



Faculté des Sciences et Technologies
Département des Sciences et Technologie

Mémoire présenté en vue de l'obtention du diplôme de

MASTER

Domaine : Sciences et Technologies

Filière : Génie civil

Spécialité : Structure

Par : Cherif fares

Ben Hamdoun yacine

Thème

**INFLUENCE DU MODE DE COMPACTAGE SUR
LA PORTANCE D'UN MATERIAU LOCAL**

Soutenu publiquement le : 01/06/2025

Devant le jury :

Prénom et Nom	Grade	Université	Président
Mme. AZZOUZ Fatima Zohra	MAA	Univ. Ghardaïa	Encadrant
Mr. KEBAILI Mustapha	MAA	Univ. Ouargla	Co Encadrant
Daheur hadj GhasmiaMCA.....	<u>Univ. Ghardaïa</u>	Examineur
Cady MokhtariaMCA.....	Univ. Ghardaïa	Presdente

Année universitaire 2024/2025

Remerciements

Avant tout, nous remercions Dieu le tout puissant qui nous a donné l'envie, le courage et la patience tout le long de nos études. Au terme de ce travail, nous exprimons.

Nous adressons nos plus sincères remerciements et notre profonde gratitude à notre encadrante, **Madame Azzouz Fatima Zohra**, ainsi qu'à notre co-encadrant, **Dr. Kebaili Mustapha**, pour leur accompagnement, leur soutien et leurs conseils précieux tout au long de la réalisation de ce travail. Leur contribution a été essentielle à la réussite de notre projet de fin d'études.

Nous remercions également l'ensemble du personnel du laboratoire LTPS.

En particulier le chef de service Mohamed **Cheikh Djghawa** pour leurs accueils chaleureux, pour leurs aides et leurs soutiens.

Merci à tous

Dédicaces

***J**e dédie ce mémoire de Master à :*

***M**es chers parents pour leurs sacrifices.*

***M**es sœurs et frère.*

***e**t tous les professeurs de notre faculté.*

***T**ous mes proches et amis fidèles.*

***T**ous ceux qui m'ont soutenu de près ou de loin.*

***À** ceux qui ont gravé leurs rêves sur les murs de l'université, qui ont porté leurs cahiers sur le chemin du savoir, à ces étudiants de Gaza qui sont partis avant que l'histoire ne soit complète, avant qu'on n'appelle leurs noms le jour de la remise des diplômes : paix à vos âmes pures. Le rendez-vous est chez un Seigneur qui n'oublie jamais.*

BEN HAMDOUNE Yacine

CHERIF Fares

Résumé

Ce mémoire porte sur l'amélioration des performances géotechniques des sols fins par l'incorporation de sable désertique dans une matrice argileuse. L'étude a été menée dans le but de valoriser les sables dunaires abondants de la région de Ghardaïa, souvent peu exploités en raison de leurs faibles propriétés mécaniques.

Les essais réalisés en laboratoire ont porté sur un mélange optimal composé de 70 % de sable de Sebseb** et de 30 % d'argile de Bouhraoua. Deux procédés de compactage ont été comparés : le Proctor modifié et le compactage vibratoire sur table vibrante**. L'objectif principal était d'évaluer l'effet du mode de compactage sur la densité sèche maximale, la teneur en eau optimale**, et la portance (CBR) du sol.

Les résultats obtenus ont montré que la méthode du **Proctor modifié** permet d'atteindre une **densité sèche maximale de $1,98 \text{ g/cm}^3$ et un **indice CBR de 7,02 %**, traduisant une nette amélioration de la portance et de la compacité du matériau. En revanche, la méthode du **compactage vibratoire** a donné des valeurs inférieures, avec une densité sèche maximale de ** $1,69 \text{ g/cm}^3$ et un CBR de 4 à 5 % en raison d'une énergie de compactage moins concentrée et de la texture relativement uniforme du sable.

L'analyse des indices des vides et des courbes de saturation a confirmé la supériorité du compactage Proctor modifié, notamment dans les milieux arides où le contrôle de l'humidité reste difficile.

Les résultats au contexte réel du chantier, en insistant sur les conditions d'application pratiques : contrôle de l'humidité, choix adapté des engins de compactage et réalisation d'essais in situ de densité et de portance. Plusieurs difficultés ont été rencontrées, notamment les variations d'humidité, l'hétérogénéité du matériau et les contraintes liées à la disponibilité en eau.

Mots-clés : sable dunaire, argile, compactage, Proctor modifié, table vibrante, densité sèche maximale, CBR, amélioration des sols.

Abstract

This thesis focuses on improving the geotechnical performance of fine soils through the incorporation of desert sand into a clay matrix. The study was conducted with the aim of valorizing the abundant dune sands of the Ghardaïa region, which are often underutilized due to their low mechanical properties.

Laboratory tests were carried out on an optimal mixture composed of **70% Sebseb sand** and **30% Bouhraoua clay**. Two compaction methods were compared: the **Modified Proctor test** and **vibratory compaction on a shaking table**. The main objective was to evaluate the influence of the compaction method on the **maximum dry density optimum water content, and bearing capacity (CBR) of the soil.

The results showed that the **Modified Proctor method** achieved a **maximum dry density of 1.98 g/cm³** and a CBR value of 7.02%, indicating a significant improvement in soil strength and compactness. In contrast, the vibratory compaction method** produced lower values, with a maximum dry density of 1.69 g/cm³** and a **CBR between 4% and 5%, due to less concentrated compaction energy and the relatively uniform texture of the sand.

The analysis of void ratios and saturation curves confirmed the superiority of the Modified Proctor compaction method, especially in arid environments where moisture control remains challenging.

The study also extended the laboratory results to real field conditions, emphasizing practical aspects such as moisture control, proper selection of compaction equipment, and in-situ testing of density and bearing capacity. Several difficulties were encountered, including moisture variations, material heterogeneity, and water availability constraints.

Keywords: dune sand, clay, compaction, Modified Proctor, vibrating table, maximum dry density, CBR, soil improvement.

المخلص

يتناول هذا البحث تحسين الخواص الجيوتقنية للتربة الدقيقة من خلال دمج الرمال الصحراوية ضمن مصفوفة طينية. تم إجراء هذه الدراسة بهدف **تثمين واستغلال الرمال الكتيانية** المتوفرة بكثرة في منطقة **غرداية**، والتي تُستغل بشكل محدود بسبب ضعف خصائصها الميكانيكية.

أُجريت التجارب المخبرية على **خليط أمثل** مكون من **70% من رمل سيبسب** و**30% من طين بوهراوة**. تمت مقارنة طريقتين للدمك: **طريقة بروكتور المعدلة** و**الدمك الاهتزازي على الطاولة الاهتزازية**. الهدف الرئيسي كان تقييم تأثير طريقة الدمك على **الكثافة الجافة العظمى** و**نسبة الرطوبة المثلى** و**قدرة التحمل (CBR)** للتربة. أظهرت النتائج أن **طريقة بروكتور المعدلة** حققت **كثافة جافة عظمى بلغت 1.98 غ/سم³ وقيمة CBR بلغت 7.02%**، مما يدل على تحسن واضح في قدرة التحمل وكثافة المادة. في المقابل، سجلت **طريقة الدمك الاهتزازي** قيمة أقل، حيث بلغت الكثافة الجافة العظمى **1.69 غ/سم³ ومؤشر CBR بين 4% و5%**، ويُعزى ذلك إلى طاقة دمك أقل تركيزاً وإلى تجانس نسيج الرمل الذي يحدّ من إعادة ترتيب الحبيبات بشكل فعال.

كما أُنجز تحليل **مؤشرات الفراغات** و**منحنيات الإشباع** تفوّق طريقة بروكتور المعدلة، خصوصاً في المناطق الجافة حيث يصعب التحكم في نسبة الرطوبة. وقد تمّ نقل النتائج إلى **ظروف التنفيذ الميداني**، مع التركيز على الجوانب التطبيقية مثل **التحكم في الرطوبة** و**الاختيار المناسب لآليات الدمك**، و**إجراء التجارب الميدانية** (الكثافة، قابلية التحمل). وقد واجهت الدراسة عدّة صعوبات، من بينها **تغيّرات الرطوبة** و**عدم تجانس المواد** و**نقص توفر المياه** أثناء التطبيق.

****الكلمات المفتاحية: الرمال الكتيانية، الطين، الدمك، بروكتور المعدل، الطاولة الاهتزازية، الكثافة الجافة العظمى، مؤشر CBR، تحسين التربة.؟**

Table des matières

Remerciement	II
Dédicace	III
Résumé	IV
Abstract	V
الملخص	VI
Table de matières	VII
LISTE DES FIGURES	XIII
LISTE DES TABLEAUX	XV
LISTE DES PHOTOS	XVI
LISTES DE GRAPHERS	XVII
LISTES DE DIAGRAMME	XVIII
LISTES DES ABREVIATIONS	XIX
Introduction Générale	1
CHAPITRE I : APERÇU SUR LES TECHNIQUES DE COMPACTAGE	
I.1 Introduction	4
I.2 Critères de compactage	4
I.2.1 importance du compactage	4
I.2.2 critères fondamentaux du compactage	5
I.2.2.1 densité sèche maximale	5
I.2.2.2 teneurs en eau optimale	5
I.2.2.3 taux de compactage	5
I.2.2.4 épaisseur des couches	6
I.2.2.5 types de matériel de compactage	6
I.3 compactage sur site	7
I.3.1 travaux préparatifs au compactage	7

