ; Kettab, et al. 2002 ; Nedjari, 2003 ; Kettab, 2007 ; Morsli, 2007 ; Ghrieb, et al. 2014 ; Cherrak, et al. 2015 ; Akacem, 2017) ont été réalisées.

Ben Dhia, (1998) dans une tentative de valorisation du sable de dune, a mélangé ce dernier, à différents taux, avec divers matériaux : grave naturelle, tuf calcaire, tuf gypseux et sol argileux et a conclu que l'incorporation du sable de dune améliore la portance des matériaux, le poids volumique est aussi amélioré lorsque la teneur en sable augmente jusqu'à 30% et la plasticité diminue au profit d'une meilleure propriété.

I.6. Tuf-Sable de dune :

L'utilisation du sable en techniques routières n'est pas nouvelle. Beaucoup d'études et de réalisations ont été faites et un guide pratique d'utilisation routière des sables a été publié (Chauvin 1987). Cependant les sables de dune constituent un cas particulier pour lequel les directives et recommandations ne peuvent pas être appliquées sans études spécifiques.

Ben Dhia (1998) dans une tentative de valorisation du sable de dune, a mélangé ce dernier, à différents taux, avec divers matériaux : grave naturelle, tuf calcaire, tuf gypseux et sol argileux et a conclu que :

- l'incorporation du sable de dune améliore la portance des matériaux.
- le poids volumique s'améliore aussi lorsque la teneur en sable augmente jusqu'à 30%

- la plasticité diminue au profit d'une nette amélioration de la propreté.

En Algérie, vu l'abondance du sable de dune, l'idée de l'association de tuf avec le sable de dune au laboratoire paraît très intéressante (Morsli, et al. 2005 a. Morsli ,2007 ; Morsli et al. 2007). L'étude a porté sur l'effet de l'incorporation d'un sable de dune sur les caractéristiques géotechniques et mécaniques d'un tuf calcaire de la région de Becher. L'objectif était de tester les possibilités d'amélioration des caractéristiques de ce tuf par une technique de stabilisation économique permettant de valoriser à la fois le sable de dune et le tuf calcaire pulvérulent .

I.7. Les tuf-sable-bitume :

Cette technique permet, à partir de deux matériaux marginaux (tuf tendre et sable fin) de réaliser des assises de chaussées traitées au bitume.

Les tufs-sables-bitume peuvent être utilisés en assises de chaussées faiblement ou moyennement circulées ; ils sont alors protégés par un enduit superficiel. La présence d'éléments très friables en surface ne permet pas en effet de livrer longtemps les tufs- sables-bitume à la circulation sans protection. Pour ce type de chantier, les épaisseurs sont de l'ordre de 10 cm. Dans le cas des chaussées fortement circulées, on doit les recouvrir par une couche de roulement en béton bitumineux de 5 à 6 cm.

Le seul défaut de cette technique réside dans la nécessité d'utiliser une teneur en bitume très élevée (8 à 10 %), ce qui rend cette technique peu économique dans les pays non producteurs de bitume. Elle repose sur les idées de base suivante :

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

Les formules traditionnelles mises au point pour chaque chantier à l'issue d'une étude de formulation comportent en principe : 50 à 65 % de tuf calcaire plus 50 à 35 % de sable siliceux mélangé avec 8 à 10 % de bitume 70 (Daheur, 2019).

CONCLUSION :

Nous avons présenté dans ce chapitre des généralités sur les matériaux de base utilisés dans ce travail (sable de dune et la roche calcaire) telle que, définition, leurs formations, leurs répartitions dans le monde, leurs caractéristiques physique et mécanique, leurs utilisations dans le domaine routier.

Également, on a parlé sur les devers techniques d'amélioration des propriétés de sable de dune dans le domaine routier.

Les chapitres suivants sont consacrés à une étude approfondie sur les caractéristiques géotechniques et mécaniques de ces matériaux ainsi que son aptitude d'utilisation dans la construction des routes au Sahara.

CHAPITRE II :

ETUDE D'IDENTIFICATION DES MATERIAUX DE BASE

Chapitre II

ETUDE D'IDENTIFICATION DES MATERIAUX DE BASE

II.1. INTRODUCTION :

Dans ce chapitre, l'étude menée pour la détermination des matériaux de base utilisés à l'aide d'essais géotechniques conventionnels qui ont réalisés au laboratoire des travaux publics de sud (LTPS). Pour :

- 1) Comparer les résultats des essais avec les limites recommandées par les spécifications et les normes approuvées pour une utilisation en corps de routes.
- 2) Classer les matériaux de base selon certaines caractéristiques propriétés.

II.2. PRESENTATION ET LOCALISATION DES MATERIAUX :

Dans notre étude nous avons choisi deux matériaux de natures différentes, le premier est Sable de dune et le second c'est Fines calcaire :

Le sable de dune (SD) : c'est un matériau poreux, à l'œil nu, composé des grains discret de forme arrondis et de diamètre uniforme (Photo II.1).

Fines calcaire (FC) : c'est une roche qui est broyée dans le laboratoire des travaux public pour obtenir une poudre afin de l'utiliser et de l'ajouter pour améliorer les matériaux (Photo II.2).

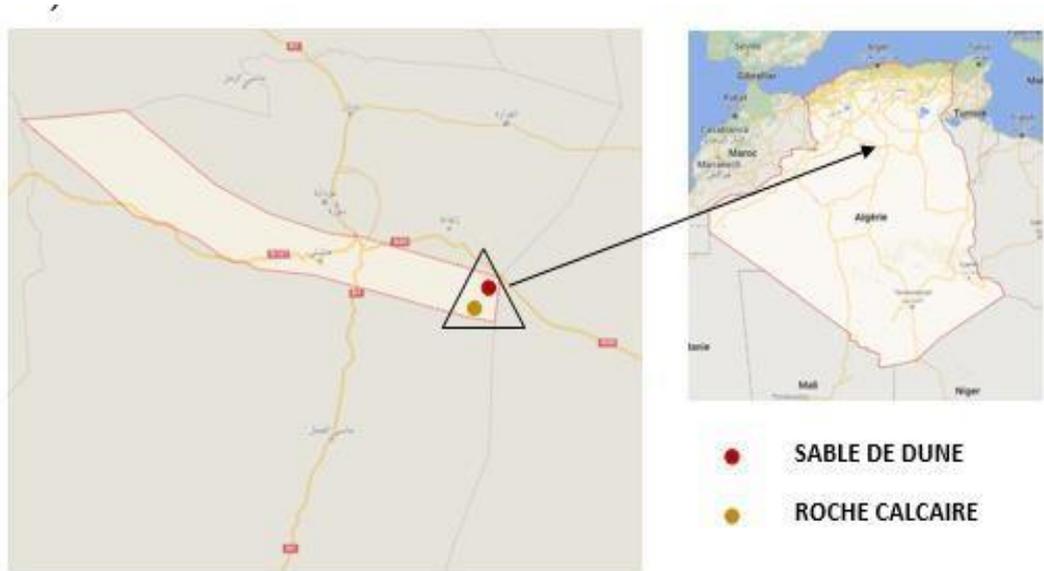


Figure II.1 : Localisation du matériau utilisé.



Photo II.1 : Sable de dune



(1)



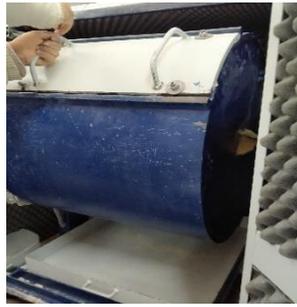
(2)



(3)



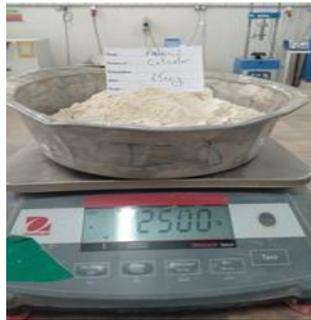
(4)



(5)



(6)



(7)

PhotoII.2 : fines calcaire (étape de préparation)

II.2.1. Présentation de la Wilaya de GHARDAIA :

La wilaya de Ghardaïa située au centre de l'Algérie dans le Nord du Sahara algérien, à 600 km au sud d'Alger, à 190 km au sud de Laghouat, à 270 km d'El Menia et à 190 km à l'ouest de Ouargla à 45 km la région de Metlili. Elle considérée l'une des wilayas les plus importantes du pays, tant par son emplacement géographique et stratégique, sa densité de population (plus de 93 000 habitants).

II.2.1.1. Climatologie de GHARDAIA :

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

a. Température

La température moyenne mensuelle enregistrée par la station de GHARDAIA durant la période 2012 – 2022 varie entre un minimum de 5 °C en janvier 2012 et un maximum de 45 °C en juillet 2018.

b. L'humidité

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

c. Les vents

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

d. Pluviométrie

La pluviométrie est très faible, la moyenne annuelle des dix dernières années (2008 – 2022) est de 37,7mm.

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

e. Evaporation

La moyenne mensuelle de l'évaporation durant la période (2008-2022) est de 234,51 mm, et le total annuel durant cette période varie entre 2417 et 3522mm.

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

f. Insolation

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

*Le **tableau II.1** présente quelques éléments climatologiques de la période (2012-2022) de la wilaya GHARDAIA

Tableau II.1 : Quelques valeurs des éléments climatologiques de la Wilaya de GHARDAIA (SMO 2022)

Année	T	TM	Tm	PP	V	RA	SN	TS	FG	TN	GR
2012	22,9	29	16,8	39,89	-	31	1	5	0	0	0
2013	22,6	28,7	16,6	62,21	14,7	28	0	10	0	0	0
2014	23,3	29,5	17,3	35,29	14,6	24	0	10	0	0	0
2015	22,5	28,6	16,4	47,49	13,9	31	0	19	0	0	0
2016	23,2	29,3	17,1	17,51	14,2	21	0	12	0	0	0
2017	22,5	28,1	16,5	-	13,5	22	0	10	0	0	0
2018	22,5	28	16,6	51,31	14,1	25	1	23	0	0	0
2019	22,8	28,5	16,5	70,6	11,4	26	0	15	0	0	0
2020	23	28,8	16,7	22,86	12,1	19	0	15	0	0	1
2021	23,8	29,4	17,7	35,56	13	25	0	10	0	0	0
2022	23,4	29,2	17,2	15,74	12,7	20	0	14	0	0	0

(T)Température moyenne annuelle , (TM)Température maximale moyenne annuelle, (Tm)Température minimale moyenne annuelle, (PP)Précipitation totale annuelle de pluie et/ou neige fondue (mm),(V)Vitesse moyenne annuelle du vent (Km/h), (RA)Total jours de pluie durant l'année , (SN)Total jours de neige durant l'année, (TS)Total jours de tempête durant l'année, (FG)Total jours de brouillard durant l'année, (TN)Total jours de tornades ou nuages en entonnoir durant l'année, (GR)Total jours de grêle durant l'année.

II.3. ETUDE D'IDENTIFICATION GEOTECHNIQUE :

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

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

- Analyses granulométriques (sable de dune et fines calcaire).
- Les limites d'Atterberg (sable de dune et fines calcaire).

- L'équivalent de sable (sable de dune).
- Essais au bleu de méthylène (sable de dune et fines calcaire).
- Essais de Proctor modifié (sable de dune et fines calcaire).
- Essais de CBR (sable de dune et fines calcaire).
- Essai de compression simple (fines calcaire).
- Essais de Traction (fines calcaire).
- Analyses chimiques (sable de dune et fines calcaire).

II.3.1. Analyse granulométrique :

II.3.1.1. Analyse granulométrique par tamisage (NF P18-560) :

L'analyse a été effectuée conformément à la norme (NF P18-560), en utilisant les tamis. Nécessaires à la couverture des dimensions de l'échantillon.

➤ **But de l'essai**

Le but de l'analyse granulométrique est de classer et exprimer les poids des particules constituant un échantillon de sol en fonction des diamètres de ces particules. Cette classification donne des informations intéressantes sur la composition des granulats qui constituent l'échantillon, c'est-à-dire les composantes de ce sol.

➤ **Principe de l'essai**

L'essai granulométrique consiste à fractionner, au moyen d'une série de tamis, un matériau en plusieurs classes granulaires de tailles décroissantes. Les dimensions de mailles et le nombre de tamis sont choisis en fonction de la nature de l'échantillon et de la précision projetée.

Les masses des différents refus (ou, par soustraction, celles des différents tamisats) sont rapportées à la masse initiale de matériau. Les pourcentages, ainsi obtenus, sont exploités soit sous leur forme numérique, soit sous une forme graphique (courbe granulométrique).



Photo II.3 : Analyse granulométrique par tamisage

II.3.1.2. Analyse granulométrique par sédimentométrie (NFP 94-057) :

L'analyse granulométrique des éléments inférieurs à $80\ \mu\text{m}$ est effectuée par sédimentation selon la norme NFP 94-057, où il n'est pas possible d'utiliser des tamis, et complète, donc, l'analyse granulométrique par tamisage. Nous n'avons pas réalisés cette analyse pour le sable de dune étant donné que le pourcentage des éléments inférieurs à $80\ \mu\text{m}$ est très faible.

La figure II.2. Présente les courbes granulométriques de nos échantillons. Les paramètres les plus significatifs tirés de cette analyse, ainsi les seuils préconisés par les spécifications de la technique routière saharienne TRS (Fenzy, 1966), catalogue de dimensionnement des chaussées neuves (CTTP, 2001) et le guide technique routière GTR (GTR, 1992), sont regroupés dans le tableau II.2. D'après ces résultats, on constate que :

Le sable de dune : possède une courbe granulométrique uniforme sériée ($C_u = 3.22$), avec un taux des fines ($< 80\ \mu\text{m}$) inférieurs à 10%.

Les fines calcaires : a une courbe granulométrique étalée ($C_u = 19$), avec un taux de sable ($< 2\ \text{mm}$) de l'ordre de 45% et une fraction élevée de fines ($< 80\ \mu\text{m}$) de l'ordre de 72%.

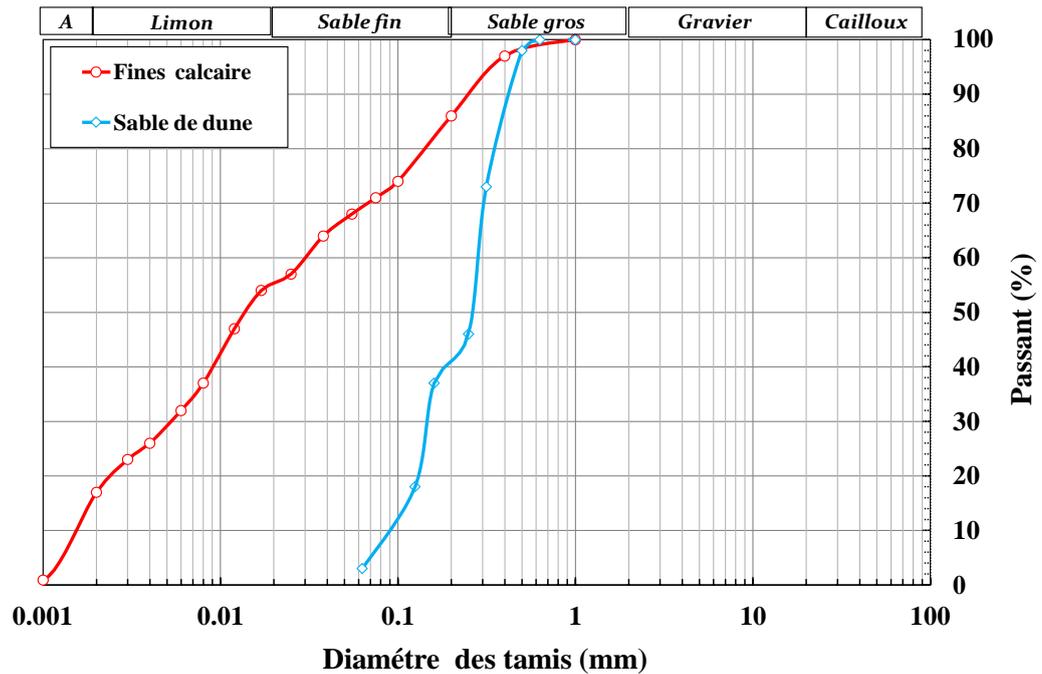


Figure II.2 : Courbe granulométrique de sable de dune et des fines calcaire

Tableau II.2 : Résultats Récapitulatif de l'analyse granulométrique

	Matériaux		Spécifications		
	Fines calcaire	Sable de dune	TRS*	CTTP*	GTR*
D_{max} (mm)	1	1	-	20-40	<50
Argile (%)	17	-			
Limon (%)	37	-			
Sable fin (%)	31	42			
Sable gros (%)	14	58			
Gravier (%)	-	-			
Cailloux (%)	-	-			
% < 0.425mm	98	90		36-52	
% < 80µm	72	8	< 30	22-32	≤ 35
D₁₀	0.0016	0.09			
D₃₀	0.005	0.15			
D₆₀	0.03	0.28			
C_u	18.75	3.22			
C_c	0.52	0.89			

C_u : coefficient d'uniformité dit de Hazzen. C_u = D₆₀/D₁₀. C_c : coefficient de courbure. C_c = (D₃₀)²/D₆₀.D₁₀

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

- **II.3.2. Qualitif fines :**

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

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

- **II.3.2.1. Limites d'Atterberg (NFP 94 – 051) :**

Ces limites sont Déterminées selon la norme française (NF P94-051), cette norme destinée à la détermination de deux limites d'Atterberg (limite de liquidité à la coupelle et limite de plasticité du rouleau) ; les deux limites d'Atterberg s'appliquent aux sols dont les éléments passent à travers le tamis de dimension nominale d'ouverture de maille 400µm.