I.3.1.1 etude géotechnique préalable	7
I.3.1.2 débroussaillage et décapage (nettoyage de site)	7
I.3.1.3 nivellement et mise en forme	8
I.3.1.4 humidification ou desséchement du sol	8
I.3.1.5 signalisation et sécurité du chantier	8
I.3.2 les techniques de compactage sur site	8
I.3.2.1 compactage au rouleau	9
I.3.2.1.1 définition	9
I.3.2.1.2 les types de rouleau utilisés dans le compactage	9
I.3.2.1.2.1 rouleaux lisse	9
I.3.2.1.2.2 rouleaux pneumatique	9
I.3.2.1.2.3 rouleaux a pieds de mouton	10
I.3.2.1.2.4 rouleaux vibrantes	10
I.3.2.1.3 comment effectuer le compactage au rouleau	11
I.3.2.1.4 les défis du compactage au rouleau	11
I.3.2.2 autres techniques de compactage	12
I.3.2.2.1 compactage dynamique	12
I.3.2.2.2 compactage par explosion	12
I.3.2.2.3 compactage électrique	13
I.3.2.2.4 compactage par injection	13
I.3.2.2.5 compactage des briques	13
I.4 techniques des compactages au laboratoire	14
I.4.1 méthode proctore	14
I.4.1.1 types des essais proctor	14
I.4.1.1.1 essai proctor normal	14
I.4.1.1.2 essai proctor modifié	15
I.4.1.2 étapes de realization de l'essai proctor	15

I.4.1.3 en algérie méthode proctor	16
I.4.1.4 relation entre l'essai proctor et le CBR	17
I.4.2 méthode vibratoire	17
I.4.2.1 le matériel utilisé	17
I.4.2.2 étapes des realisation de l'essai	18
I.4.2.3 les facteurs principaux influençant l'essai	19
I.4.2.4 les erreurs courantes	19
I.4.2.5 comparatif entre le compactage vibrant et l'essai proctor	19
I.4.3 autres techniques au laboratoire	19
I.4.3.1 le compactage giratoire	19
I.4.3.2 compactage statique	20
I.4.3.3 compactage par pétrissage	20
I.5 conclusion	21
CHAPITRE II: Programme Expérimental	
II.1 Introduction	23
II.2 matériaux utilisés	23
II.2.1 l'argile	23
II.2.1.1 formation des argiles	24
II.2.1.2 les principe groupe d'argile	24
II.2.2 le sable	25
II.2.2.1 les forme de sable de dune	26
II.2.2.2 types de sable de dune	26
II.2.3 combinaison de sable et d'argile	27
II.3 Planning des Essais à Effectuer	27
II.3.1 Équivalent de sable (NFP 18-598)	27
II.3.2 teneur en CaCO ₃	28

II.3.3 Essai au bleu de méthylène (Norme NF 94-068)	28
II.3.4 Analyse granulométrique (afnor NF P94-056)	30
II.3.5 Analyse Sédimentométrique(afnor NF P94-057)	31
II.3.6 Limites d'Atterberg (Norme NF-P-94-051)	32
II.3.7 Essai Proctor normal & modifié (Norme NF P 94-093)	34
II.3.8 Essai CBR (AFNOR NF P94-078)	35
II.4 Conclusion	36
CHAPITRE III: Investigation Expérimentale	
III.1 Introduction	38
III.2 Zone d'Étude	38
III.3 – Localisation des Sites de Prélèvement des Matériaux	39
III.4 Essais d'identification des matériaux utilisés	41
III.4.1: Les essais sur l'argile de Bouhraoua	41
III.4.1.1 Analyse chimique	41
III.4.1.2 Analyse granulométrique (NF P94 – 056)	42
III.4.1.3 Limite d'Atterberg (NFP 94-051)	43
III.4.1.4 Essai au Bleu de Méthylène (Norme NF 94-068)	44
III.4.1.5 Teneur en carbonate de calcium de l'argile étudiée	44
III.4.2 les essais sur Sable de dune	45
III.4.2.1 Analyse granulométrique : (NF P94-056 et NF P94-057)	45
III.4.2.3 Classification du sol	46
III.5 Les essais de compactage	49
III.5.1 Préparation des échantillons	49
III.5.2 Essais Proctor modifié	50
III.5.3 Essais Table de vibration	52

III.5.4 Comparaison entre essai de proctor et essai T.vibration	55
III.6 Discussion et interprétation les résultats	56
III.6.1 interprétations les résultats des essais d'identification	56
III.6 .1.1 Analyse chimique	56
III.6.1.2 Analyse granulométrique	56
III.6.1.3 Limite d'Atterberg	56
III.6.2 les résultats de compactage selon mode Proctor modifié	57
III.6.3 les résultats de compactage selon mode vibration	58
III.6.4 Comparaison entre essai de proctor et essai T.vibration	58
III.7 Conclusion	59
CHAPITRE IV : Propositions de Mise en œuvre	
IV.1 Introduction	62
IV.2 Transposition des Résultats du Laboratoire au Chantier	61
IV.2.1 Résultats obtenus en laboratoire	61
IV.2.2 Adaptation sur le chantier	62
IV.2.3 Facteurs climatiques et hydriques	62
IV.2.4 Importance du suivi et de l'ajustement	62
IV.2.5 Application concrète à Ghardaïa	63
IV.3 Préparation et Mélange des Matériaux	63
IV.3.1 Types de matériaux à mélanger	63
IV.3.2 Techniques de malaxage sur site	64
IV.3.3 Ajout et gestion de l'eau	65
IV.4 Mise en place et compactage des matériaux	65
IV.4.1 Transport et épandage	65
IV.4.2 Compactage	66
IV.4.3 Facteurs influençant la qualité du compactage	67
IV.4.4 Contrôles sur site	68

IV.4.4.2 Comparaison avec les résultats de laboratoire	68
IV.4.4.3 Suivi différé et besoins de recompactage	69
IV.5 Approvisionnement et Logistique	69
IV.5.1 Approvisionnement	69
IV.5.2 Centrale et équipements	70
IV.6 Autres procédés d'amélioration de la portance	71
IV.6.1 Stabilisation aux liants (ciment, chaux)	71
IV.6.2 Utilisation de géotextiles	73
IV.7 Recommandations Techniques pour la Mise en Œuvre des Travaux	75
IV.8 Conclusion	77
Conclusion générale	79
Références Bibliographiques	82
Annexes	86

Liste de Figures

Figures	Titles	Pages
CHAPITRE I : APERCU SUR LES TECHNIQUES DE COMPACTAGE		
Figure I.1	Effet du compactage sur les propriétés du sol	5
Figure I.2	Courbe de Proctor	5
Figure I.3	Illustration montrant des couches de sol compactées	6
Figure I.4	Équipements de compactage selon le type de sol	6
Figure I.5	Travaux de nettoyage sur chantier.	7
Figure I.6	Nivellement du sol sur le chantier	8
Figure I.7	.Un appareil utilisé pour mesurer l'humidité du sol	8
Figure I.8	Compacteur à rouleau lisse	9
Figure I.9	Compacteur à rouleau pneumatique	10
Figure I.10	Rouleaux a pieds de mouton	10
Figure I.11	Compacteur à Rouleaux vibrantes	11
Figure I.12	Schéma du procédé de compactage par explosion	12
Figure I.13	Compacteur électrique en action	13
Figure I.14	Technique de compactage par injection	13
Figure I.15	Proctor normal.	14
Figure I.16	Proctor modifié.	15
Figure I.17	Essai Proctor.	16
Figure I.18	Compactage à table vibrante.	18
Figure I.19	Compactage à marteau vibrant	18
Figure I.20	Machine de Compactage Giratoire.	20
CHAPITRE II : PROGRAMME EXPERIMENTAL		
Figure II.1	Argile de la région de Ghardaïa	23
Figure II.2	Schéma de la particule de montmorillonite	24

Figure II.3	Schéma de la particule de kaolinite	24
Figure II.4	Schéma de la structure de l'illite	25
Figure II.5	Sable des dunes dans la région de Ghardaïa	25
Figure II.6	Machine d'agitation pour l'équivalent de sable	28
Figure II.7	Loi de CaCO_3	28
Figure II.8	Appareil de Casagrande	33
CHAPITRE III : Investigation Expérimentale		
Figure III.1	Situation géographique de la wilaya de Ghardaïa	39
CHAPITRE IV. Propositions de Mise en œuvre		
Figure IV.1	Essai à la plaque.	62
Figure IV.2	Sac de ciment pour travaux de stabilisation.	72

Liste de Tableaux

Tableaux	Titles	Pages
CHAPITRE I: APERCU SUR LES TECHNIQUES DE COMPACTAGE		
Tableau (I. 1)	Certains types de compactage dynamique	12
Tableau (I. 2)	comparatif entre vibrant et proctor	19
CHAPITRE III : Investigation Expérimentale		
Tableau III.1	Programmes des Essais pour l'Identification des Matériaux Utilisés	41
Tableau III.2	Les résultats de l'analyse chimique de l'argile étudié	42
Tableau III.3	Résultats récapitulatif de l'analyse granulométrique D'Argile Bouhraoua	43
Tableau III.4	les valeurs de la limite Atterberg	44
Tableau III.5	Résultats de l'essai au bleu à la tâche	44
Tableau III.6	La classification par CaCO ₃ de quelques sols	45
Tableau III.7	Récapitulatif des essais d'identification sur argile Bouhraoua	45
Tableau III.8	Récapitulatif des essais d'identification sur le sable de dune (sebe)	46
Tableau III.9	Classification LCPC de sable utilisée.	48
Tableau III.10	résultats obtenus d'essai de proctor	51
Tableau III.11	valeurs mesurées lors de l'essai C.B.R selon le mode proctor	52
Tableau III.12	Étapes de l'expérience de la table vibrante	53
Tableau III.13	Résultats d'essai de compactage du mélange 70% sable de dune et 30% argile	54

Liste de Figures

Figures	Titles	Pages
CHAPITRE II : PROGRAMME EXPERIMENTAL		
Figure II.1	Résultat de l'essai d'équivalent de sable	28
Figure II.2	Essai au bleu de méthylène	29
Figure II.3	Série de tamis utilisée pour l'analyse granulométrique	31
Figure II.4	Essai de sédiment métrie	32
Figure II.5	Essai de limite de plasticité	34
Figure II.6	Appareil de Proctor	35
Figure II.7	: Appareil de presse CBR	36
Figure II.8	Logiciel de courbe CBR	36
CHAPITRE III : Investigation Expérimentale		
Figure III.1	Site d'extraction de sable	40
Figure III.2	Site d'extraction de argile	41
Figure III.3	Préparation des échantillons	49
Figure III.4	Préparation de mélange d'échantillon	50
Figure III.5	L'essai CBR dans le moule Proctor	51
CHAPITRE IV. Propositions de Mise en œuvre		
Figure IV.1	Stock de matériaux granulaires sur site dans la région de Ghardaïa	64
Figure IV.2	Malaxeur de béton	65
Figure IV.3	Rouleau de compactage dans la région de Ghardaïa	67
Figure IV.4	sac de ciment pour travaux de stabilisation	72
Figure IV.5	Le techniques de la stabilisation par géotextiles	73

Liste de Graphes

Graphe	Titles	Pages
CHAPITRE III : Investigation Expérimentale		
Graphe III.1	Courbe granulométrique d'argile Bouhraoua	42
Graphe III.2	Classification d'argile étudié selon l'abaque de Casagrande	44
Graphe III.3	Courbe granulométrique sable de dune (sebseb)	46
Graphe III.4	Classification des sols fins selon GTR	48
Graphe III.5	Courbe de la masse volumique sèche et humide selon le mode de proctor du mélange	50
Graphe III.6	Résultats de l'essai CBR immédiat (éprouvette compactée selon la méthode Proctor)	52
Graphe III.7	Courbe de la masse volumique sèche et humide selon le mode de vibration du mélange (70 % sable de dune et 30 % Argile)	54
Graphe III.8	Résultats de l'essai CBR immédiat (éprouvette compactée selon la méthode vibration)	55
Graphe III.9	Comparaison entre les résultats des essais de Proctor et les résultats des essaisTable de vibration	55

Liste de Diagramme

Graphe	Titles	Pages
CHAPITRE III :		
Diagramme III.1	Classification LCPC de l'argile utilisée	49

Liste d'abréviations

W	Teneur en eau initiale.
Wopt	Teneur en eau qui correspond à l'optimum Proctor.
γ_d	Densité volumique sèche.
Cc	Coefficient de compressibilité.
PM	Essai Proctor modifié.
WL	Limite de liquidité.
WP Ip	Indice de Plasticité.
LTPS	Laboratoire des travaux publics du sud.
CBR	Californian Bearing Ratio: indice portanc californien.
ICBR imb	Indice CBR imbibe.
ICBR imed	Indice CBR immédiat.
Cu	Coefficient d'uniformité.
Cc	Coefficient de courbure.
γ_d	La densité sèche
γ_h	La densité humide

Introduction

Générale

Introduction Générale

Les matériaux locaux constituent l'un des piliers fondamentaux dans la réalisation des projets d'infrastructures routières en Algérie, car ils offrent des solutions économiques adaptées aux exigences du développement, en plus de leur compatibilité avec les caractéristiques géotechniques des sols et les conditions climatiques locales. Parmi les opérations essentielles liées à la construction des routes, le compactage des sols occupe une étape cruciale : il contribue à améliorer leurs propriétés mécaniques en augmentant la densité sèche, la capacité portante et en réduisant la déformabilité du sol, ce qui assure sa stabilité structurelle à long terme.

Dans la wilaya de Ghardaïa, l'importance du recours aux ressources locales disponibles est particulièrement marquée, notamment les sables dunaires largement répandus dans la région de Sebseb, ainsi que l'argile extraite de Bouhraoua. Cependant, l'utilisation de ces matériaux de manière isolée limite leur efficacité : le sable se caractérise par une forte perméabilité et une faible cohésion, tandis que l'argile présente une plasticité élevée et une grande sensibilité à l'eau, ce qui peut affecter négativement son comportement face à l'humidité ou aux variations climatiques.

La problématique posée est donc la suivante:

Quelle technique de compactage permet d'obtenir la meilleure portance possible pour un mélange local composé de sable de Sebseb et d'argile de Bouhraoua, destiné à la construction routière?

L'objectif principal de ce travail est d'évaluer les performances géotechniques de ce mélange local à travers différentes techniques de compactage, et d'identifier la méthode la plus efficace pour obtenir un matériau adapté à la réalisation de couches de fondation routière. Pour cela, plusieurs paramètres seront analysés, tels que la teneur en eau optimale, la densité sèche maximale, ainsi que l'indice CBR, qui donne une indication sur la portance du sol compacté.

L'objectif final est de produire un matériau local et économique, capable de supporter le trafic routier moyen à fort, avec des performances satisfaisantes en termes de portance et de durabilité.

La démarche suivie repose sur un travail expérimental organisé en plusieurs étapes:

Étude des techniques de compactage adaptées aux sols sableux et argileux.

Caractérisation des matériaux disponibles localement.

Réalisation d'un programme d'essais de compactage en laboratoire.

Analyse des résultats pour déterminer la meilleure méthode.

Proposition d'une méthode de mise en œuvre applicable sur le terrain.

Le contenu de ce mémoire est structuré en quatre chapitres:

Le premier chapitre présente un aperçu des techniques de compactage utilisées en génie civil, en expliquant leur fonctionnement, les équipements employés, et les critères d'efficacité. Il aborde également les paramètres influents comme la nature du sol et le taux d'humidité.

Le deuxième chapitre expose le programme expérimental mis en place. Il détaille les matériaux étudiés, les proportions retenues pour le mélange sable-argile, et les types d'essais qui seront réalisés afin d'évaluer leur comportement.

Le troisième chapitre est consacré à l'investigation expérimentale. Il regroupe les résultats obtenus en laboratoire, que ce soit à travers les essais Proctor (modifié) ou par table vibrante, et propose une analyse comparative des effets de chaque méthode de compactage sur les propriétés mécaniques du mélange.

Le quatrième chapitre présente des propositions de mise en œuvre pratiques pour appliquer les résultats de laboratoire sur le terrain. Il prend en compte les contraintes spécifiques de la région de Ghardaïa (climat sec, sols meubles, logistique) et propose des recommandations pour une mise en œuvre efficace et durable.

À travers cette démarche, nous espérons aboutir à une solution technique simple, économique et adaptée au contexte saharien, permettant de valoriser les matériaux locaux, de garantir une bonne portance des sols compactés, et de contribuer ainsi à la fiabilité et la durabilité des infrastructures routières régionales.

Chapitre I

APERÇU SUR LES TECHNIQUES DE COMPACTAGE

I.1 Introduction :

Le compactage est un processus essentiel en ingénierie civile, utilisé pour augmenter la densité des matériaux tels que le sol et les granulats [1]. Ce processus consiste à réduire les espaces vides entre les particules, ce qui améliore la rigidité et la résistance des matériaux utilisés dans la construction. Cette amélioration rend le compactage indispensable pour la construction de structures telles que des bâtiments, des routes et d'autres infrastructures qui sont vitales pour assurer la durabilité des projets de construction [2].

Les techniques de compactage utilisées, qu'elles soient traditionnelles reposant sur des machines simples ou modernes utilisant des technologies avancées, jouent un rôle majeur dans le succès du processus de compactage [3]. L'efficacité du compactage dépend d'un ensemble diversifié et interconnecté de facteurs [4]. Parmi ces facteurs, les caractéristiques des matériaux utilisés sont un élément crucial, car différents types de sols ou de granulats peuvent réagir de manière différente aux processus de compactage [5]. De plus, le contenu en eau ou le taux d'humidité est un facteur influent, car il affecte la manière dont les particules s'organisent et se réorganisent sous pression [6].

Ce chapitre contient des connaissances générales qu'il est essentiel de connaître pour réaliser les chapitres suivants. Nous y proposerons une vue d'ensemble et détaillée sur une variété de techniques de compactage utilisées actuellement. Nous examinerons les concepts et principes fondamentaux qui sous-tendent ces techniques et expliquerons comment elles peuvent être appliquées de manière pratique dans des projets d'ingénierie civile. En outre, nous analyserons en profondeur les facteurs qui influencent l'efficacité du compactage [7].

I.2 Critères de Compactage :

Le compactage affecte directement le comportement du sol en termes de tassement, de perméabilité et de capacité portante. Il est donc essentiel de définir des critères de compactage clairs pour garantir la qualité des travaux de terrassement et le succès du projet [2].

I.2.1 Importance du compactage :

Les objectifs principaux du compactage sont :

- Réduire les vides d'air entre les grains du sol.

- Accroître la densité sèche.
- Améliorer la résistance au cisaillement du sol.
- Réduire la compressibilité et la perméabilité [2].

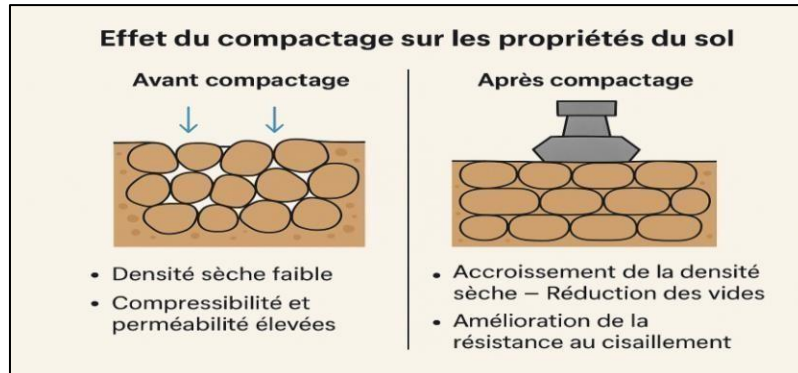


Figure I.1 : Effet du compactage sur les propriétés du sol [2].

I.2.2 Critères fondamentaux du compactage :

I.2.2.1 Densité sèche maximale ($\gamma_d \max$) :

Elle représente la densité la plus élevée qu'un sol peut atteindre à un taux d'humidité donné. Elle est déterminée en laboratoire par les essais Proctor standard et modifié selon les normes ASTM D698 et D1557 [1].