Les limites d'Atterberg sont des teneurs en eau caractéristiques des sols fins permettant entre autre d'établir leur classification et d'évaluer leur consistance. Ces valeurs de teneurs en eau permettent de caractériser également les différents états des sols.

- **L'état liquide :** le sol a une consistance très faible, il a l'aspect d'un fluide, il tend à se niveler suivent une surface horizontale. Les particules glissent facilement les unes sur les autres

- **L'état plastique :** le sol a une consistance plus importante, il tend plus à se niveler soumis à de faibles contrainte il se déforme largement sans se rompre. Il garde sa déformation après suppression des contraintes. Les particules ont mis en commun leurs couches adsorbées ; lorsqu'il y a déformation, les particules restent attachées les unes aux autres sans s'éloigner.

- **L'état solide (avec retrait) :** le sol retrouve sa forme initiale après suppression des contraintes (petites déformation élastiques).

- **L'état solide (sans retrait) :** les particules arrivent au contact en quelque points en chassant l'eau adsorbée ; le sol ne change plus de volume quand sa teneur en eau diminue. (NF P 94-051, 1993)



Figure II.3 : Appareil de CASAGRANDE Avec son équipement (Dahma, 2020)

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

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

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

WL : limite de liquidité

N : nombre de chocs

W : la teneur en eau



Photo II.4 : Détermination la Limite de Liquidité

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

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

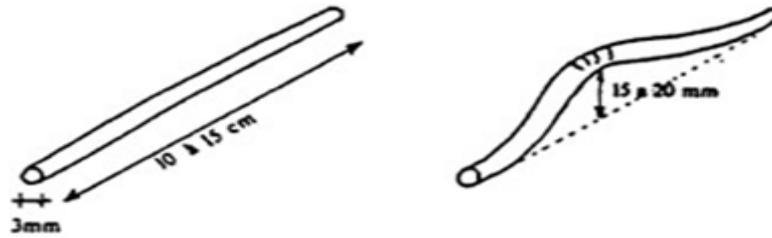


Figure II.4 : Principe de la limite de plasticité (Dahma, 2020)

C) L'indice de plasticité, noté I_p (N F P 94-051) :

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

$$I_p = W_L - W_p$$

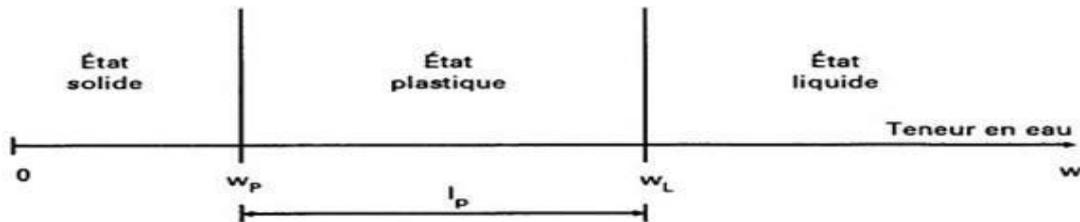


Figure II.5 : Représentation des limites d'Atterberg (Dahma, 2020).

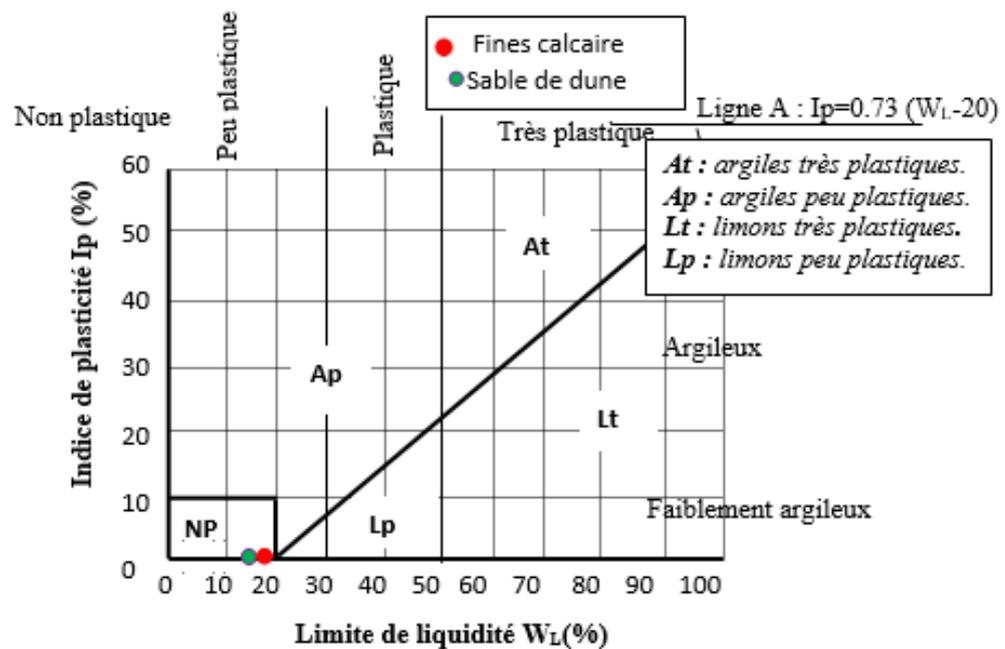
Les résultats des limites d'Atterberg sont résumés dans le tableau II.3

Tableau II.3 : Valeur de limites d'Atterberg.

	Matériaux		Spécifications		
	Fines calcaire	Sable de dune	TRS	CTTP	GTR
Limite de liquidité: w_l (%)	19.70	17.71	-	< 40	-
Limite de plasticité: w_p (%)	NM*	NM*	-	-	-
Indice de plasticité: I_p (%)	NM*	NM*	< 13	< 15	≤ 12

* N.M : Non mesurable.

La positionnement de ces valeur par rapport au diagramme de Casagrande (figure II.6) montre que nos matériaux sont classés comme non plastiques faiblement argileux.

**Figure II.6** : Le diagramme de Casagrande.

II.4.2. Equivalent de sable (NF P 18 598) :

Cet essai utilisé de manière courante pour évaluer la propreté des sables. Une procédure normalisée permet de déterminer un coefficient d'équivalent de sable effectué sur une fraction 0/5 mm du matériau à étudier. On lave l'échantillon, selon un processus normalisé, et on laisse reposer le tout au bout de 20 minutes on mesure les éléments suivants :

- **hauteur h1** : sable propre +éléments fine (floculant).
- **hauteur h2** : sable propre seulement.

On déduit l'équivalent de sable où on peut utiliser un piston comme la figure ci- dessous montre :

$$ESV = 100. h2 / h1$$

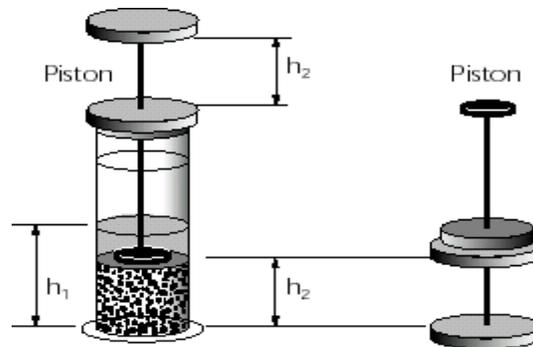


Figure II.7 : Principe d'essai d'équivalent de sable par piston (Khengaoui, 2013).



(1)



(2)



(3)



(4)



(5)

Photo II.5 : Les étapes de Essai des équivalentes des sables

Le tableau II.4. Présente les valeurs de d'équivalent de sable (ES) de sable de dune. Pour les fines calcaires cette valeur est très faible.

Tableau II.4 : Valeurs de l'équivalent de sable ES.

Matériaux	Es (%)
Sable de dune	65.04

La valeur d'équivalente de sable est matériaux propre.

II.4.3. Valeur de bleu de méthylène VBS (NF P 94-068) :

Il s'agit aussi d'un paramètre permettant de caractériser l'argilo site d'un sol, son application est récent.

Ce paramètre noté VBS, représente la quantité de bleu de méthylène pouvant s'adsorber sur les surface externe et interne des particules argileuse contenues dans la fraction du sol considéré, c'est donc une grandeur directement liée à la surface spécifique du sol.

L'essai consiste à introduire progressivement du bleu de méthylène dans une suspension de sol maintenue en agitation. On prélève périodiquement une goutte de la suspension que l'on dépose sur un papier filtre. Dès qu'une auréole bleutée se développe autour de la tache ainsi formée on peut considérer que l'adsorption du bleu de méthylène sur les particules d'argile est terminée. En effet, c'est l'excès de bleu de méthylène qui apparait dans l'auréole (NF P 94- 068,1998).

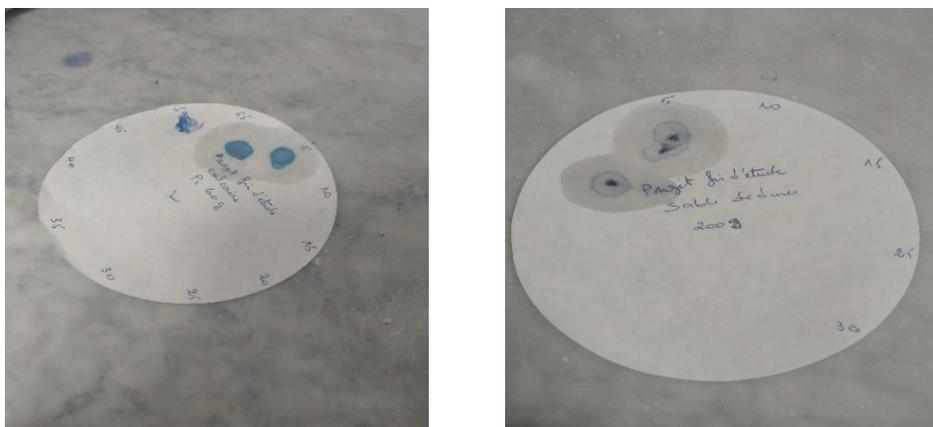


Photo II.6 : VB Fines calcaire et Sable de dune

$$V_B = \frac{\text{Quantité du bleu absorbé (cm}^3\text{)}}{\text{poids sec de la prise (g)}}$$

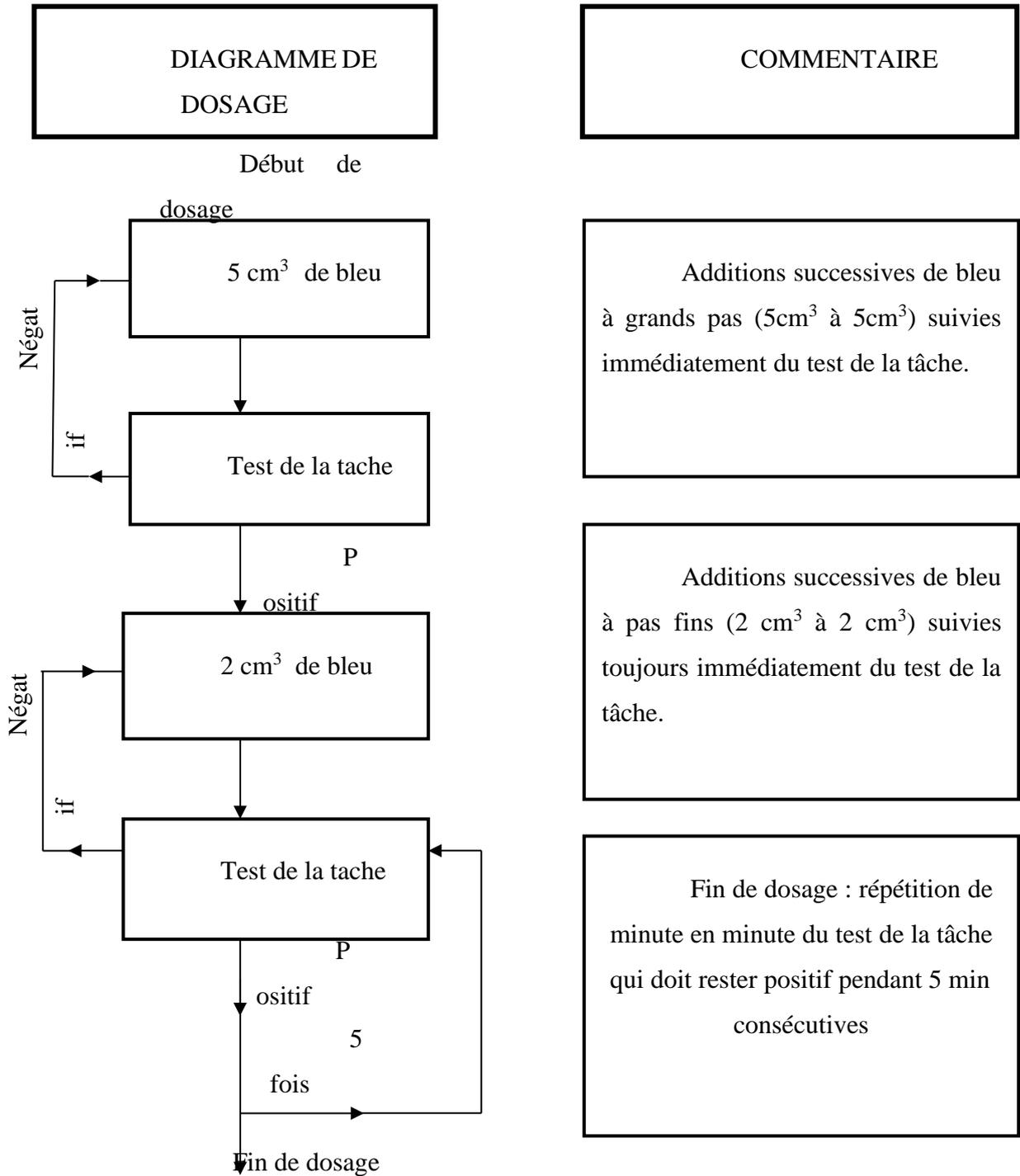


Figure II.8 : Schéma du dosage de l'essai au bleu

Le tableau II.5. Représente la valeur au bleu de nos échantillons. Nous remarquons que les valeurs au bleu de nos échantillons sont inférieures au seuil préconisé par le GTR. Si nous

adoptons la classification du tableau II.6, nous trouvons que nos matériaux sont insensibles à l'eau. La faible valeur de VB pour les fines calcaires prouve que les particules fines existantes ne sont pas de natures argileuses.

Tableau II.5 : Valeur de bleu de méthylène VB.

	Fines calcaire	Sable de dune	GTR
Valeur de bleu de méthylène VB	0.08	0.03	< 1.5

Tableau II.6 : Classe de sol en fonction du VBS (NF P 94-068,1998).

Valeur du VB	Interprétation
VBS < 0,1	Sol insensible ou peu sensible à l'eau
0.1 < VBS < 0.2	Appariation de la sensibilité à l'eau
0.2 < VBS < 1.5	sol sablo-argileux
1.5 < VBS < 2.5	sol sablo-limoneux
2.5 < VBS < 6	sol limoneux
6 < VBS < 8	sol argileux
VBS > 8	sol très argileux

II.5.3. Essai de compactage et de portance :

II.5.3.1. Essai de compactage :

Le compactage est l'ensemble des opérations mécaniques qui conduise à accroître la densité d'un sol, en faisant la texture du sol est resserrée ce qui réduit les déformations et tassements et augmente la compacité du sol et améliore sa capacité portante ; les ouvrages couramment concernés par le compactage sont les remblais routiers, les barrages en terre et les aérodromes (Berga Abdelmadjid, 2003). Au laboratoire l'essai représentatif de compactages sont les essais Proctor.

▪ Essai Proctor :

Il existe deux types d'essais Proctor, essai Proctor normal et essai Proctor modifié. Les deux essais sont identiques dans leur principe, seules diffèrent les valeurs des paramètres qui définissent l'énergie de compactage appliquée.