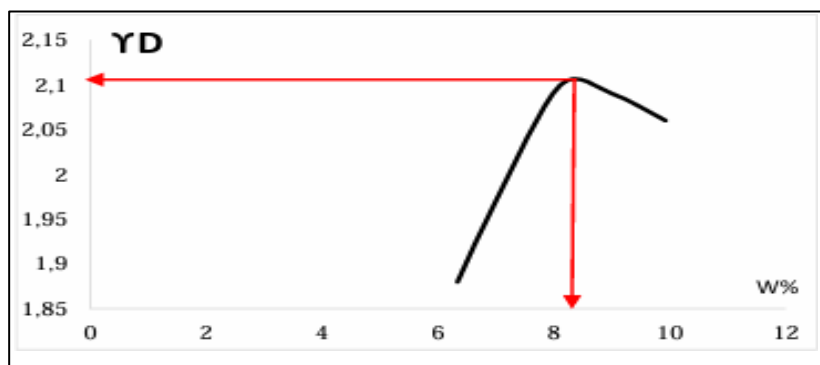


Figure I.2 : courbe de Proctor [9].

I.2.2.2 Teneur en eau optimale (OMC) :

C'est la teneur en eau (w_{opt}) à laquelle un sol atteint sa densité sèche maximale. Un sol trop sec ou trop humide présente une efficacité de compactage réduite.

I.2.2.3 Taux de compactage :

Il s'agit du rapport entre la densité sèche obtenue sur chantier et la densité sèche maximale en laboratoire, exprimé en pourcentage. Dans la plupart des projets, un taux de compactage minimal de 95 % est requis [5].

$$TC\% = (\gamma_d \text{ sur chantier} / \gamma_d \text{ max}) \times$$

TC : Taux de compactage

γ_d sur chantier : densité sur chantier

γ_d max : densité maximale(Proctor)

I.2.2.4 Épaisseur des couches :

Le compactage est réalisé par couches successives de 20 à 30 cm d'épaisseur pour assurer une efficacité optimale. [6]



Figure I.3 : Illustration montrant des couches de sol compactées [6].

I.2.2.5 Type de matériel de compactage :

Le choix de l'équipement est basé sur la granulométrie et la plasticité du sol [7] :

- Rouleaux vibrants : efficaces pour les sols granulaires (sables, graviers).
- Rouleaux à pieds dameurs : adaptés aux sols cohésifs (argiles).
- Compacteurs à pneus : utilisés pour les sols mixtes ou pour homogénéiser la surface.

Le nombre de passes **Np** (allers retours) doit aussi être ajusté en fonction de la résistance du sol et du type de compacteur [7].

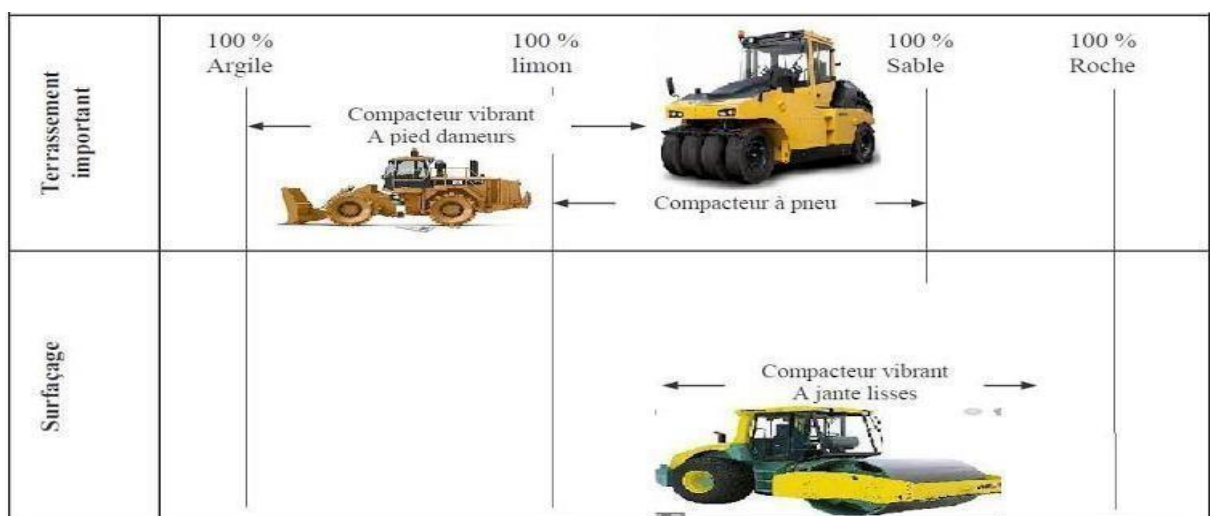


Figure I.4 : Équipements de compactage selon le type de sol [10].

I.3 Compactage sur site :

Le compactage local est une technique utilisée en génie civil pour améliorer les propriétés du sol avant et pendant la construction. Il existe de nombreux types d'équipements utilisés pour le compactage sur site. Malgré leur diversité, il est possible d'identifier certains des facteurs qui influencent principalement l'efficacité de la machine sur un terrain donné [11].

- Facteurs spécifiques aux sols compactés (nature, teneur en eau
- Facteurs qui caractérisent la machine et la séquence de pressage (nombre de passes et vitesse, (Pression de contact, fréquence et intensité des vibrations, etc.)

I.3 Travaux préparatifs au compactage :

Les travaux préparatoires sur chantier constituent une étape essentielle pour augmenter le taux de réussite du compactage. Ces travaux constituent les premières étapes compatibles avec les exigences du site.

Cette section couvre les différentes étapes de base avant de commencer à compacter sur le site.

I.3.1.1 Étude géotechnique préalable :

Avant toute opération de compactage, une étude géotechnique est indispensable. Elle permet de [12] :

- Identifier la nature des sols (argileux, sableux, limoneux, etc.),
- Déterminer leur portance et leur sensibilité à l'eau,
- Choisir le matériel et la méthode de compactage appropriés [12].

I.3.1.2 Débroussaillage et décapage (nettoyage de site) :

Le débroussaillage consiste à enlever la végétation, les racines, les débris organiques, tandis que le décapage vise à éliminer la couche superficielle du sol (souvent peu portante). Ces opérations sont essentielles pour éviter la formation de zones de faiblesse dans la couche à compacter [17] .



Figure I.5 : Travaux de nettoyage sur chantier [19].

I.3.1.3 Nivellement et mise en forme :

Le nivellement du sol est réalisé afin de garantir une surface régulière et conforme au profil du projet. Cela permet une répartition homogène de la charge appliquée par les engins de compactage [13].



Figure I.6 : Nivellement du sol sur le chantier. [20]

I.3.1.4 Humidification ou dessèchement du sol :

L'humidité optimale est un paramètre déterminant pour le compactage. Si le sol est trop sec, il faut l'humidifier. S'il est trop humide, un temps de séchage est requis, ou des techniques telles que le chaulage peuvent être utilisées [14].



Figure I.7: Un appareil utilisé pour mesurer l'humidité du sol [21].

I.3.1.5 Signalisation et sécurité du chantier :

La préparation inclut aussi la mise en place de la signalisation nécessaire et des dispositifs de sécurité pour protéger les ouvriers et limiter l'accès aux zones dangereuses [18].

I.3.2 les techniques de compactage sur site :

Les techniques de compactage sur site sont nombreuses et variées. Dans ce Partie, nous allons nous intéresser à certaines d'entre elles.

I.3.2.1 compactage au rouleau :

I.3.2.1.1 Définition :

Le compactage au rouleau consiste à soumettre les matériaux à des passages répétés de cylindres lisses, à pieds dameurs ou vibrants, afin de réduire les vides et d'augmenter la densité [22].

I.3.2.1.2 les type de rouleau utilisés dans le compactage :

I.3.2.1.2.1 rouleaux lisse :

Ce type est le plus utilisé car il convient à la plupart des types de sols, à l'exception de ceux contenant de grosses pierres. La roue cylindrique de cette machine couvre entièrement le sol en dessous, comme la montre (Figure 1.8), avec une pression allant jusqu'à 400 kn/m^2 . Il peut être approprié que les couches de compactage ne soient pas trop épaisses lors de l'utilisation de cette machine afin d'obtenir un compactage du sol à haute densité [23].



Figure I.8: Compacteur à rouleau lisse [23]

I.3.2.1.2.2 Rouleaux pneumatique :

(La figure 1.9) montre un engin lourd monté sur quatre roues pour couvrir environ 80 % du sol. Ces roues génèrent une pression pouvant atteindre 400 kn/m^2 , et ce type d'équipement peut être utilisé sur des sols cohésifs et non cohésifs. Le rouleau pneumatique avec des pneus en caoutchouc, au lieu de pneus en acier, a des pneus montés par paires, ce qui leur permet de s'enfoncer dans les zones molles, formant ainsi une barrière contre le rouleau en acier. Différents types de pneus sont utilisés dans le rouleau pneumatique. La pression dépend de la conception du pneu. Il existe un espace entre les pneus avant et arrière, et cet espace est rempli par le mouvement des pneus, ce qui permet d'obtenir une pression homogène et d'éviter de laisser des traces. Le inconvénient de cette méthode est qu'elle nécessite des pistes rapprochées pour terminer efficacement le compactage [23].



Figure I.9: Compacteur à **Rouleaux** pneumatique [23]

I.3.2.1.2.3 Rouleaux a pieds de mouton :

Les Rouleaux de ce type contiennent des protubérances sur leurs roues ressemblant à des pattes de mouton, comme illustré dans la (figure 1.10). Ces protubérances couvrent environ 12 % du sol et génèrent une pression sur le sol variant de 1400 à 7000. Ce type est utilisé pour les sols cohésifs tels que l'argile et le limon, et son utilisation nécessite des passages répétés afin de combler les espaces laissés par les protubérances sur la couche de sol [23] .