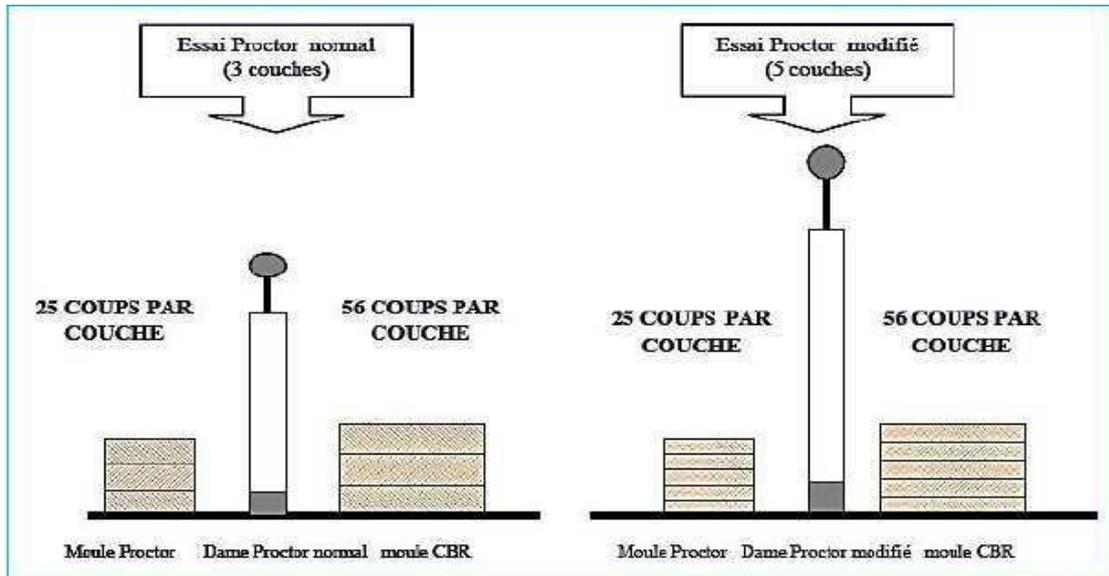


Figure II.9 : comparaison entre les essais Proctor (normal et modifié) (Keddam, 2015).

✓ Essai Proctor Modifié (NF P 94 – 093) :

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

Les résultats de cet essai sont représentés dans la figure II.10. Et les caractéristiques optimales déduites de cette courbe sont présentés dans le tableau II.7.

D'après ces résultats on remarque que la courbe Proctor de sable de dune est aplatie par rapport aux fines calcaires. 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.

D'après le tableau II.7, les valeurs de la densité sèche maximale de nos matériaux sont inférieures à la limite minimale exigée par la TRS.

La teneur en eau optimale est assez élevée par rapport à celle des matériaux routiers habituels cités dans le tableau II.7 Le sable de dune est léger par rapport aux matériaux routiers habituels.



Photo II.7 : Moule Proctor modifié



Photo II.8 : Dame Proctor

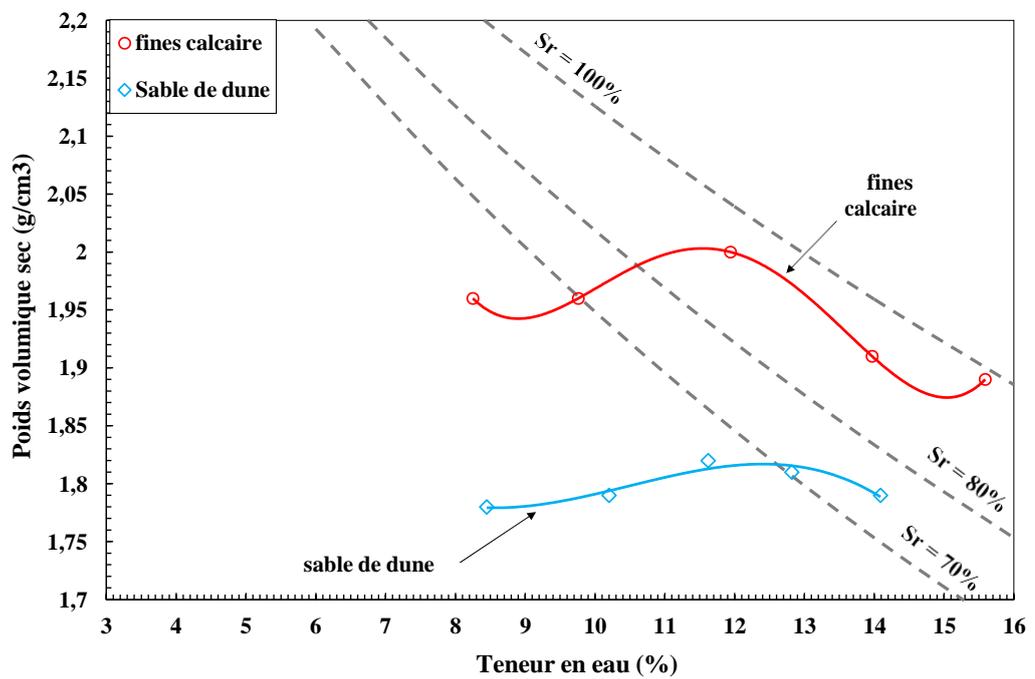


Figure II.10 : La courbe de Proctor modifié de sable de dune et des fines calcaire

Tableau II.7 : Caractéristiques optimales de Proctor modifié.

	Fines calcaire	Sable de dune	TRS
Le poids volumique sec maximal γ_{dmax} (g/cm ³)	2	1.81	> 1.7
La teneur en eau optimale w_{opt} (%)	11.8	12.60	-

Tableaux II.8 : Caractéristiques de compactage pour quelques matériaux routiers (Gandil P. 1988).

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

II.5.3.2. Essai de portance (Essai CBR) (NF P 94-078) :

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

La valeur CBR chute très vite lorsque la compacité du sol diminue, c'est un bon critère de portance d'un sol.

-L'indice Portant Immédiat (IPI) exprime la valeur de l'indice CBR immédiat (sans surcharge ni immersion), sur une éprouvette compactée à l'énergie Proctor Normal et à sa teneur en eau naturelle. (D. Didier, 1999).

-L'indice CBR après 4h (CBR imbibé), c'est pour déterminer la portance du matériau sous les plus mauvaises conditions hygrométriques (présence d'eau).

Le tableau II.9 représente les valeurs de la portance de nos échantillons. D'après ces résultats on remarque que les indices CBR immédiat et imbibé des fines calcaires sont supérieurs au seuil préconisé par la TRS. Les indices portants après 4 heures d'immersion, sont plus faibles que les indices immédiats. En effet, On constate, une réduction de 52% pour les fines calcaires et de 69% pour ceux du sable de dune.



Photo II.9 : Préparation d'essai CBR imbibé



Photo II.10 : Presse CBR

Tableau II.9 : Valeurs des indices CBR.

	Fines calcaire	Sable de dune	TRS
CBR Immédiat	94.50	46.19	> 20
CBR Imbibé (Après 4 heures d'immersion)	44.63	13.89	-

II.5.3.3 Essai de compression simple :

Cet essai est empirique, introduit pour les matériaux locaux pour la première fois par (FENZY, 1966), il est réalisé sur tous les matériaux sahariens sur la fraction < 5mm. 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 ($\varnothing = 5\text{cm}$, $H = 10\text{cm}$), confectionnées à la teneur en eau optimale du Proctor modifié et à différentes compacités théorique (100%, 97% et 95%) afin d'étudier la relation entre la résistance et la compacité.

Le compactage est effectué à la presse et les éprouvettes démoulées sont séchées à l'étuve à 55°C pendant 48h

Pour le sable de dune, il nous a été impossible de réaliser cet essai car les échantillons s'effritent juste après le démoulage, donc on considère que la résistance à la compression de sable de dune est nulle.

Les échantillons sont préparés selon les étapes suivantes :

1. Séchage de notre échantillon à l'air,
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 du matériau 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 ($\varnothing = 5\text{cm}$, $H = 10\text{cm}$). Le matériau est compacté en une seule fois dans le moule.

Une fois le temps de conservation est atteint (48h), 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. La valeur de la résistance à la compression simple représentée, est la lecture moyenne de trois éprouvettes.

La figure II.11. Représente la variation de la résistance à la compression en fonction de la compacité.



Photo II. 11 : Essai de Compression simple de Fines calcaire

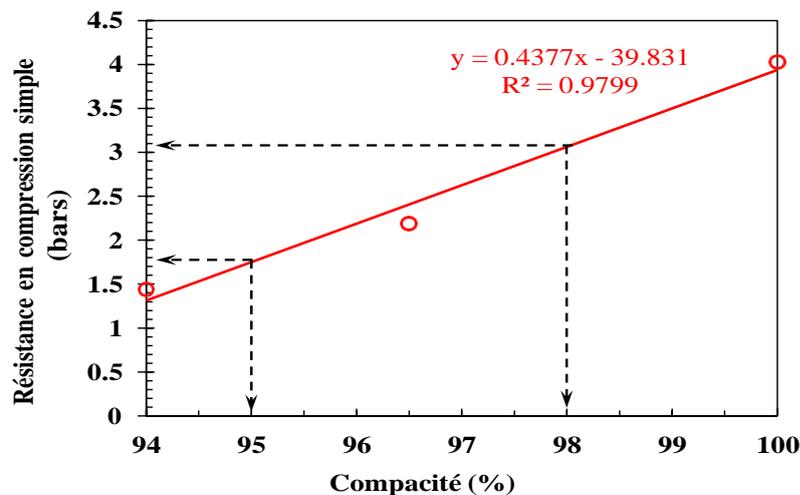


Figure II.11 : Variation de la résistance à la compression des fines calcaire en fonction de la compacité.

La figure II.11, montre que la résistance augmente d'une manière plus au moins linéaire avec l'augmentation de la compacité.

La résistance à la compression correspondante à 98% de compacité, est de l'ordre de 3.1 bars. Tandis que la résistance à la compression correspondante à 95% de compacité, est de l'ordre de 1.8 bars.

Donc, lorsque la compacité passe de 98% à 95%, la chute est de 40%. Nous remarquons que la valeur de Rc à 95% de compacité est supérieure à celle qui est exigée par les spécifications proposés par ALLOUL (1981) et STRUILLOU (1984) (Tableau II.10), pour une couche de fondation en zone IV à faible trafic (RC = 18 bars > 15 bars). Si on adoptant ces spécifications, l'utilisation en corps de chaussée des fines calcaire est limitée en couche de fondation en zone climatique IV à faible trafic (< 130 PL/ jour).

Tableau II.10 : Proposition de Spécifications pour L'Algérie par ALLOUL (1981) et STRUILLOU (1984).

			Poids lourd /jour				
			< 130	130 300	300 600	600 1200	> 1200
Zone II sup- humide H=350 à 600 mm de pluie avec bon drainage exigé	% < 80 µm max	BF	30	30	30	30	30
	% > 4 mm min	BF	30	30	30	30	30
	% > 12,5 mm min	BF	10	10	10	10	10
	LE max. sur > 12,5 mm sec	B	100	55	35		
		F	100	100	100	100	100
	IP max. sur < 0,4 mm	BF	10	10	10	10	10
	CBRe à 4 j d'immersion min	BF	40	70	80	90	100
		B	70	70	70		
	% CaCO ₃ min. sur < 1 mm	F	60	60	60	60	60
		BF	tr	tr	tr	Tr	Tr
Zone III semi-aride H= 100 à 350 mm de pluie par an sans exigence-	% < 80 µm max	BF	30	30	30	30	30
	% > 4 mm min	BF	30	30	30	30	30
	% > 12,5 mm min	BF	10	10	10	10	10
	LE max. sur > 12,5 mm sec	B	100	100	55	35	
		F	100	100	100	100	35
	IP max. sur < 0,4 mm	BF	13	13	13	13	13
	CBRe à 4 j d'immersion min	BF	40	70	80	90	100
		B	70	70	70	70	

de bon							
Drainage	F	60	60	60	60	60	60
	% CaSO ₄ max .sur < 1 mm	BF	05	05	05	05	05
Zone IV	Rc (MPa) min. sur < 5 mm ;	B	2,5	03	3,5		

aride H<100 mm de pluie par an sans exigences de bon drainage	($\gamma_d = 0,95 \cdot \gamma_d \text{ opm}$; 48 h à 55°C)	F	1,5	02	2,5	03	3,5
	IP max. sur < 0,4 mm	BF	16	16	16	16	16
	CBR à 4 j d'immersion min	BF	30	60	70	80	90
	%(CaCO ₃ + CaSO ₄) min	B	70	70	70		
	Sur < 1 mm	F	60	60	60	60	60
	%NaCL max . sur < 1 mm	BF	03	03	03	03	03

Caractéristiques à viser si possible, en Algérie pour le choix des tufs d'encroûtements, suivant la zone climatique et le trafic prévu. Tufts d'encroûtement déconseillés ; B : pour couche de Base ; F : pour couche de fondation ; traces ; Rc (Mpa) ; compression simple sur cylindres (5*10 cm) séchés 48 h à 55°C ; Ip indice de plasticité ; granulométrie sous eau après 48h dans l'eau : compactage CBR à 55 cops/couche à Wopm puis 4 jours d'immersion ; la Los Angeles sur granulométrie A.

II.5.4. La résistance à la traction :

L'état des contraintes dans l'éprouvette, durant l'essai brésilien, a été déterminé avec l'hypothèse de l'élasticité linéaire pour des matériaux isotropes par Holtz (Holtz, R. D., et Kovacs, W. D. (1991). Ainsi, pour déterminer la résistance à la traction par fendage d'un matériau à partir des équations d'Hertz, il faut satisfaire aux hypothèses d'un comportement élastique linéaire fragile et d'un chargement uniforme appliqué sur une génératrice du cylindre.

Cet essai est réalisé sur des éprouvettes cylindriques normalisées (NF P 98-230-2, 1993b). Grâce à deux plateaux, on applique un effort le long des deux génératrices diamétralement opposées photoII.12. En pratique, il est préférable de commencer par cet essai (avant l'essai de compression non confiné), car il nous permet d'avoir une information sur la résistance à la compression, sachant que RC varie entre 8 et 15 fois le Rt (moyenne de x10).

Des d'éprouvettes cylindriques (de dimensions, diamètre = 50 mm et longueur = 50 mm) ont été préparées pour réaliser cet essai. Le matériau est compacté statiquement à l'OPM ($v=1,27$ mm/min) dans un moule à double piston permettant d'homogénéiser la contrainte sur toute la hauteur de l'éprouvette.

On applique un effort progressivement jusqu'à la rupture de l'échantillon. Ceci permet d'obtenir la résistance à la traction Rt. La relation de la résistance à la traction par fendage donnée comme suite :

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

A. Où, **Rt** : Résistance à la traction ; **l** : Longueur de l'éprouvette ; **F** : Pression axiale (presse hydraulique) ; **D** : Diamètre de l'éprouvette.

La valeur de la résistance à la traction à 98% γ_d de notre échantillon est de l'ordre de 0.61 bars.



Photo II.12 : Essai de traction de Fines calcaire

II.5.5. Analyse chimique sommaire :

L'essai a été réalisé au LTPS de Ghardaïa, les résultats sont récapitulés sur le tableau II.10.

Tableau II.11 : Résultats de l'analyse chimique sommaire.

	Fines calcaire	Sable de dune	CTTP
CaCO ₃ (%)	90	00	≥ 45
CaSO ₄ ; 2H ₂ O (%)	2	1	
Insolubles (%)	-	96	

D'après ces résultats on remarque que pour le sable de dune, la constatation importante à signaler est la présence d'un fort pourcentage des résidus insolubles (SiO₂ + Silice) qui est supérieur à 95 %, et par conséquent, le sable de dune est un sable siliceux. Concernant les fines calcaires dont leurs origine une roche mère calcaire sont de prédominance calcaire avec un taux dépasse 95%.

II.5.6. Récapitulatif des essais d'identification :**Tableau II.12 :** Caractéristiques géotechniques et mécaniques de sable de dune et fines calcaire d'oued Metlili.

	Matériaux		Spécifications			Remarques*		
	Fines calcaire	Sable de dune	TRS	CTTP	GTR			
Analyse granulométrique								
$D_{max} (mm)$	1	1	-	20-40	< 50	-	No	No
$\% < 0.425 mm$	98	90	-	36-52	-	-	No	-
$\% < 80 \mu m$	72	8	< 30	22-32	≤ 35	No(FC) OK(SD)	No	NO(FC) OK(SD)
C_U	18.75	3.22	-	-	-	-	-	-
C_C	0.52	0.89	-	-	-	-	-	-
Les limites d'Atterberg								
$w_L (\%)$	19.70	17.71	-	< 40	-	-	NO(FC) OK(SD)	-
$w_p (\%)$	-	-	-	-	-	-	-	-
$I_P (\%)$	-	-	< 13	< 15	≤ 12	-	-	-
Equivalent de sable Es (%)	-	65.04	-	-	-	-	-	-
Valeur de bleu VB	0.08	0.03	-	-	< 1.5	-	-	Ok
Compactage								
$\gamma_{dmax} (t/m^3)$	2	1.82	> 1.7	-	-	Ok	-	-
$\omega_{opm} (\%)$	12	12.40	-	-	-	-	-	-
Portance								
$I_{CBR} \text{ Immédiat } (\%)$	94.50	46.19	> 40	-	-	Ok	-	-
$I_{CBR} \text{ Imbibé } (4h) (\%)$	44.63	13.89	-	-	-	-	-	-
Essai Los Angeles LA (%)	-	-	-	-	< 45	-	-	-

Essai de compression simple à 95% γ_{dmax} (MPa)	0.17	00	> 0.15	-	-	Ok	-	-
Analyse chimique								
<i>Insolubles (%)</i>	-	96	-	-	-	-	-	-
<i>CaCO₃ (%)</i>	96	00	-	≥ 45	-	-	OK(FC)	-
							NO(SD)	
<i>CaSO₄ ; 2H₂O (%)</i>	2	1	-	-	-	-	-	-

II.5.7. Classification de nos échantillons :

Selon la Classification GTR (NF P 11-300) (cas des sols fins), nos matériaux sont classés comme suit :

Fins calcaires :

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

35% < Passant à 80 μm ;

$I_p < 12\%$;

VBS < 2,5%.

Donc, les fines calcaires se classe comme « **A₁** » (**Limon peu plastique**).

Le Sable de dune :

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

Passant à 80 μm < 12% ;

$I_p < 12\%$;

VBS < 0.1%.

Donc, le sable de dune se classe comme « **D₁** » (**Sable de dune**)

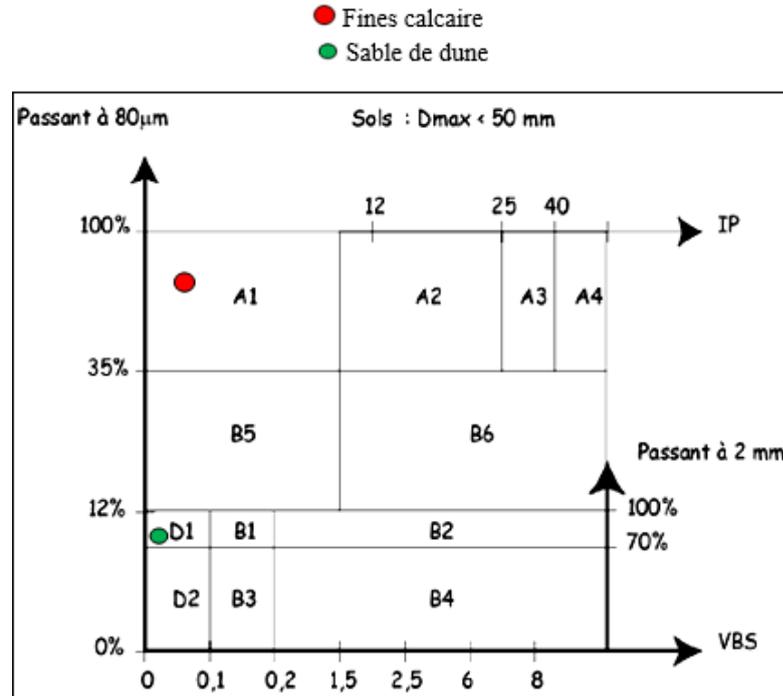


Figure II.12 : Classification de nos matériaux selon GTR.

II.6. CONCLUSION :

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

- Le sable de dune, a une courbe granulométrique uniforme sériée ($C_u=3.22$), contenant un taux des fines ($< 80 \mu\text{m}$) de l'ordre de 10%. Ce matériau est propre et ne présente aucune plasticité. Sa densité sèche est peu insensible à la teneur en eau.
- Les fines calcaires, a une courbe granulométrique étalée ($C_u=19$) avec un taux de sable ($< 2 \text{ mm}$) de l'ordre de 45% et une fraction élevée de fines ($< 80 \mu\text{m}$) de l'ordre de 72%.

Nous constatons que certaines caractéristiques géotechniques de sable de dune étudié sont médiocres par rapport aux matériaux routiers habituels et ne répondent pas aux exigences des spécifications, notamment leur portance et résistance.

Dans ce qui suit on va essayer de faire la correction de ces caractéristiques par l'incorporation des fines calcaire comme ajout.

CHAPITRE III :
ETUDE D'OPTIMISATION

Chapitre III

ETUDE D'OPTIMISATION

III.1. INTRODUCTION :

Les caractéristiques géotechniques des sables de dunes notamment leurs faibles portances ne permettent pas d'envisager leur emploi en assises de chaussées. Afin d'améliorer les caractéristiques de ce matériau et pour aboutir au meilleur choix technico-économique d'un projet routier, nous avons le mélangé avec des fines calcaires. L'objectif est d'améliorer la stabilité immédiate (la compactibilité et la traficabilité) et la cohésion du matériau.

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 sahariennes à faible et moyen trafic. En outre, les pourcentages des fines calcaires utilisés sont choisis dans un domaine économique réaliste.

Dorénavant les nominations des différentes formules sont comme suit :

- 90% Sable de dune +10% fines calcaire nommé SD+10%FC
- 80% Sable de dune +20% fines calcaire nommé SD+20%FC
- 70% Sable de dune +30% fines calcaire nommé SD+30%FC
- 60% Sable de dune +40% fines calcaire nommé SD+40%FC
- 50% Sable de dune +50% fines calcaire nommé SD+50%FC

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

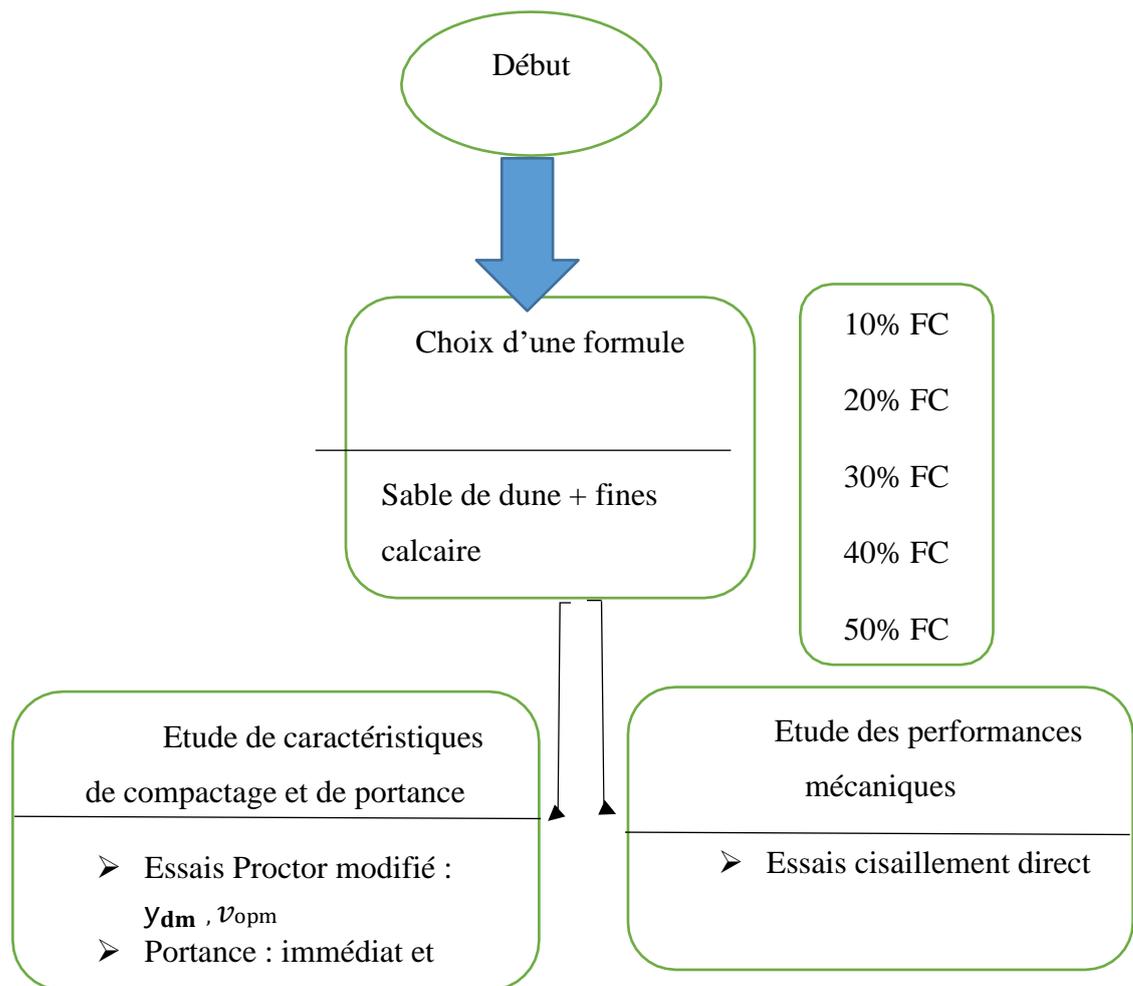


Figure III.1 : Organigramme de conduite d'une étude de formulation.

III.2. Etude de l'influence de l'ajout des fines calcaire sur le sable de dune au laboratoire :

Notre étude au laboratoire est composée des investigations suivantes :

- ✓ Influence de l'ajout des fines calcaire sur les caractéristiques immédiates (densité sèche, teneur en eau optimale et la portance).
- ✓ Influence des fines calcaires sur les caractéristiques mécaniques (essais de cisaillement direct).

III.3. L'influence sur les caractéristiques de compactage et de portance :

III.3.1. Essais Proctor modifié.

Les essais Proctor modifié sont réalisés avec les mêmes procédures du chapitre précédent. Les résultats des essais sont représentés dans la figure III.2. Les caractéristiques de compactage sont résumées dans le tableau III.1.

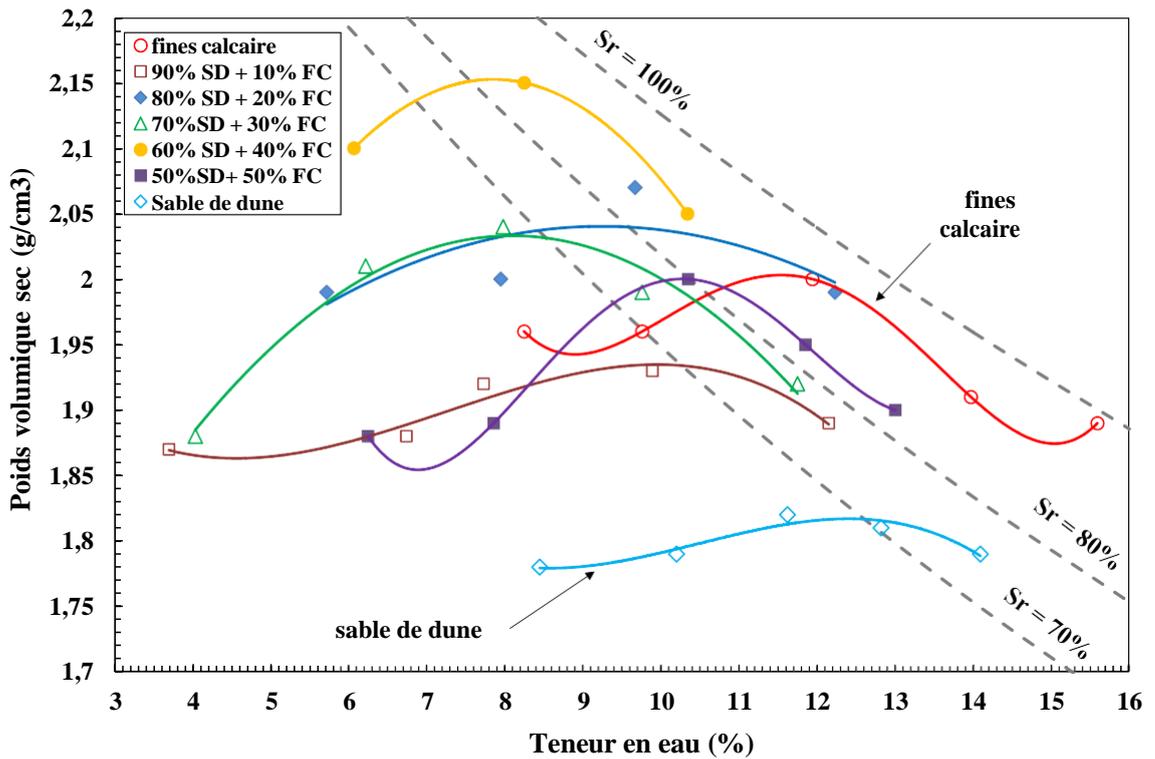


Figure III.2 : Courbes Proctor modifié des mélanges sable de dune + fines calcaires.

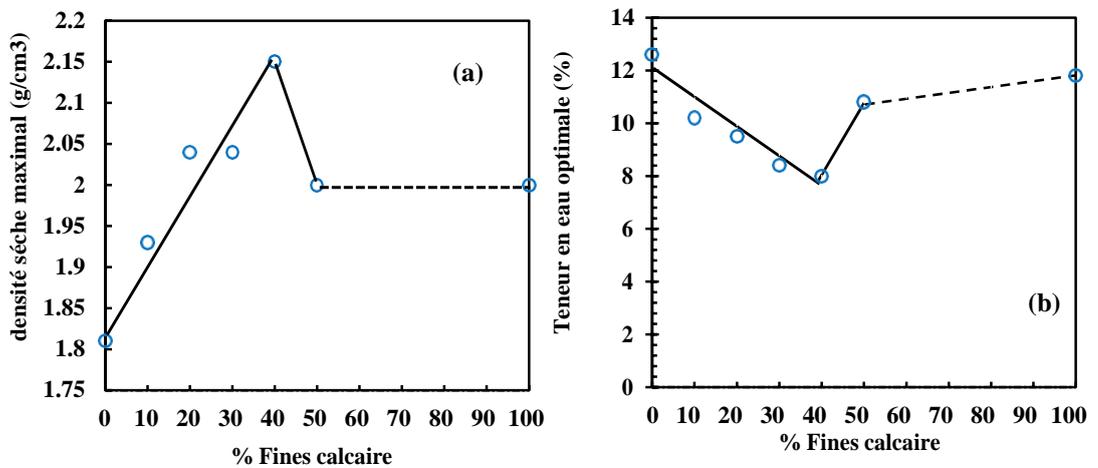
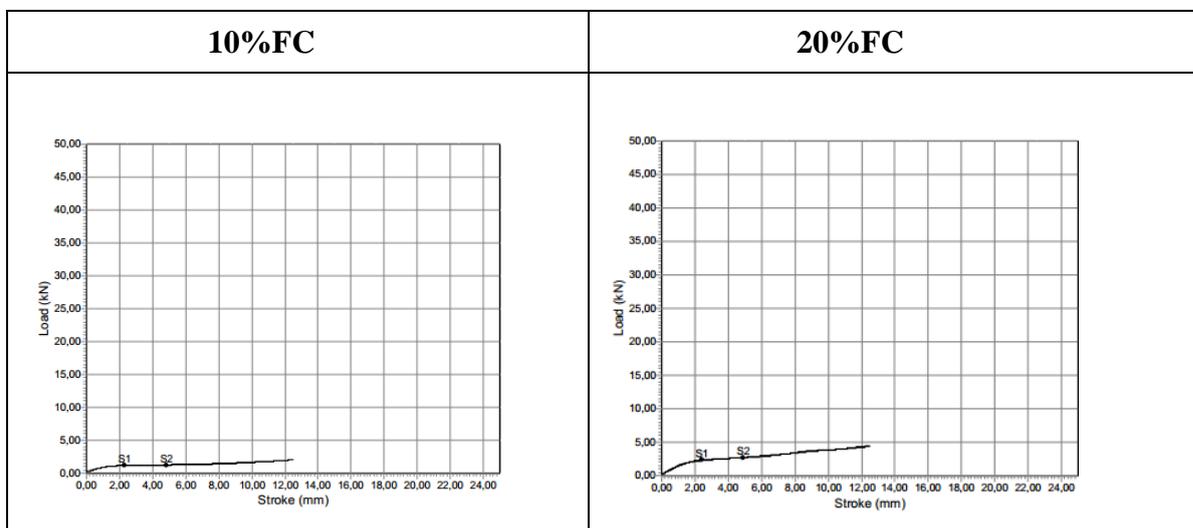


Figure III.3 : variation de (a) la densité sèche maximale et (b) la teneur en eau optimale, en fonction de pourcentage des fines calcaire.