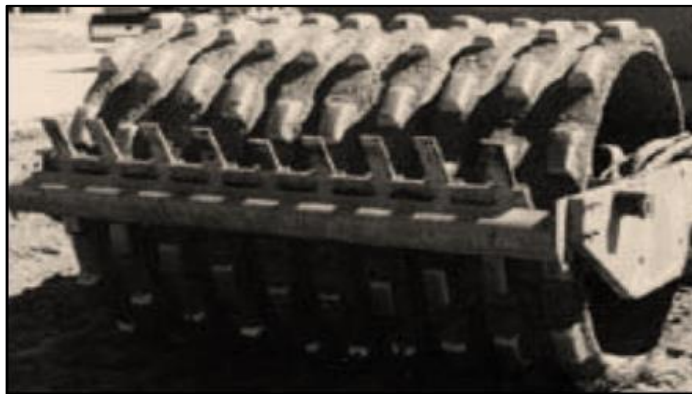


Figure I.10: Rouleaux a pieds de mouton [23]

I.3.2.1.2.4 Rouleaux vibrantes :

Ce type d'équipement est utilisé pour le compactage des sols non cohésifs tels que le gravier et le sable. Il peut s'agir d'un cylindre à surface lisse équipé d'un vibreur horizontal, comme illustré dans la (figure 1.11). [23]



Figure I.11: Compacteur à Rouleaux vibrantes [23]

I.3.2.1.3 Comment effectuer le compactage au rouleau :

Le compactage commence par le passage du rouleau selon des trajectoires parallèles, en débutant des bords vers le centre afin d'éviter le déplacement du sol. Il est recommandé d'effectuer plusieurs passages (généralement entre 6 et 12), en variant le sens de déplacement et en assurant un léger chevauchement entre les trajectoires pour améliorer l'uniformité. L'efficacité du compactage est contrôlée à l'aide de tests comme la densité sur site ou l'essai Proctor, afin de vérifier l'atteinte de la densité requise, et l'opération est répétée si nécessaire. Il est préférable d'éviter le compactage par mauvais temps, et la vitesse de déplacement du rouleau doit rester régulière et ne pas dépasser 5 km/h afin de garantir un compactage efficace et de qualité[23].

I.3.2.1.4 Les défis du compactage au rouleau :

Le compactage au rouleau présente plusieurs défis qui peuvent affecter son efficacité. Parmi les plus importants figurent le choix inapproprié du type de rouleau en fonction de la nature du sol, ainsi que le non-contrôle du taux d'humidité à un niveau optimal, ce qui rend difficile l'atteinte de la densité requise. De plus, un nombre de passes insuffisant ou excessif peut entraîner un compactage non uniforme ou des problèmes structurels ultérieurs. Les conditions climatiques défavorables, telles que les pluies ou les températures élevées, constituent également des obstacles au bon déroulement du compactage. À cela s'ajoute la difficulté de traiter les sols riches en matières organiques ou contenant de l'argile gonflante sans traitement préalable.

I.3.2.2 Autres techniques de compactage :

I.3.2.2.1 compactage dynamique :

Le compactage dynamique est une technique d'amélioration des sols appliquée par l'application d'énergie d'impact à l'aide de masses lourdes (jusqu'à 100 tonnes) pour augmenter la densité des sols meubles, tels que les sols sablonneux dans les régions désertiques algériennes [24]. et les sols argileux non cohésifs dans les hauts plateaux [25]. Ses types incluent : (traditionnel, Contrôlé, Maillé / optimal, impact rapide avec faibles vibrations. et haute énergie pour l'amélioration des profondeurs jusqu'à 15 mètres) [27]. Cette technique a été utilisée dans des projets algériens tels que les autoroutes (ligne Est-Ouest) les barrages (comme Kouariat Abdelah) , et l'extension de l'aéroport Houari Boumediene [28] Malgré ses avantages (haute efficacité, faible coût) ,elle présente des défis tels que les vibrations dans les zones urbaines et la limitation de profondeur[26] . Les études algériennes soulignent la nécessité de l'adapter aux caractéristiques géotechniques locales [29].

Tableau I.1: Certains types de compactage dynamique [27] .

Type	Description
Traditionnel	Masse métallique (10-40 tonnes) lâchée d'une hauteur de 15 à 30 mètres.
Compactage rapide (RIC)	Énergie répétée de faible intensité avec une fréquence élevée (40-60 coups/minute).
Haute énergie	Masses plus lourdes (jusqu'à 100 tonnes) et hauteurs plus grandes (40 m) pour un impact plus profond (15 m).
Contrôlé	Utilisation de capteurs pour ajuster l'énergie en fonction de la réaction du sol.
Maillé / optimal	Coups organisés selon un schéma géométrique (grille ou triangles).

I.3.2.2.2 Compactage par explosion :

Implique l'utilisation d'explosifs enterrés pour générer des ondes de choc qui réorganisent les particules du sol [30].

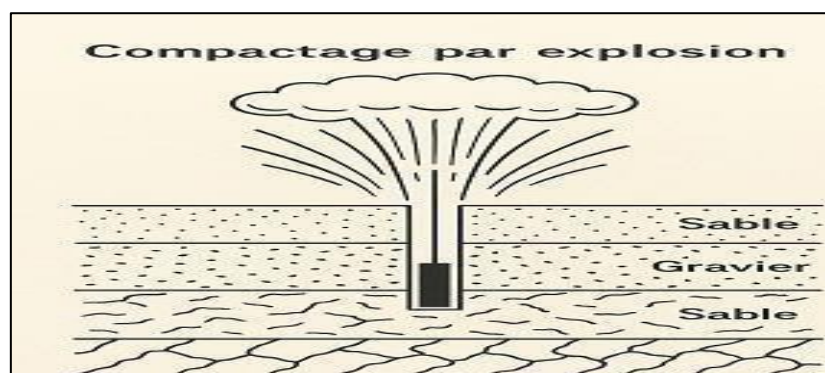


Figure I.12: Schéma du procédé de compactage par explosion. [30].

I.3.2.2.3 Compacteur électrique :

Technique utilisant un courant électrique pour extraire l'eau du sol argileux et améliorer sa cohésion [31].



Figure I.13: Compacteur électrique en action [31] .

I.3.2.2.4 Compactage par injection :

Consiste à injecter des matériaux comme du ciment.... dans le sol pour combler les vides et le renforcer [32].

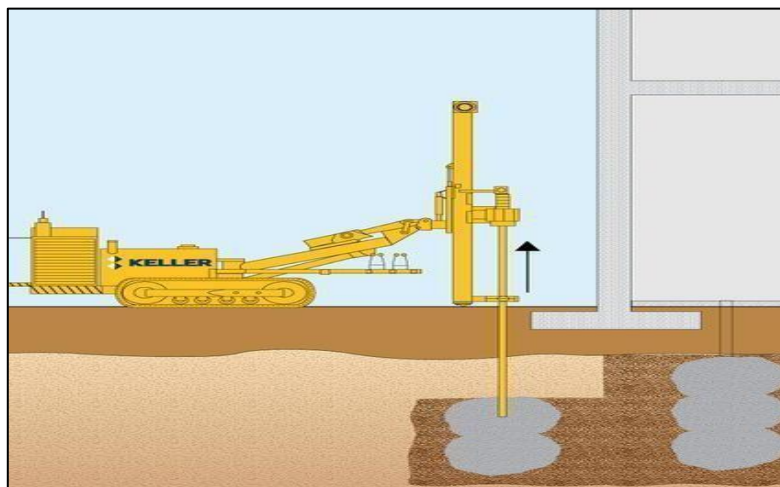


Figure I.14: technique de compactage par injection [32] .

I.3.2.2.5 Compactage de briques :

Le compactage des briques consiste à comprimer un mélange de sol (comme l'argile et le sable) afin de réduire les vides et d'augmenter la densité, dans le but d'améliorer la résistance et la qualité des briques. Cette technique est utilisée pour produire des briques comprimées ou stabilisées [33].

I.4 techniques des compactages au laboratoire :

Les techniques de compactage de sol en laboratoire sont des processus essentiels dans le domaine de l'ingénierie géotechnique. Elles visent à déterminer les propriétés physiques du sol telles que la densité sèche maximale et la teneur en eau optimale. Il existe de nombreuses techniques utilisées dans le laboratoire, parmi lesquelles méthode Proctor, méthode vibratoire...etc. Ces techniques aident à déterminer les conditions de pression idéales sur le site [34].

I.4.1 méthodes Proctor (Norme NF P 94-093). :

L'essai Proctor est l'un des essais géotechniques les plus importants en génie civil. Il est utilisé pour déterminer la teneur en eau optimale (**Wopt**) et la densité sèche maximale (**γd max**) d'un sol. Cet essai a été développé pour la première fois en 1933 par l'ingénieur américain Ralph Proctor, et est depuis devenu une référence standard pour l'étude des caractéristiques des sols sous l'effet de l'énergie de compactage appliquée. Il s'applique aux sols contenant des particules d'un diamètre inférieur à 20 mm, et existe sous deux formes : le Proctor normal et le Proctor modifié [35]. Dans le contexte algérien, cet essai est largement adopté dans les études et recherches pour l'évaluation et l'amélioration des propriétés des sols locaux.

I.4.1.1 Types des essais Proctor :

Il existe deux types principaux de l'essai Proctor, utilisés en fonction de la nature du projet et du type de sol [35].

I.4.1.1.1 Essai Proctor normal (Norme NF P 94-093).:

Réalisé à l'aide d'un marteau de 2,490 kg, tombant d'une hauteur de 305 mm sur 3 couches de sol. Il est généralement utilisé dans les projets nécessitant un compactage modéré, tels que les remblais généraux ou les routes secondaires [35].