D'après ces résultats, on remarque que, l'ajout des fines calcaire conduit à une densification du matériau par rapport aux matériaux brutes ; la densité sèche optimale augmente suite à l'augmentation du pourcentage des fines calcaire, Cette augmentation atteint son maximum (2.15 g/cm^3) dans le cas de l'ajout de 40% des fines calcaire, puis elle diminue à 2 g/cm^3 pour 50% FC, toute en gardant une valeur supérieure à la densité sèche de sable de dune brut. La teneur en eau optimale diminue suite à l'augmentation des fines calcaire, elle atteint son minimum (8%) dans le cas de l'ajout de 40% FC, puis elle augmente dans le cas de l'ajout de 50% FC, tout en gardant une valeur moins que le matériau brut. Les résultats trouvés coïncident avec les résultats des autres recherches (Morsli, 2007 ; Goual, et al 2012 ; Cherrak, et al 2015 ; Daheur et al. 2012, 2015, 2019).

III.3.2. Essais CBR :

C'est un essai dont le but est d'apprécier la portance routière des matériaux. L'essai est réalisé pour les différents mélanges, immédiatement après compactage, après 4 heures d'immersion et après 3 jours d'immersion. Il est réalisé de même manière que le chapitre précédant. Les figures III.4-III.6 représentent la variation de l'effort de poinçonnement en fonction de l'enfoncement pour les différents mélanges sable de dune-fines calcaire. La variation des indices CBR sont représentées dans la figure III-6.



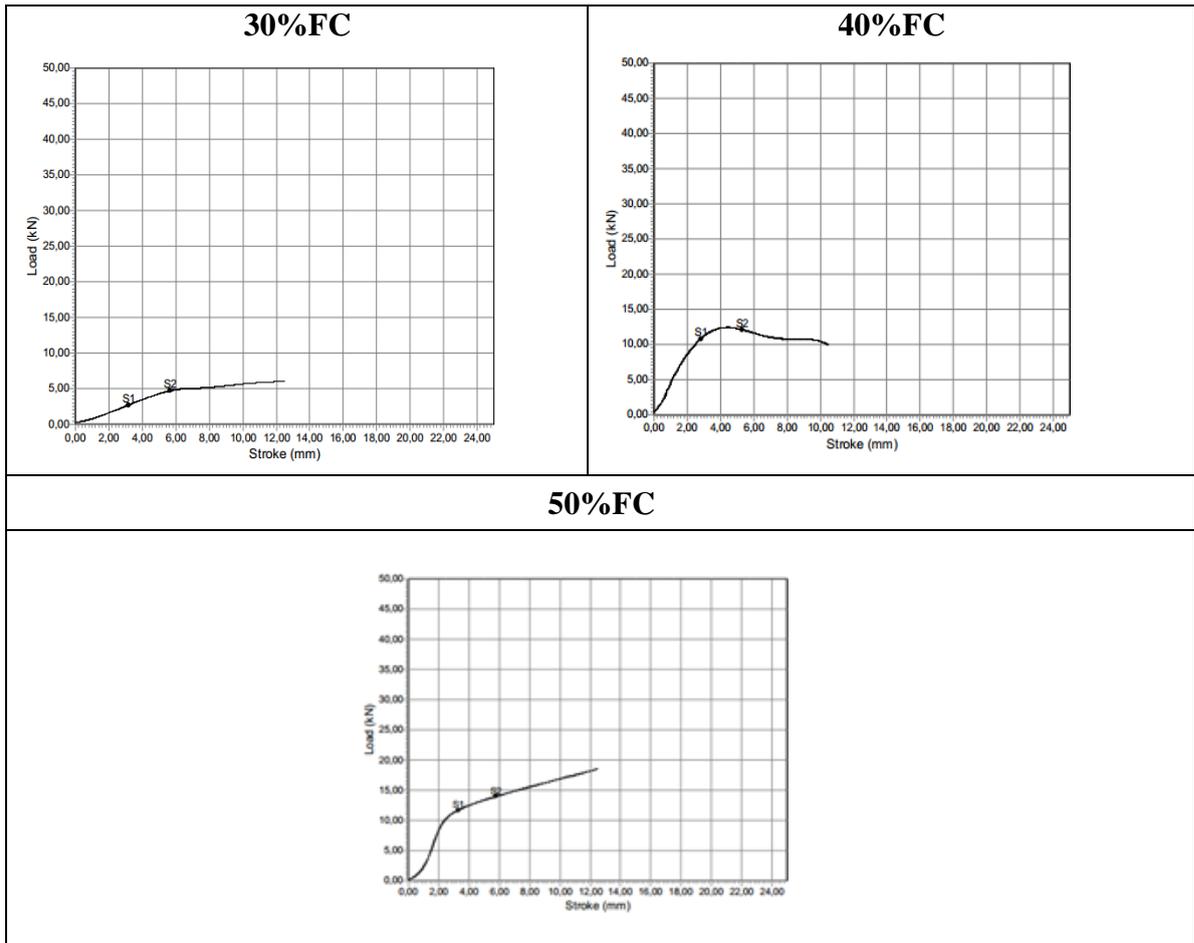
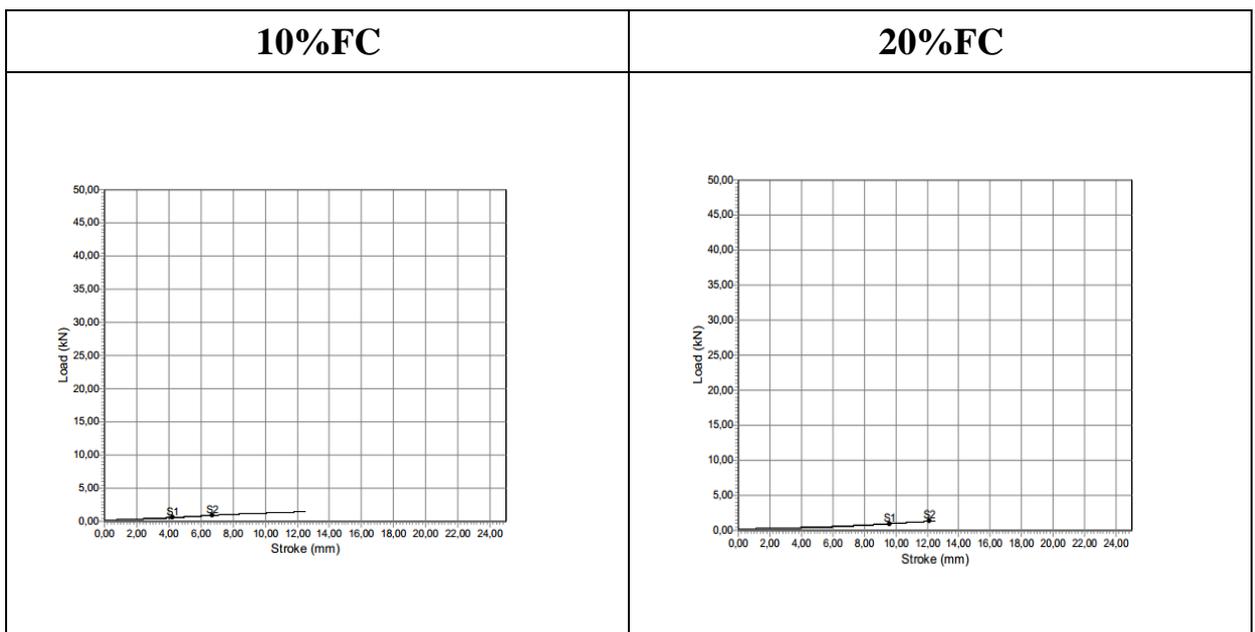


Figure III.4 : Courbes d'effort de poinçonnement en fonction de l'enfoncement « CBR Immédiat ».



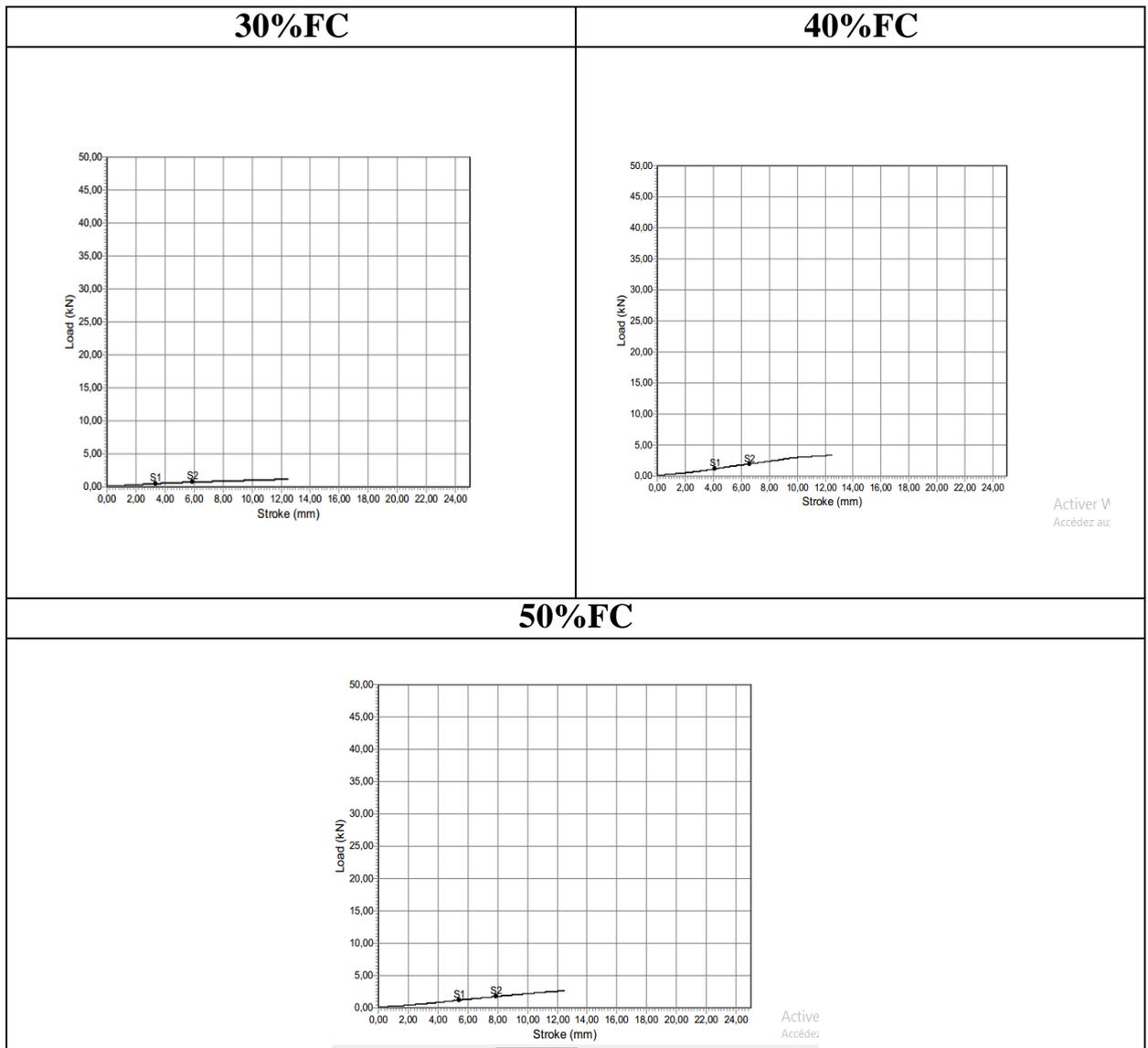


Figure III.5 Courbes d'effort de poinçonnement en fonction de l'enfoncement « CBR Imbibé après 4h ».

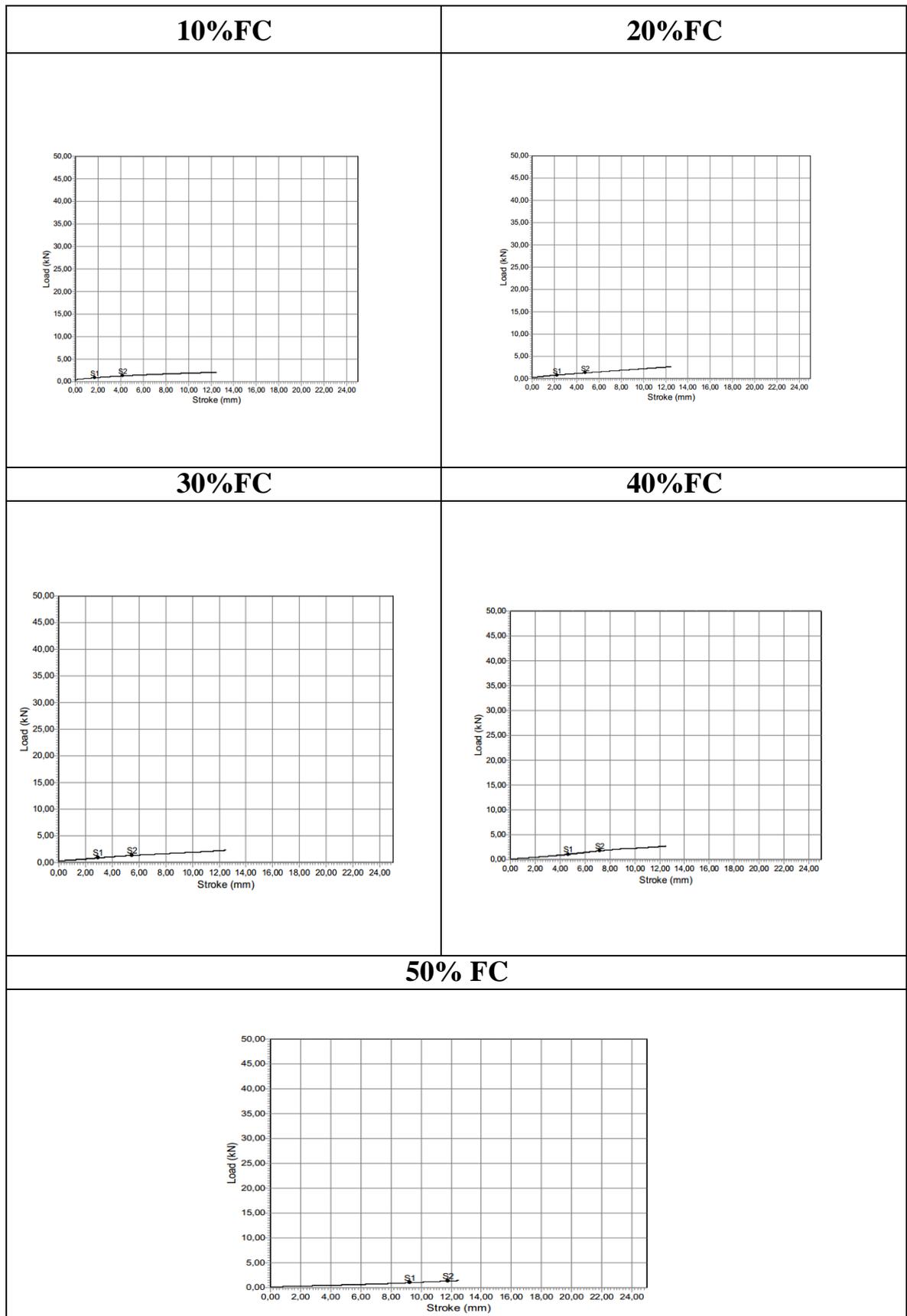


Figure III.6 : Courbes d'effort de poinçonnement en fonction de l'enfoncement « CBR Imbibé après 3jours »

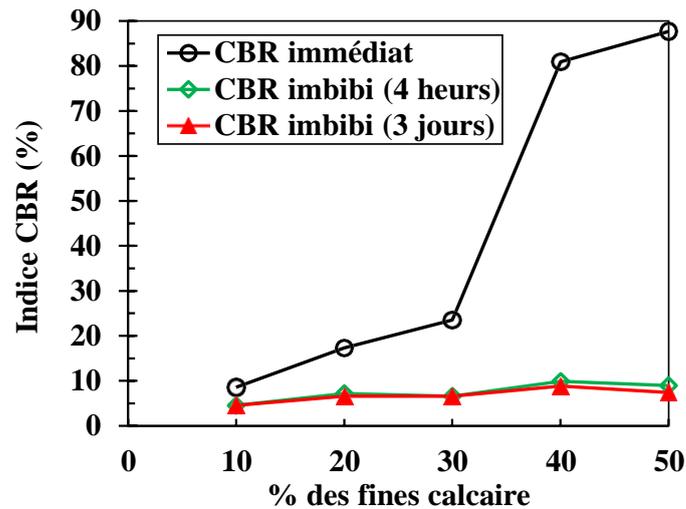


Figure III.7 : variation des valeurs des indices CBR en fonction des pourcentages des fines calcaire.