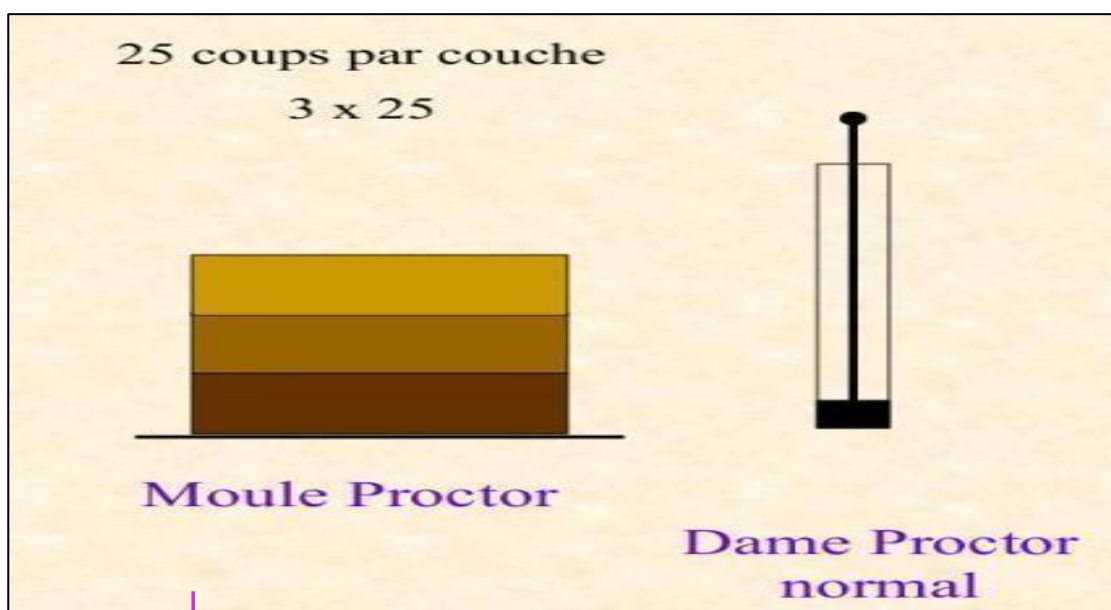


Figure I.15: Proctor normal [36] .

I.4.1.1.2 Essai Proctor modifié (Norme NF P 94-093). :

Effectué à l'aide d'un marteau de 4,538 kg, tombant d'une hauteur de 457 mm sur 5 couches. Ce type est utilisé dans les projets exigeant un compactage plus important, comme les aéroports ou les autoroutes, car il applique une énergie de compactage plus élevée au sol [35].

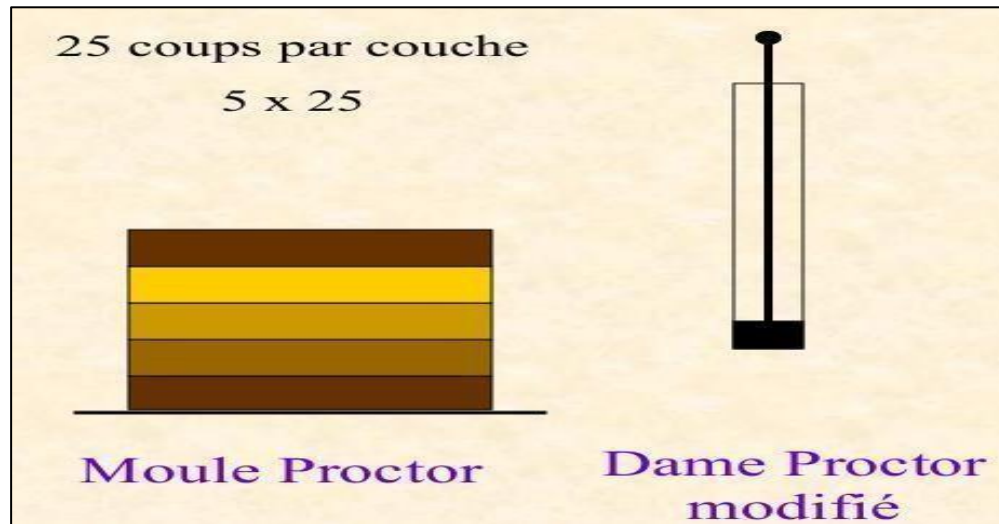


Figure I.16: Proctor modifié [36].

I.4.1.2 Étapes de réalisation de l'essai Proctor :

- 1) Prélèvement de l'échantillon : prélever une quantité de sol comprise entre 15 et 100 kg, selon la granulométrie du sol [35].
- 2) Préparation de l'échantillon :
 - Séchage partiel ou complet du sol.
 - Tamisage si le sol contient des particules supérieures à 20 mm, en veillant à ce que leur proportion ne dépasse pas 30 % du poids total.
- 3) Subdivision de l'échantillon : diviser le sol en cinq parts, chacune étant humidifiée avec une teneur en eau différente afin d'obtenir plusieurs niveaux d'humidité [36].
- 4) Compactage
- 5) Finition : mise à niveau de la surface, retrait du surplus de sol, puis pesée du moule rempli.
- 6) Détermination de l'humidité : un échantillon est prélevé pour déterminer la teneur en eau réelle (w).
- 7) Calcul de la masse volumique sèche (γ_d) pour chaque essai, puis tracé de la courbe $\gamma_d = f(w)$ afin d'identifier :

La densité sèche maximale ($\gamma_d \text{ max}$)

La teneur en eau optimale

$$\gamma_d = \frac{W}{V * (1 + w)}$$

γ_d : densité sèche

W : Poids du sol

V : Taille du modèle

w : Humidité

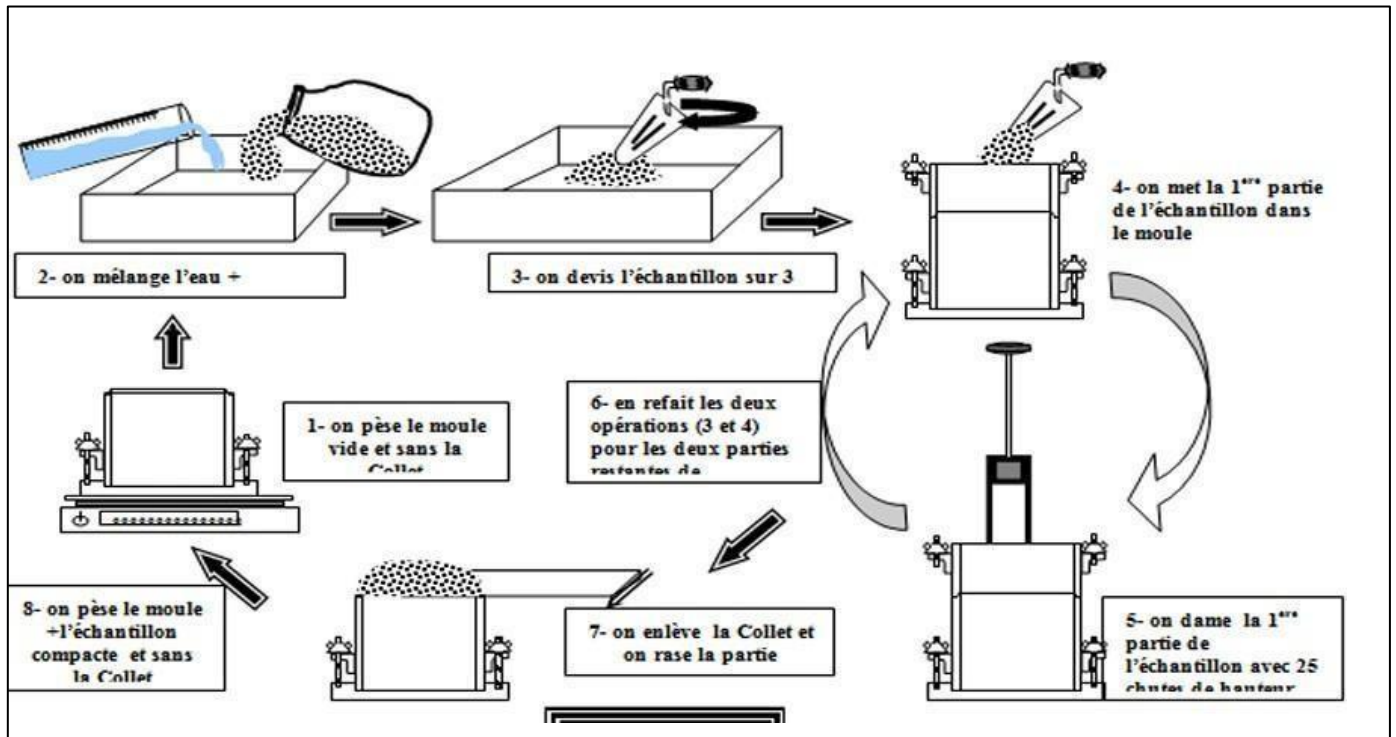


Figure I.17: Essai Proctor. [37]

I.4.1.3 en Algérie méthode Proctor :

L'introduction de cette méthode en Algérie présente un certain nombre de défis spécifiques, en lien avec les conditions géologiques, climatiques, techniques et humaines propres au contexte local :

1. Diversité géologique et variabilité des sols: La grande variabilité des types de sols en Algérie complique l'application uniforme de l'essai Proctor [38].
2. Spécificités techniques et manque d'équipements adaptés : dans certaines régions, notamment rurales et sahariennes, l'absence de matériel moderne dans les laboratoires géotechniques remet en question la fiabilité des essais Proctor [39] .
3. Carence en formation et compétences techniques : le manque de formation spécialisée chez certains techniciens conduit à des erreurs dans la réalisation des essais ou l'interprétation des résultats, impactant ainsi la durabilité des ouvrages [40].

4. Conditions climatiques extrêmes : les hautes températures et l'aridité, particulièrement dans le Sud, compliquent le maintien des conditions normalisées de l'essai, notamment le taux d'humidité [40] .
5. Contraintes de temps : sous pression des délais, certaines entreprises ne consacrent pas assez de temps à la réalisation complète de l'essai Proctor, utilisant ainsi des valeurs théoriques ou approximatives [41] .

I.4.1.4 relation entre l'essai Proctor et le CBR :

La relation entre le test Proctor et le test CBR est essentielle pour évaluer les propriétés du sol et son utilisation dans les projets de construction de routes et d'infrastructures. Le test Proctor vise à déterminer l'humidité optimale et la densité sèche maximale du sol en mesurant l'effet du compactage sur la densité du sol à différents niveaux d'humidité, ce qui permet de déterminer les meilleures conditions de compactage du sol sur site [42]. le test CBR est utilisé pour mesurer la capacité du sol à résister aux charges sous pression verticale, en fonction de la résistance du sol à l'enfoncement d'un piston standard [43].

La relation entre les deux tests réside dans le fait que les résultats du test Proctor, qui déterminent la densité optimale et le taux d'humidité, influencent directement les résultats du test CBR. Plus le sol est compacté efficacement à l'humidité optimale, plus sa résistance à la pression augmente et les résultats du test CBR s'améliorent. Ainsi, ces deux tests se complètent pour déterminer la qualité du sol en termes de capacité de charge, ce qui améliore la conception des couches de revêtement routier et garantit leur durabilité [42].

I.4.2 Méthode vibratoire :

La méthode de compactage par vibration en laboratoire est spécifiquement destinée aux sols granulaires tels que le sable et le gravier. Elle se distingue des méthodes de compactage traditionnelles, comme la méthode Proctor, qui est plus adaptée aux sols fins tels que l'argile et le limon. Cette technique vise à reproduire les conditions de compactage sur site et à atteindre des densités maximales à l'aide de vibrations [44].

Le principe de cette méthode repose sur l'application de vibrations mécaniques qui réduisent les frottements entre les grains, permettant ainsi leur réarrangement et leur compactage sous l'effet de la gravité [44].

I.4.2.1 Le matériel utilisé:

1) le table vibrante :

Une charge constante est appliquée à l'échantillon placé dans le moule, tandis que des vibrations verticales continues sont exercées par le bas [44].



Figure I.18: Compactage à table vibrante [44] .

2) Le marteau vibrant :

Un marteau vibrant est placé sur l'échantillon contenu dans le moule, et des forces vibratoires lui sont appliquées pendant une durée déterminée. Cette méthode est considérée comme plus efficace car elle simule les conditions réelles sur le terrain [44] .



Figure I.19: Compactage à marteau vibrant [44].

I.4.2.2 Étapes de réalisation de l'essai :

- 1) Le sol est séché et préparé par tamisage.
- 2) L'échantillon est humidifié avec un pourcentage d'eau approprié.
- 3) L'échantillon est placé dans le moule en plusieurs couches.
- 4) L'appareil vibrant est activé à une fréquence appropriée (entre 50 et 60 Hz) pendant 2 à 5 minutes.
- 5) Le poids sec de l'échantillon est mesuré afin de calculer la densité sèche [44].

I.4.2.3 les facteurs principaux influençant l'essai :

- 1) Fréquence et amplitude des vibrations
- 2) Teneur en eau
- 3) Durée des vibrations [44].

I.4.2.4 les Erreurs courantes :

- 1) Utilisation d'une fréquence inappropriée
- 2) Humidification excessive ou insuffisante
- 3) Compactage excessif entraînant une redistribution excessive des granulats [44].

I.4.2.5 comparatifs entre le compactage vibrant et l'essai Proctor :

Tableau I.2: comparatif entre vibrant et proctor [44].

Critère	Compactage Vibrant	Essai Proctor
Type de sol	Granulaires (sables/graviers)	Tous types de sols (argile, limon, etc.)
Énergie appliquée	Vibrations mécaniques	Coups de masse (marteau)
Densité obtenue	Plus élevée pour les sols granulaires	Dépend de la teneur en eau

I.4.3 autres techniques au laboratoire :

Il existe d'autres méthodes de compactage utilisées en laboratoire :

I.4.3.1 Le Compactage Giratoire :

Est une technique de laboratoire utilisée pour compacter des mélanges bitumineux dans des conditions contrôlées, en appliquant une pression verticale et un mouvement de rotation pour simuler les processus de compactage SUR chantier. L'objectif principal est de déterminer la densité relative et les caractéristiques mécaniques du mélange, tout en préservant sa structure interne [45].



Figure I.20: machine de Compactage Giratoire [45] .

I.4.3.2 Compactage statique :

Le compactage statique est une méthode de laboratoire où un échantillon de sol est comprimé dans un moule cylindrique à l'aide d'une machine de compression, jusqu'à atteindre la densité sèche maximale. Cependant, cette méthode ne reproduit pas les conditions de compactage sur le terrain, ce qui peut entraîner une orientation différente des particules. Une étude menée par Johnson et Sallberg (1962) a identifié plusieurs facteurs influençant les résultats de cet essai, notamment [44] :

- 1) La nécessité de placer soigneusement le sol dans le moule pour éviter la ségrégation des agrégats granulaires [44] .
- 2) L'application prolongée de la charge statique favorise l'expulsion de l'eau, ce qui peut conduire à des densités sèches irréalistes à des teneurs en eau non représentatives des conditions in situ [44].

I.4.3.3 Compactage par pétrissage :

Inspiré par l'action de malaxage produite par le rouleau à pieds de mouton dans le compactage in-situ, l'essai en laboratoire de malaxage de compactage a été développé. Semblable au rouleau à pieds de mouton dans le domaine, les efforts de compactage de laboratoire sur l'échantillon sont graduellement accumulés alors graduellement libérés. Le développement d'un compacteur de malaxage automatique par Dodd et Dunlop (1971) a prouvé que cette méthode n'est pas appropriée au compactage des matériaux granulaires tels que le sable. Cependant, des valeurs de densités sèches maximales (densité double) ont été réalisées aux teneurs en eau très basses par le compactage vibratoire [44] .

I.5 CONCLUSION :

le rôle fondamental des techniques de compactage en génie civil, lesquelles constituent un levier essentiel pour l'amélioration des propriétés mécaniques des sols et la garantie de la stabilité des ouvrages. Les principes théoriques, les paramètres influents ainsi que les principales méthodes de compactage, tant en laboratoire que sur le terrain, ont été présentés et analysés.

L'étude s'est concentrée sur l'importance de facteurs déterminants tels que la nature du sol, la teneur en eau et le type d'énergie de compactage appliquée, qui conditionnent directement la densité obtenue et les performances globales du matériau.

L'ensemble de ces éléments offre une base scientifique et technique solide pour une meilleure compréhension du comportement des sols compactés et pour l'optimisation des pratiques d'exécution dans les projets géotechniques et d'infrastructure.

Chapitre II

Programme Expérimental

II.1 Introduction :

Dans ce chapitre, nous présentons le programme expérimental mis en place dans le cadre de notre étude. L'objectif principal est de caractériser le comportement mécanique d'un sol composite constitué d'un mélange sable/argile, compacté selon différentes méthodes. Ce programme vise à évaluer l'influence de la composition granulométrique et des conditions de compactage sur la densité sèche maximale, la teneur en eau optimale ainsi que d'autres propriétés géotechniques essentielles comme la portance.

II.2 Matériaux Utilisés :

II.2.1 L'argile :

Les argiles sont des roches sédimentaires composées de grains fins, d'une taille inférieure à 0,005 mm, contenant au moins 50 % de silicate d'alumine. Elles ont la capacité d'absorber l'eau et de former une pâte imperméable, communément appelée terre glaise, qui peut être colorée par des oxydes de fer, donnant des teintes d'ocre, de rouge ou de vert [46].

Certaines argiles, notamment celles de la famille des Montmorillonites, ont la particularité de gonfler lorsqu'elles absorbent de l'eau, puis de se rétracter et de se fissurer en surface en cas de sécheresse, parfois jusqu'à une profondeur de 2 à 4 mètres. De plus, sous l'effet d'une charge, telle que celle exercée par une construction, une partie de l'eau absorbée entre les grains d'argile est expulsée, entraînant un tassement notable du sol. En général, les argiles constituent une base acceptable à médiocre lorsqu'elles sont recouvertes par d'autres couches de terrain. Cependant, elles peuvent présenter des risques lorsqu'elles affleurent à la surface, en raison de leur instabilité, qui se traduit par des variations de volume et un mouvement lent dans les terrains en pente [46].

Les différentes expérimentations menées dans cette étude se sont concentrées sur l'utilisation d'argile plastique à séchage rapide et à faible perméabilité. Elle a une couleur gris foncé à l'état humide. Elle a été extraite de la région de Bou hraoua, dans la wilaya de Ghardaïa.



Figure II.1 : Argile de la région de Ghardaïa

II.2.1.1 Formation des argiles :

Les sols argileux se forment par un processus lent d'altération sous l'action du climat, suivi de phénomènes d'érosion, de transport et de sédimentation. 90 % des minéraux argileux sont d'origine détritique. L'altération peut être physique (désagrégation des minéraux primaires) ou chimique (par transformation des minéraux). Certains minéraux argileux précipitent à partir d'une solution (minéraux néoformés) [47] .

II.2.1.3 Les principe groupe d'argile :

A partir des deux structures de base octaédrique et tétraédrique, plusieurs familles d'argiles sont définies : l'illite, la kaolinite, la montmorillonite, le chlorite. Dans ce qui suit, nous allons décrire trois argiles les plus connues [48] .

a. structures de la montmorillonite:

Le terme de montmorillonite a été proposé par Dameur et Sacvebat en 1874 d'après le nom de Montmorillon (Vienne en France). Ici deux couches de tétraèdres succèdent à une couche octaédrique. La montmorillonite montre une succession de couches d'atomes d'oxygène, de silicium, d'oxygène et d'hydroxyle, de silicium et d'oxygène [48] .