D'après cette figure, on constate que :

- L'ajout des fines calcaire influe positivement sur les indices CBR ; notamment l'indice CBR immédiat ;
- Les valeurs des indices CBR imbibés sont inférieures à celles immédiat. Cela est dû à la sensibilité des matériaux à l'eau.
- L'indice CBR immédiat augmente d'une façon significative avec l'ajout des fines calcaire, à titre exemple, l'indice CBR est multiplié 10 fois quand le pourcentage des FC passe de 10% à 50%.

Si on compare ces résultats avec les valeurs du tableau III.1, comportant le référentiel de l'indice de portance immédiat, nous constatons que l'ajout des fines calcaire améliore considérablement la compactibilité et la traficabilité.

Tableau III.1 : Degré de compactibilité et de traficabilité (Daheur, 2019).

IPI < 25	compactibilité faible à très faible. Compactage très difficile sinon impossible (IPI < 10)	traficabilité mauvaise tant que le liant n'a pas de prise. Choisir des engins légers ayant une bonne traficabilité
25 < IPI < 40	compactibilité moyenne. Compactage possible mais présentant quelque difficultés	traficabilité médiocre avant prise.
40 < IPI < 60	compactibilité moyenne à élever. compactage aisé.	traficabilité médiocre avant prise.
IPI > 60	compactibilité élevée	bonne traficabilité.

IPI : indice portant immédiat.

III.4. L'influence sur résistance au cisaillement directe (NFP94-071-1) :

Il s'agit de déterminer les caractéristiques mécaniques d'un sol en procédant au cisaillement rectiligne d'un échantillon sous charge constante. L'essai de cisaillement permet de tracer la courbe intrinsèque du sol étudié, et de déterminer son angle de frottement interne ϕ et sa cohésion C.

III.4.1. Appareillage :

Le bâti, La boîte de cisaillement, Le dispositif d'application de l'effort normal sur l'éprouvette, Le dispositif produisant le déplacement relatif horizontal entre ses deux de mi-boîtes, Le système de mesurage des efforts, des déplacements et du temps, De mi-boîte inférieure et supérieure, Fonde couvercle, Pierres poreuses, Plaques striées (drainantes ou non) et Vis de montage des de mi-boîtes. (Figure III.6).



Figure III.8 : L'appareil de cisaillement (Chenini, 2021).

III.4.2. Le Principe :

L'essai s'effectue sur une éprouvette de sol placée dans une boîte de cisaillement constituée de deux demi-boîtes indépendantes. Le plan de séparation des deux demi-boîtes constitue un plan de glissement correspondant au plan de cisaillement de l'éprouvette. Il consiste à :

- Applique sur la face supérieure de l'éprouvette un effort vertical (N) maintenu dans l'éprouvette toute la durée de l'essai.
- Produire après consolidation de l'éprouvette sous l'effort (N) un cisaillement dans l'éprouvette selon le plan horizontal de glissement des deux demi-boîtes l'une par rapport à l'autre en leur imposant un déplacement relatif à une vitesse constante.
- Mesurer l'effort horizontal de cisaillement (T) correspondant.

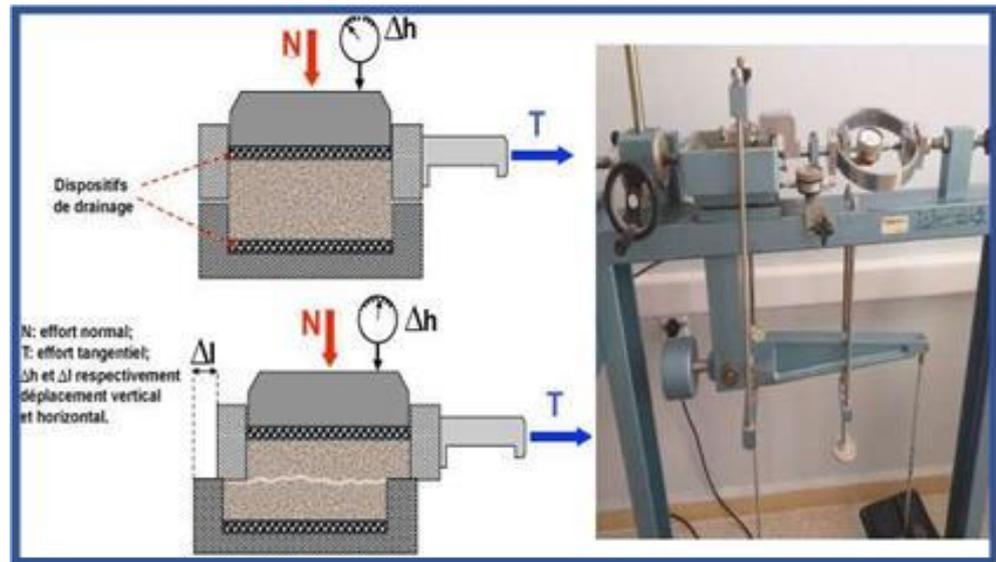


Figure III.9 : Principe de l'Essai de Cisaillement Directe (Boudjabi, 2020).

III.4.3. Préparation des échantillons :

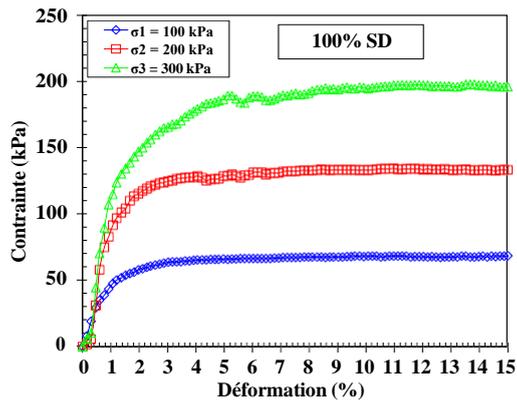
Les différents pourcentages de sable de dune et des fines calcaire (SD-FC) sont mélangés manuellement avant d'ajouter la quantité d'eau de gâchage correspond l'OPM.

Le mélange humide est soumis par la suite à un compactage statique dans le moule cylindrique de dimensions ($D = 6$ cm et $H = 2$ cm).

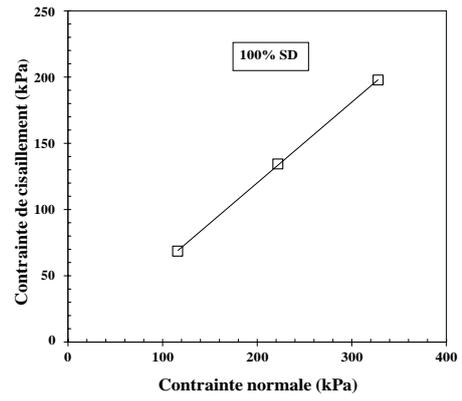
Pour s'assurer que la surface de contact est plane, on procède au rasage et au lissage de l'échantillon dans les deux côtés, supérieur et inférieur, avec remplissage des vides.

Après la préparation, les échantillons sont immédiatement mis dans la boîte de cisaillement appelée aussi boîte de Casagrande. Ces échantillons sont cisailés en appliquant trois contraintes normales (100, 200 et 300kPa) avec un taux de déformation de 0,5 mm/min appliqué pour tous les échantillons.

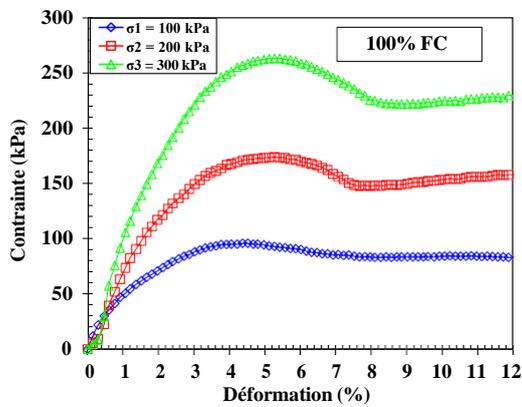
Les figures III.10 : Présentent la variation de la contrainte en fonction de la déformation (courbes contraintes-déplacement) et les chemins de contrainte dans le plan $[\tau, \sigma]$ pour les différents mélanges (SD-FC).



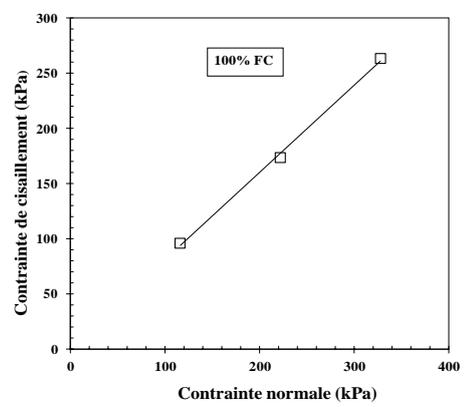
(1)



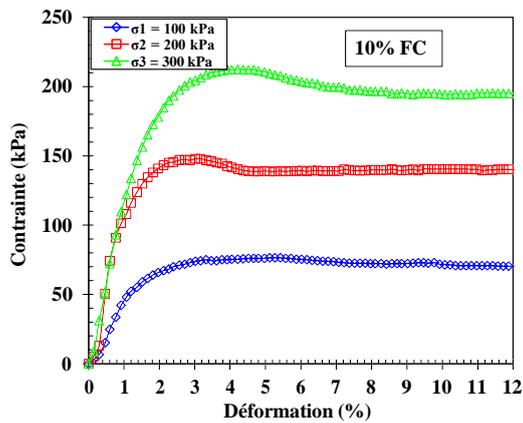
(2)



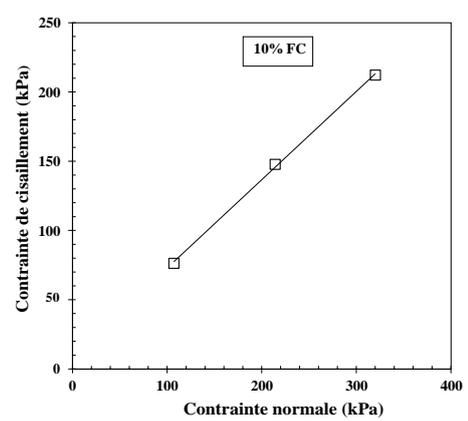
(1)



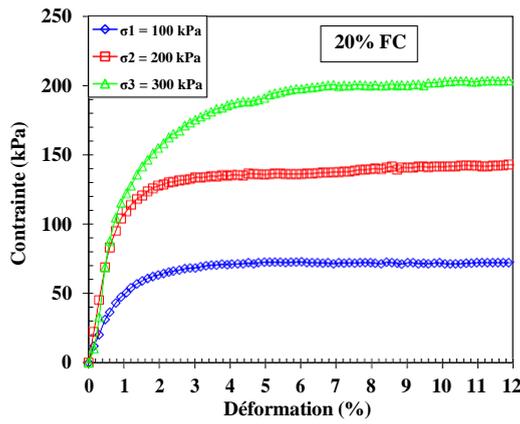
(2)



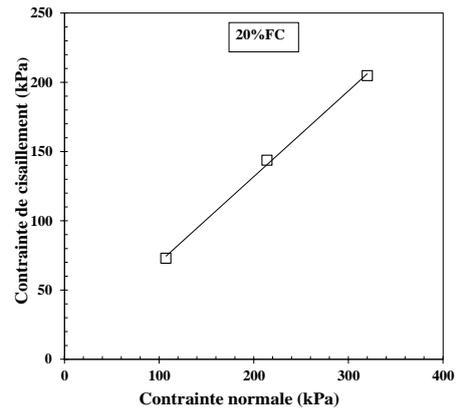
(1)



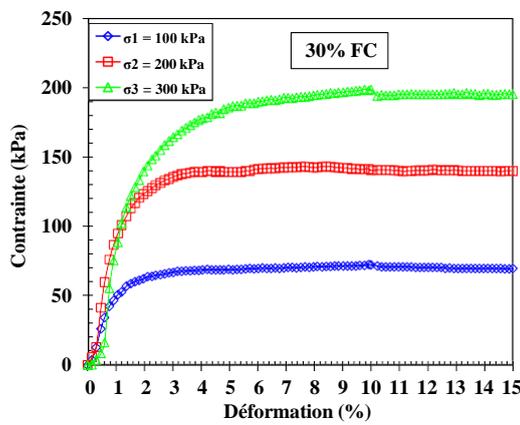
(2)



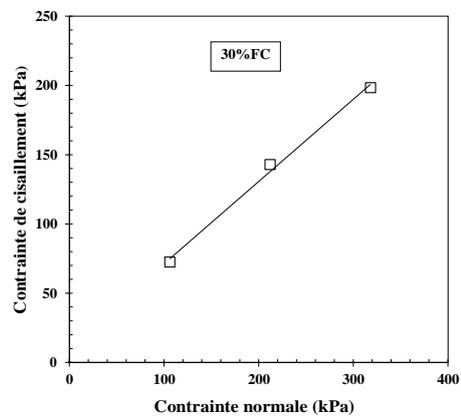
(1)



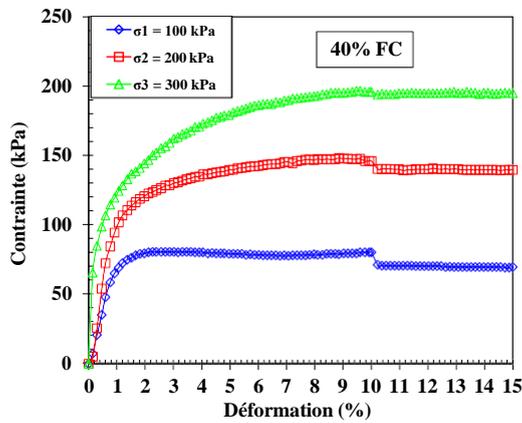
(2)



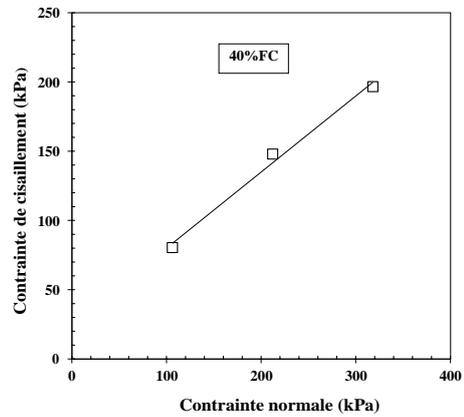
(1)



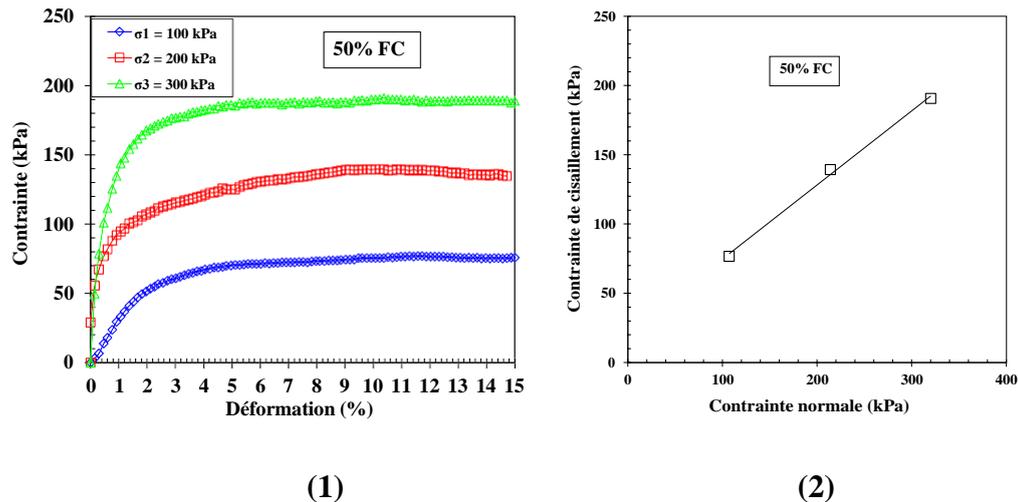
(2)



(1)



(2)



Figures III.10 : Influence de l'ajout des fines calcaire sur la résistance au cisaillement : (1) courbe contraintes – déplacement (2) chemins de contrainte dans le plan $[\tau, \sigma]$.

D'après les figures III.10, on remarque que pour tous les échantillons :

- Les courbes contraintes-déplacement n'ont pas linéaire, on a une déformation élastique non linéaire et une déformation plastique, ce qui nous permet d'attribuer un comportement élasto-plastique aux mélanges SD-FC ;
- La contrainte augmente avec le déplacement jusqu'à atteindre un pic, ensuite la rupture se propage et la contrainte diminue progressivement et tend vers un palier ;
- La contrainte maximale augmente avec la contrainte normale ;
- La contrainte tangentielle augmente d'une manière linéaire avec la contrainte normale.

Les valeurs de la cohésion C et l'angle de frottement ϕ déduit des courbes intrinsèques dans le plan (τ, σ) , sont représentées sur la figure III.11. On remarque que la cohésion augmente considérablement avec le dosage des FC. La cohésion est multipliée 5 fois dans le cas de l'ajout de 50% FC. Par contre, l'angle de frottement diminue avec l'ajout de FC, elle passe de 31° à 28° quand on ajoute 50%FC.

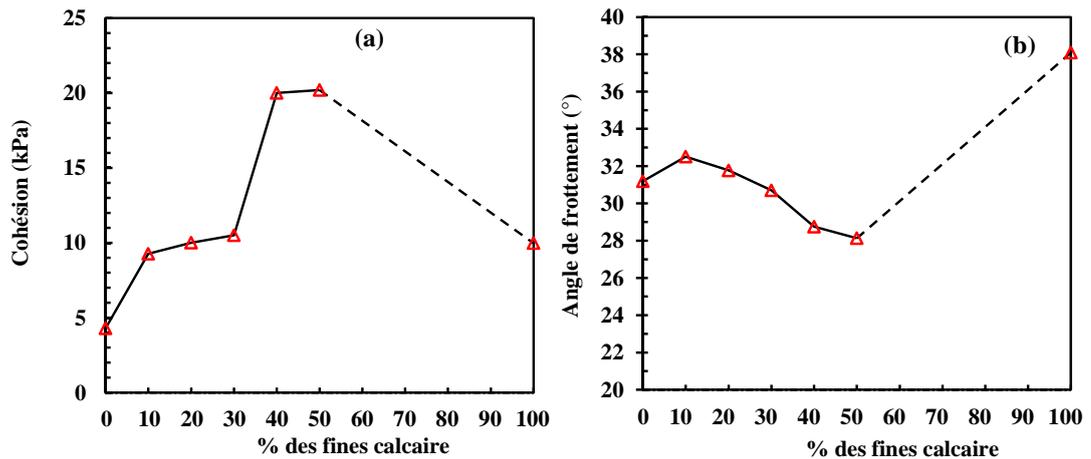


Figure III.11 : variation de la cohésion et l'angle de frottement en fonction de pourcentage des fines calcaire

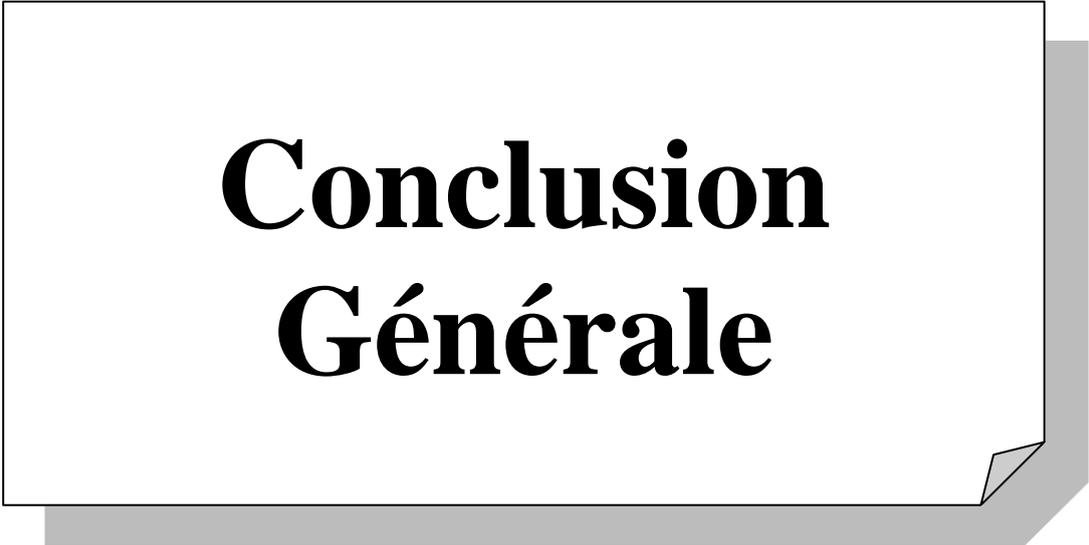
III.5. CONCLUSION :

Dans ce dernier chapitre nous avons l'influence de l'ajout des fines calcaire sur caractéristiques de compactage, de portance et de cisaillement, du sable de dune.

Au cours de cette étude, nous avons vu que l'ajout des fines calcaire sur le sable de dune conduit à une augmentation de la densité sèche maximale et diminution de la teneur en eau optimale. Également les indices CBR sont améliorés, notamment l'indice CBR immédiat, ce qui améliore compactibilité et de traficabilité du matériau.

Les résultats obtenus à partir de l'essai de cisaillement direct permis de constater que l'ajout des fines calcaire augmente considérablement la cohésion

Finalement, la formule optimale retenue et qui confère les meilleures caractéristiques géotechniques, tenant en compte l'aspect économique, est la formule qui contient une teneur en fines calcaire entre 40 et 50%.



Conclusion Générale

Conclusion générale

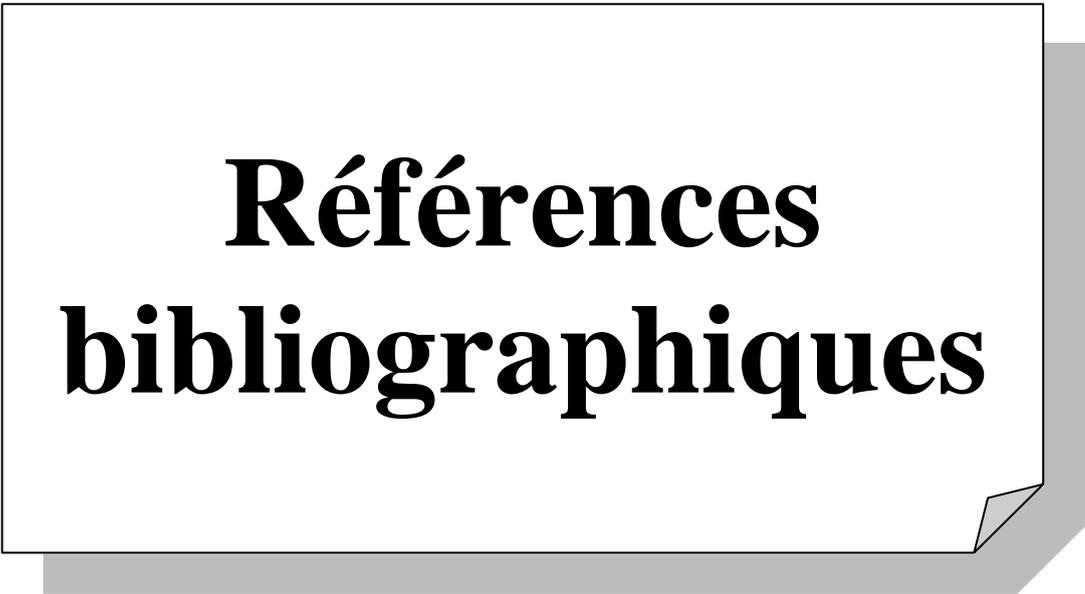
Les régions sahariennes sont souvent caractérisées par un manque de matériaux de construction traditionnels tels que les granulats. Notre étude rentre dans le cadre de valorisation des matériaux locaux afin de généraliser leurs utilisations en techniques routières sahariennes.

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

Les résultats obtenus à partir de l'étude d'optimisation nous a permis de retenir que :

- L'ajout des fines calcaire conduit à une augmentation de la densité sèche maximale et diminution de la teneur en eau optimale.
- L'ajout des fines calcaire influe positivement sur les indices CBR ; notamment l'indice CBR immédiat
- La cohésion augmente considérablement avec le dosage des fines calcaire, Par contre, l'angle de frottement diminue.

En résumé, la valorisation d'un mélange de sable de dune et des fines calcaire dans le domaine de la géotechnique routière saharienne offre des avantages potentiels en termes de caractéristique géotechnique, d'utilisation efficace des ressources locales et de préservation de l'environnement. Cependant, une évaluation approfondie des propriétés de mélange choisi est nécessaire pour garantir sa pertinence et sa fiabilité dans des conditions spécifiques.



**Références
bibliographiques**

Références bibliographiques

Chauvin j. j. (1987) : « les sables, guide pratique d'utilisation routière », I.S.T.E.D, paris, France, p.74

Kettab R. (2007) : « contibuction à la valorisation du sable de dunes ».Thèse de doctorat, Ecole Nationale poly technique, Alger.

Marouef M. (2019) : « Influence des différents granulométriques du sable sur le comportement mécanique du béton ».Mémoire de master, Université de LARBI BENMEHIDI-OUMEL BOUAGEL.

Saidane W. Benseghir W. (2020) : « Effet du mélange de sable de différente nature (sable concasse et sable de dune) sur les caractéristiques d'un béton auto-plaçant ».Mémoire de Master, Université Mohamed Boudiaf-M'ailla.

Ben Fatacha Mohamed Abdou. (2016) : « de compacité des bétons AUTO-Plaçant aux différents types de sables ». Soutenue le : 04/06/2016.

Chenini M.Z ; Bellahcene T. (2021) : « Etude de un comportement mécanique d'un mélange sable de dune-argile de wilaya Ghardaïa renforce par géotextile ».Mémoire de Master, Université de Ghardaïa.

Gherzouli A ; Rahali. (2019) : « Etude de caractéristiques Rhéologique ET Mécanique D'un Mortier AUTO-plaçant A Base de Fillers calcaire ».Mémoire de Master, université MOHAMED BOUDIAF-M'sila.

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, p33-42.

Khengaoui S. (2013) : « valorisation du sable de dunes en couche de Roulement sable – Bitume ».Mémoire de Magister, université KASDI MERBAH de Ouargla.

Khalil K. (2016) : « caractérisation mécanique d'un mélange : Tuf+sable de dunes ». Mémoire de Master, université COLONEL AHMED DRAaia d'Adrar.

Balhachemi S ; Berrafa I.F. (2017) : « la valorisation de sable de dune (sable de Naama) Durabilité et comportement mécanique ».Mémoire de Master, université Belhadj Bouchaib d'Ain Temouchent.

Boulkhiout M., (2015) : « valorisation de tufs dans le béton ». Thèse de doctorat, ENP Alger.

Vial Y.M., (1978) : « Sahara, milieu vivant ». Collection Hatier.

Ould Sida. C., Havard H., Valin. C. (1995) : Terrassements routiers dans les sables de dunes de Mauritanie, Bulletin de liaison des Laboratoire des ponts et chaussées, 199, pp.27-34.

Derville H. (1931) : « les marbres du calcaire carbonifère en Bas-Boulonnais ».

Castaing j ; Geisler D (1972) : « contribution à l'étude sédimentologique du bajocien de la région de Nancy » (Doctoral dissertation).

Brouri K. (2020) : « Etude du comportement d'un mélange de calcaire et de débris de vew pour une valorisation dans la construction routière ». Mémoire de Master, université Mouloud MAMMERI de TIZI-OUZOU (UMMTO).

Beauchamp J. (2003) : « Mécanique des roches et des sols ».

Keller E A. (2000) : « Environnemental géologie prentice Hall ».

Derconrt J ; paquet H. (1995) : « Eléments de géologie ».

Kettab R ; Bali A ; Fleurean J M, (2002) : « sable enrobé Etude et formulation. Journées Nationales de géotechnique et de géologie de l'ingénieur ». JNGG 2002 du 8 au 10 octobre 2002. Nancy, France.

Nedjari R. (2003) : « Résultats de planches expérimentales en sable enrobé et recommandations relatives à son utilisation ». 3ème congrès algérien de la route, Alger 2003.

Morsli M. (2007) : « contribution à la valorisation des tufs d'encrouement en technique routière saharienne ». Thèse de doctorat, Ecole Nationale polytechnique, Alger.

Ghrieb Abderrahmane, Mitiche-Kettab Ratiba and Bali Abderrahim. (2014) : « stabilisation and utilisation of Dune Sand in Road Engineering ». Arab J sci Eng (2014) 39: 1517-1529.

Cherrak M ; Morsli M ; Boutemour R and Bali A. (2015) : « valorisation of the use of calcareous tuf and dune sand in saharan road design ». Journal of civil Engineering and Architecture 9 (2015) 665-676, 4,5.

Akacem Mustapha. (2017) : « valorisation des matériaux locaux tuf et sable de dunes dans la construction routière saharienne ». Thèse de doctorat, USTO.

Morsli M ; Bali A ; Fleureau J.M., (2005) : « comportement du matériau Tuf calcaire-sable de dune ». séminaire International sur le compactage des sols, Tunisie.

Morsli M ; Abderrahim B ; Mahmoud B ; and Michel G. (2007) : « Etude du durcissement d'un tuf d'encroûtement de Hassi-Messaoud (Algérie). Revue Européenne de Génie civil, vol, 11, No. 9-10, pp 1219-1240.

Daheur El hadj Gesmia. (2019) : « comportement d'un mélange Tuf –sable de dune sous sollicitations monotones et cycliques ». Thèse de doctorat en science, Ecole Nationale polytechnique, Alger.

Fenzy E. (1966) : « particularité de la technique routière au Sahara Revue générale des routes et aérodromes », N°411,57-71.

Gandil p. (1988) : cours de routes, ENPC, 1988

GTR. (1992) : « Réalisation des remblais et des couches de forme ». Guide technique, LCPC-SETRA, 204p.

CTTP. (2001) : « catalogue de dimensionnement des chaussées neuves ». Organisme National de contrôle Technique des travaux publics, Algérie.

Holtz R, and Kovaks W. (1996) : « Introduction à la Géotechnique, Edition de l'Ecole Nationale polytechnique de Montre (Introduction to geotechnical Edition of the National polytechnic school of Montreal) ». Montreal : Edition de l'Ecole Nationale polytechnique de Montreal.

Berg-A. (2003) : « élément de mécanique des sols », 2003.

Didier. D, Girard. N. (1999) : « précise de chantier matériel et matériau », mise en œuvre, normalisation, AFNOR, 258p.

Daheur E.G., Bouhicha, M., and Zaidi, A. (2012) : « L'influence du traitement des tufs d'encroûtements par les liants organique et hydraulique, sur la résistance à la compression et au cisaillement ». 1st International Conférence on Civil Engineering, 8-9 May 2012, Laghouat University, Algeria.

Daheur E.G., Goual, I., and Taibi, S. (2015a) : « Effet de l'immersion sur le

comportement mécanique d'un tuf gypso-calcaire traité aux liants organique ou hydraulique ». 3th international conférence on unsaturated soils. Batna, Algeria.

Daheur E.G., Goual, I., et Mitiche-Kettab R. (2015b) : «Amélioration du comportement mécanique de tuf saharien par un traitement aux liants hydrauliques ou organique ». 13th Arab Structural Engineering Conference, University of Blida 1, December 13-15, 2015. ALGERIA.

Goual, I., Goual, M.S., Taibi, S. and Abou-Bekr, N. (2012) : « Amélioration des propriétés d'un tuf naturel utilisé en technique routière saharienne par ajout d'un sable calcaire ». European Journal of Environmental and Civil Engineering, Vol. 16, No. 6, pp. 744–763.

Struillou L, Alloul B., (1984) : « Valorisation routière des tufs d'encroûtements en Algérie. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, Symposium International sur les Granulats ».

- NFP 18- 056** : Analyse granulométrique.
- NFP 18-057** : Analyse granulométrique par sédimentométrie.
- NFP 94-051** : Limites d'Atterberg.
- NFP 18-598** : Equivalent de sable.
- NFP 94-068** : Valeur de bleu de méthylène VBS.
- NFP 94-093** : Proctor Modifié.
- NFP 94-078** : Portance CBR.

Annexes

Annexe A

ANNEX01 : Analyse granulométrique par tamisage

Echantillon N01 : sable de dune d'oued Metlili

MASSE sec de l'échantillon à analyser (après étuvage) : M=600g

Poids de l'échantillon (g)	Diameter (mm)	Rufus particle (g)	Rufus cumuli (g)	Rufus (%)	Compliment à 100	Tami sat (%)
	600	1	0	0	0	100
	0.63	2.2	2.2	0.37	99.3	100
	0.500	9.7	11.9	1.98	98.02	98
	0.315	151.5	163.4	27.23	72.77	73
	0.250	161.8	325.2	54.20	45.80	46
	0,160	52.4	377.6	62.93	37.07	37
	0.125	115.4	493	82.17	17.83	18
	0.063	89.1	582.1	97.02	2.98	3

Chapitre 3 ANNEXE 02 : Analyse sédimentométrie

Durée de chute	Temps	Lecture de Densimètre R'	t (°C)	Correction (c)	Lecture corrigée R1 =R'+C	% des elements (D) sur ensemble de l'échantillon	D (mm)
17.6°C	8H15	30 "	21	-0.410	20.590	0.075	71
17.6°C	8H16	01'	20	-0.410	19.590	0.055	68
17.6°C	8H17	02'	19	-0.410	18.590	0.038	64
17.6°C	8H20	05'	17	-0.410	16.590	0.025	57
17.6°C	8H25	10'	16	-0.410	15.590	0.017	54
17.6°C	8H35	20'	14	-0.410	13.590	0.012	47
17.6°C	8H55	40'	11	-0.410	10.590	0.008	37
17.4°C	09H35	80'	10	-0.584	9.416	0.006	32
17.4°C	10H55	160'	8.5	-0.584	7.416	0.004	26
17.2°C	13H35	320'	07	-0.470	6.530	0.00	23

						3	
18.8°C	24H	144 0'	05	-0.214	4.786	0.00 2	17
17.8°C	48H	-	03	-0.380	2.620	0.00 1	09
17.8°C	72H	-	01	-0.380	0.620	0.00 5	02

ANNEXE 03 : Analyse granulométrique par tamisage

Echantillon N°2 : F i n e s Calcaire

Masse sec de l'échantillon à analyser (après étuvage) : M= 500 g,

Poids de l'échantillon	Diamètre (mm)	Refus partiel (g)	Refus cumulus (g)	Refus (%)	Complément à 100	Tamisé (%)
500g	5	0,00	0,00	0,00	100,00	100
	2	0.00	0.00	0.00	100.00	100
	1	0.00	0.00	0.00	100,00	100
	0,4	15.98	15.98	3.20	96,80	97
	0,2	51.95	67.93	13.59	86,41	86
	0,1	60.34	128.27	25.65	74,35	74
	0.063	15.25	143.52	28.70	71,30	71

ANNEXE04 : Limites d'Atterberg

Liquidité- Plasticité Echantillon N°1 : Sable de dune d'Oued Metlili

Limite de liquidité						
	1 Essai		2 Essai		3 Essai éventuellement	
Nombre de coups	19					
N° de la tare	T6	R4				
Poids total humide	37.34	40.65				
Poids total sec	36.48	39.37				

Poids de la tare	31.79	32.37				
Poids de l'eau	0.86	1.28				
Poids du sol sec	4.69	7				
Teneur en eau (%)	18.3	18.3				
Moyenne	18.31					
Limite de liquidité	17.71					

ANNEXE05 : Limites d'Atterberg

Liquidité- Plasticité Echantillon N°2 : FINES Calcaire

Limite de liquidité

	1 Essai		2 Essai		3Essai éventuellement	
Nombre de coups	19					
N° de la tare	106	146				
Poids total humide	22.75	24.75				
Poids total sec	21.26	22.86				
Poids de la tare	13.86	13.6				
Poids de l'eau	1.51	1.89				
Poids du sol sec	7.43	9.26				
Teneur en eau (%)	20.3	20.4				
Moyenne	20.37					
Limite de liquidité	19.70					

ANNEXE 06 : Essai Equivalent DE SABLE DE DUNE d'Oued Metlili

		Essai n° 1	Essai n° 2	Moyenne %
Sable de dune d'Oued Metlili	h1 (cm)	103	103	65.04%
	h2 (cm)	60	74	
	$ES = \frac{h^2}{h1}$	58.25	71.84	

ANNEXE 07 : Essai volume au bleu de méthylène SABLE DE DUNE d'Oued Metlili

Prise D'essai Mh =200g			<p>Volume de bleu injecte dans la prise d'essai $V = 05\text{cm}^3$</p> <p>Valeur au bleu de la prise d'essai passant a :</p> <p>$Vb = V/Ms = 05 / 199.74 = 0.03$</p> <p>$VB t = Vb \times \% t / 100$</p>
Calcul de la Teneur en Eau			
Tare N°	G02	Z47	
PT	410.07	422.29	
Ph+T	409.7	421.9	
PS+T	119.33	119.74	
Ps	0.37	0.39	
W (%)	0.13	0.13	
W _{moy} (%)	0.13		
$W\% = ph - ps \cdot 100 = 0.13$ $Ps = ph \times 100 / (100 + w (\%)) = 199.74$			

ANNEXE08 : Essai volume au bleu de méthylène - FINES Calcaire

Prise d'essai Mh =200 g			<p>Volume de bleu injecte dans la prise d'essai $V = 05\text{cm}^3$</p> <p>Valeur au bleu de la prise d'essai passant a :</p> <p>$V_b = V/M_s = 5 / 59.91 = 0.08$</p>
Calcul de la Teneur en Eau			
Tare N°	X1	D20	
PT	172.63	157.33	
Ph+T	172.43	157.17	
PS+T	36.65	53.39	
Ps	0.2	0.16	
W (%)	0.15	0.15	
W moy	0.15		
$W\% = (Ph-Ps).100 = 0.15$ $Ps=Ph \times 100 / 100 + w (\%) = 59.91$			

ANNEXE09 : Essai Proctor modifié Echantillon N°02 –Fines Calcaire

poids de l'eau ajoutée	8%		10%		12%		14%		16%	
Poids total humide	3756		3787		3867		3808		3816	
poids du moule	1792		1792		1792		1792		1792	
poids du sol humide	1964		1995		2075		2016		2024	
poids du sol sec	1815		1818		1853		1769		1751	
volume du moule	926		926		926		926		926	
densité sèche	1,96		1,96		2		1,91		1,89	
N° de la tare	15	10	13	6	55	Z30	F1	MT	MZ	I29
poids total humide	486,8	519,1	422,8	400,8	534,4	571,1	529,2	586,4	705,1	512,5
Poids total sec	461,2	490,1	398,2	378,3	493	526,2	483,2	542,6	639,8	469,7
Poids de la tare	144	146	148	146	148	148	154	229	218	197
Poids de l'eau	25,6	29	24,6	22,5	41,4	44,9	46	43,8	65,3	42,8
Poids du sol sec	317,2	344,1	250,2	232,3	345	378,2	329,2	313,6	421,8	272,7
Teneur en eau	8,07	8,43	9,83	9,69	12	11,87	13,97	13,97	15,48	15,69
Moyenne	8,25		9,76		11,94		13,97		15,59	

ANNEXE10 : essai Proctor modifié Echantillon N°01 -sable de dune

poids de l'eau ajoutée	8%		10%		12%		14%		16%	
Poids total humide	3586,3		3626,1		3681,8		3685,1		3685,1	
poids du moule	1792		1792		1792		1792		1792	
poids du sol humide	1794,3		1834,1		1889,8		1893,1		1893,1	
poids du sol sec	1661,3		1667,3		1687,3		1660,6		1631,9	
volume du moule	926,3		926,3		926,3		926,3		926,3	
densité sèche	1,78		1,79		1,82		1,81		1,79	
N° de la tarre	15	10	13	6	55	Z30	F1	MT	MZ	129
poids total humide	516	526	544	560	509	409	465	496	571	557
Poids total sec	486,5	496,9	507,5	521,5	471	382,1	429	466,2	529,3	510,6
Poids de la tarre	144	146	148	146	148	148	154	229	218	197
Poids de l'eau	29,5	29,1	36,5	38,5	38	26,9	36	29,8	41,7	46,4
Poids du sol sec	342,5	350,9	359,5	375,5	323	234,1	275	237,2	311,3 313,6	
Teneur en eau	8,61	8,29	10,15	10,25	11,76	11,49	13,09	12,56	13,39 14,79	
Moyenne	8,45		10,2		11,62		12,82		14,09	

Chapitre 4 ANNEXE11 : Compression simple Echantillon N°02 –Fines

Calcaire*Sable de dune

$\rho_{\max}(\text{t/m}^3)$	2
W_{opm}	12%

Chapitre 5

Compacité	Densité	Poids du sol sec(g/cm^3)	Poids de l'eau(g/cm^3)	Poids du sol humide(g/cm^3)
100%	2	392.50	47.10	439.60
97%	1.94	380.73	45.69	426.41
95%	1.90	372.88	44.75	417.62

N d'éprouvette	Poids réel après le compactage	P réel l'ecrasement	Teneur en eau	D(ϕ) éprouvette	Hauteur éprouvette	Volume éprouvette	Densité l'ecrasement	Compacité à l'ecrasement	Lecteur	R (kg/cm^3)	Rc moy
100%	438.16	391.27	11.98	5	10	196.25	1.99	99.96	0.704	3.66	4.03
100%	438.18	391.41	11.95	5	10	196.25	1.99	99.30	0.845	4.39	
97%	424.77	378.69	12.17	5	10	196.25	1.93	96.63	0.351	1.82	2.19
97%	424.85	379.17	12.05	5	10	196.25	1.93	97.48	0.492	2.56	
95%	415.26	370.00	12.23	5	10	196.25	1.89	94.36	0.282	1.47	1.44
95%	415.48	370.73	12.07	5	10	196.25	1.89	93.99	0.274	1.42	

Annexe B

LABORATOIRE DES TRAVAUX PUBLICS DU SUD

ESSAI PROCTOR	NORMAL <input type="checkbox"/> MODIFIE <input type="checkbox"/>
NF P 94-093 Septembre 1997	

Structure : U.GHARDAIA

N° Dossier interne :

Echantillon : 90SD+10 FC

Prise d'essai : 2500g

Lieu de travail : SERVICE
CONTROLE

Température de séchage : 55C°

Teneur en eau Opm

Densité sèche Max :

Date :

Opérateur :

Équipements utilisés : balance –
étuve –N° D'inventaire : L022/15/S026
L49/07/86

Poids d'eau ajoutée :	4%		6%		8%		10%		12%	
Poids total humide :	3590		3654		3708		3751		3760	
Poids du moule :	1792		1792		1792		1792		1792	
Poids du sol humide :	1798		1862		1916		1959		1968	
Poids du sol sec :	1734		1744		1778		1783		1755	
Volume du moule :	926		926		926		926		926	
Densité sèche :	1,87		1,88		1,92		1,93		1,89	
N° de la tare :	S1	N2	1	2	3	4	5	6	11	12
Poids total humid :	82	68	66	47	407	457	357	515	72	77
Poids total sec :	80	66	63	45	388	441	338	486	66	71
Poids de la tare :	18	18	19	15	148	229	145	194	19	19
Poids de l'eau :	2	2	3	2	19	16	19	29	6	6
Poids du sol sec :	62	48	44	30	240	212	193	292	47	52
Teneur en eau :	3,23	4,17	6,82	6,67	7,92	7,55	9,84	9,93	12,77	11,54
Moyenne :	3,70		6,74		7,73		9,89		12,15	

L'opérateurVisa du responsable

LABORATOIRE DES TRAVAUX PUBLICS DU SUD

ESSAI PROCTOR	NORMAL <input type="checkbox"/>
	MODIFIE <input type="checkbox"/>
NF P 94-093 Septembre 1997	

Structure : U.GHARDAIA	Lieu de travail : SERVICE CONTROLE	Date :
N° Dossier interne :	Température de séchage : 55C°	Opérateur :
Echantillon : 80% SD+20% FC	Teneur en eau Opm :	Équipements utilisés : balance – étuve –
Prise d'essai : 2500 g	Densité sèche Max	N° D'inventaire : L022/15/S026 L49/07/86

Poids d'eau ajoutée :	4%	6%	8%	10%	12%					
Poids total humide :	3602	3769	3828	3811	3784					
Poids du moule :	1792	1792	1792	1792	1792					
Poids du sol humide :	1810	1977	2036	2019	1992					
Poids du sol sec :	1740	1861	1886	1839	1782					
Volume du moule :	926	926	926	926	926					
Densité sèche :	1,88	2,01	2,04	1,99	1,92					
N° de la tare :	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7	X8	X9	X10
Poids total humid :	486	432	68	90	434	409	428	405	485	521
Poids total sec :	476	421	65	86	418	395	410	382	457	490
Poids de la tare :	229	148	18	20	218	219	225	147	225	219
Poids de l'eau :	10	11	3	4	16	14	18	23	28	31
Poids du sol sec :	247	273	47	66	200	176	185	235	232	271
Teneur en eau :	4,05	4,03	6,38	6,06	8,00	7,95	9,73	9,79	12,07	11,44
Moyenne	4,04	6,22	7,98	9,76	11,75					

L'opérateur**Visa du responsable**

LABORATOIRE DES TRAVAUX PUBLICS DU SUD

ESSAI PROCTOR	NORMAL <input type="checkbox"/>
	MODIFIE <input type="checkbox"/>
NF P 94-093 Septembre 1997	

Structure : U.GHARDAIA	Lieu de travail : SERVICE CONTROLE	Date :
N° Dossier interne :	Température de séchage : 55C°	Opérateur :
Echantillon : 70%SD+30% FC	Teneur en eau Opm :	Équipements utilisés : balance – étuve –
Prise d'essai : 2500 g	Densité sèche Max :	N° D'inventaire : L022/15/S026 L49/07/86

Poids d'eau ajoutée :	6%		8%		10%		12%	
Poids total humide :	3638		3680		3836		3812	
Poids du moule :	1792		1792		1792		1792	
Poids du sol humide :	1846		1890		2042		2015	
Poids du sol sec :	1737		1752		1850		1801	
Volume du moule :	926		926		926		926	
Densité sèche :	1,88		1,89		2,00		1,95	
N° de la tare :	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	F8
Poids total humid :	503	414	431	487	101	120	110	116
Poids total sec :	485	398	415	467	93	111	100	106
Poids de la tare :	194	145	218	204	19	20	19	18
Poids de l'eau :	18	16	16	20	8	9	10	10
Poids du sol sec :	291	253	197	263	74	91	81	88
Teneur en eau :	6,19	6,32	8,12	7,60	10,81	9,89	12,35	11,36
Moyenne :	6,25		7,86		10,35		11,85	

L'opérateur

Visa du responsable

LABORATOIRE DES TRAVAUX PUBLICS DU SUD

ESSAI PROCTOR	NORMAL <input type="checkbox"/>
	MODIFIE <input type="checkbox"/>
NF P 94-093 Septembre 1997	

Structure : U.GHARDAIA	Lieu de travail : SERVICE CONTROLE	Date :
N° Dossier interne :	Température de séchage : 55C°	Opérateur :
Echantillon : 60%SD+40% FC	Teneur en eau Opm :	Équipements utilisés : balance – étuve –
Prise d'essai : 2500 g	Densité sèche Max :	N° D'inventaire : L022/15/S026 L49/07/86

Poids d'eau ajoutée :	6%		8%		10%	
Poids total humide :	3859		3951		3883	
Poids du moule :	1792		1792		1792	
Poids du sol humide :	2067		2159		2091	
Poids du sol sec :	1949		1994		1895	
Volume du moule :	926		926		926	
Densité sèche :	2,10		2,15		2,05	
N° de la tare :	R1	R2	R3	R4	R5	R6
Poids total humid :	103	382	124	110	102	288
Poids total sec :	98	369	116	107	94	275
Poids de la tare :	19	145	18	19	18	147
Poids de l'eau :	5	13	8	7	8	13
Poids du sol sec :	79	224	98	84	76	128
Teneur en eau :	6,33	5,80	8,16	8,33	10,53	10,16
Moyenne :	6,07		8,25		10,34	

L'opérateur**Visa du responsable**

LABORATOIRE DES TRAVAUX PUBLICS DU SUD

ESSAI PROCTOR	NORMAL <input type="checkbox"/>
	MODIFIE <input type="checkbox"/>
NF P 94-093 Septembre 1997	

Structure : U.GHARDAIA	Lieu de travail : SERVICE CONTROLE	Date :
N° Dossier interne :	Température de séchage : 55C°	Opérateur :
Echantillon : 50%SD+50 %FC	Teneur en eau Opm :	Équipements utilisés : balance – étuve –
Prise d'essai : 2500 g	Densité sèche Max :	N° D'inventaire : L022/15/S026 L49/07/86

Poids d'eau ajoutée :	6%		8%		10%		12%	
Poids total humide :	3743		3793		3893		3865	
Poids du moule :	1792		1792		1792		1792	
Poids du sol humide :	1951		2001		2101		2073	
Poids du sol sec :	1846		1854		1916		1847	
Volume du moule :	926		926		926		926	
Densité sèche :	1,99		2,00		2,07		1,99	
N° de la tare :	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8
Poids total humid :	326	390	356	400	449	372	369	325
Poids total sec :	319	381	346	387	429	352	344	305
Poids de la tare :	192	229	219	225	218	149	132	147
Poids de l'eau :	7	9	10	13	20	20	25	20
Poids du sol sec :	127	152	127	162	211	203	212	158
Teneur en eau :	5,51	5,92	7,87	8,02	9,48	9,85	11,79	12,66
Moyenne :	5,72		7,95		9,65		12,23	

L'opérateur**Visa du responsable**