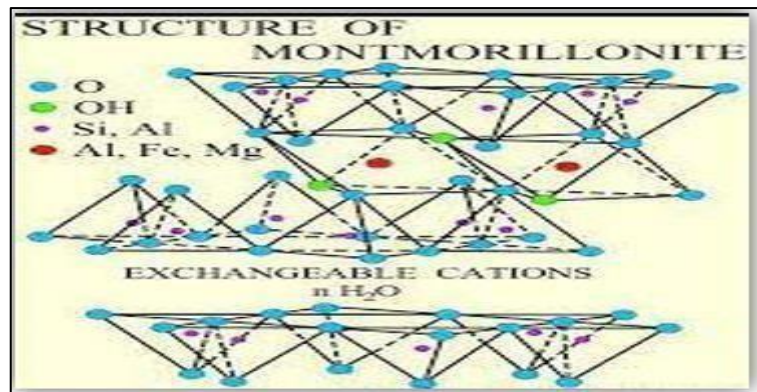


Figure II.2 : Schéma de la particule de montmorillonite [47] .

b. Structures de la kaolinite :

Dans la kaolinite les couches d'octaèdres et les couches de tétraèdres sont parallèles et s'intercalent de manière à ce que les atomes supérieurs et inférieurs de chacune des couches appartiennent à un même plan [48] .

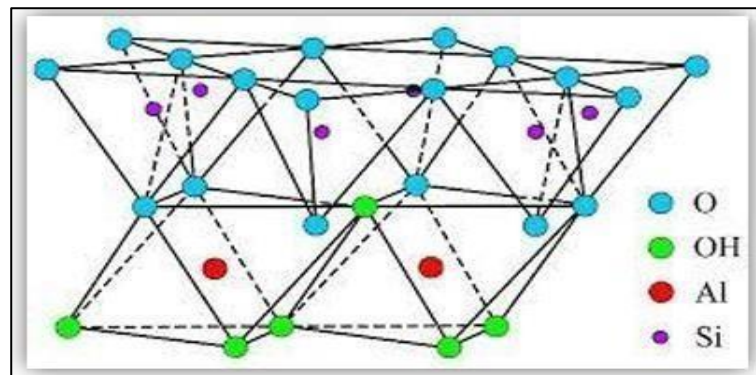


Figure II.3 : Schéma de la particule de kaolinite [47] .

c. Structure d'illite :

La structure d'illite ressemble à celle de la montmorillonite, la différence provient du fait que l'aluminium remplace à 20 % le silicium dans les tétraèdres et que les atomes de potassium, venant rétablir l'équilibre des charges rompues par le remplacement, assurent la liaison des couches tétraédriques et octaédriques. Cette liaison est suffisante pour empêcher l'eau de s'insérer à l'inter couche et l'illite n'est donc pas une argile très gonflante [48].

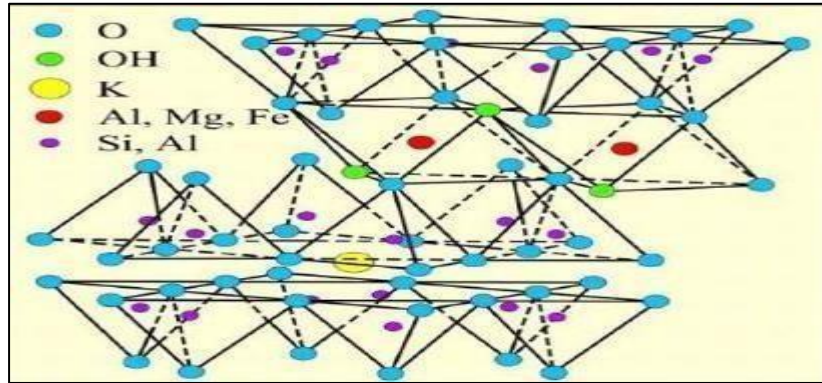


Figure II.4 : Schéma de la structure de l'illite [47] .

II.2.2 Le Sable:

Le Sahara est constituée d'environ 40 % de montagnes désertiques, 15 % de plaines désertiques et 30 % de dunes de sable, le reste étant constitué de sebkhas, de chotts [49].

Les sables, que l'on trouve dans les dunes mouvantes, sont composés de particules siliceuses pratiquement de même taille et de petites dimensions. Ces sables se trouvent dans plusieurs régions du désert accumulés sous forme de dunes mouvantes de hauteur très variable et occupent de vastes territoires dans le sud algérien. La vitesse et l'intensité des vents sont les deux facteurs responsables du triage granulaire de ces sables, de leur distance de transport et de leur mode d'accumulation [49].

Les différentes expériences menées dans cette étude se sont concentrées sur l'utilisation de sable de dunes lavé et séché, non plastique, possédant une bonne perméabilité. Ce sable a été extrait de la région de Sebseb, dans la wilaya de Ghardaïa.



Figure II.5 : Sable des dunes dans la région de Ghardaïa [49].

II.2.2.1 Les formes de sable de dune :

Il existe trois formes :

- La forme la plus commune sur la Terre (et sur Mars) des dunes est celle en demi-lune, aussi appelée transversale ou barkhane en forme de croissant. Les collines en demi-lune sont, généralement, plus larges que courtes. Elle naît là où l'apport de sable est faible et sous des vents unidirectionnels.
- La dune parabolique est en forme de U. Elles sont typiques des déserts côtiers. La plus longue dune en parabole connue mesure 12 kilomètres. Ce type de dune se forme quand, aux extrémités d'une formation sableuse, commence à apparaître de la végétation qui en arrête la progression, tandis que la partie centrale continue à avancer. Elles se forment quand le vent ne souffle que dans une seule direction dominante.
- Les siouf ou SIF, dunes en forme de sabre, sont des ondulations longitudinales s'amincissant vers une extrémité [47].

II.2.2.2 Types de sable de dune :

a) Les avant-dunes (fore dune pour les anglophones) :

Les avant-dunes sont des formations sableuses parallèles au trait de côte, partiellement fixées par des plantes pionnières telles que les oyats, et intégrées au système sédimentaire côtier, avec lequel elles échangent activement du sable. Elles se distinguent des anciennes dunes arrière en cours d'érosion ou des dunes formées par un apport éolien continental dans des secteurs où une avant-dune active ne peut se développer. Dans des pays comme l'Espagne et la Tunisie, les avant-dunes sont systématiquement intégrées au domaine public maritime, ce qui facilite leur protection. Leur formation résulte de la fixation du sable en haut de plage par une végétation adaptée aux contraintes environnementales littorales [47].

b) Les falaises dunaires (dune Cliff pour les anglophones) :

N'est pas une vraie dune mais un profil résultant de l'érosion marine d'une dune ancienne fixée par une pelouse ou un boisement qui ont été à l'origine de la formation d'une couche d'humus ou de sol sableux [47].

c) Les dunes perchées (Cliff-top dune pour les anglophones) :

Qui apparaissent au sommet d'une falaise vive ; alimentée en sable par le vent à partir de l'estran, voire à partir du profil de pente, quand il s'agit d'une falaise Dunaire [47].

d) Les cordons dunaires artificiels :

Qui sont construits de main d'homme, généralement comme élément de protection contre la mer ou d'une zone cultivée et/ou construite. Ils nécessitent un entretien permanent, sans lequel ils se désintègrent en quelques décennies. Certains cordons sont semi-naturels (ex : avant-dunes plus ou moins dégradées rectifiées par des engins et fixées par des oyats à Sangatte dans le nord de la France) [47].

II.2.3 combinaisons de sable et d'argile :

Le présent travail s'appuie sur les résultats obtenus par Mme Azzouz F.Z. (2015), qui ont montré que la composition optimale d'un mélange de **70 % de sable de dune et 30 % d'argile** permettait d'obtenir de bonnes performances géotechniques. En se basant sur cette formulation, nous avons réalisé une série d'essais de compactage selon deux méthodes distinctes — le Proctor modifié et le compactage par vibration— afin de comparer leur influence sur la densité sèche et la teneur en eau optimale. Des essais ****CBR**** ont également été effectués sur les échantillons compactés pour évaluer la portance du mélange et confirmer l'efficacité de cette proportion dans les applications de remblais et de fondations.

Voici plusieurs ****titres alternatifs plus simples et clairs**** que tu peux utiliser à la place de *« Planning des Essais à Effectuer »*, selon le style de ton mémoire :

II.3 Planning des Essais à Effectuer :

Du point de vue géotechnique, il est nécessaire de réaliser les essais préliminaires qui sont d'une importance vitale. En plus de la détermination des caractéristiques physiques, mécaniques et chimiques des sols testés, ils permettent d'identifier les états des sols. Les différents essais effectués dans ce travail sont les suivants :

- Équivalent de sable.
- teneur en CaCO₃
- essai au bleu de méthylène
- Analyse granulométrique
- Limites d'Atterberg
- Essai Proctor (normal & modifié)
- Essai de perméabilité
- Essai CBR
- table vibrante
-

II.3.1 Équivalent de sable (NFP 18-598) :

L'essai est réalisé selon la norme NFP 18-598. Il consiste à séparer, dans une éprouvette, au moyen d'une solution lavant[46].

L'équivalent de sable n'est intéressant que pour caractériser les sols sableux contenant très peu de particules fines [46].

Cet équivalent désigné par « ES » varie de 10 à 100%. Le sable de dune étudiée est propre à pur.



Figure II.6 : machine d'agitation pour Equivalent de sable [47] .



Figure II .1: Résultat de l'essai d'équivalent de sable

II.3.2 teneur en CaCO_3 :

L'essai consiste à déterminer le volume de gaz carbonique dégagé après attaque par l'acide chlorhydrique d'un demi-gramme de matériaux sec. [46] :

$$\text{CaCO}_3 (\%) = \frac{\text{volume du CO}_2 \text{ dégagé par 0,5g d'échantillon}}{\text{volume du CO}_2 \text{ dégagé par 0,5g de CaCO}_3 \text{ pur}}$$

Figure II .7 : Loi de CaCO_3 [47] .

II.3.3 Essai au bleu de méthylène (Norme NF 94-068) :

L'essai consiste à mesurer par dosage la quantité de bleu de méthylène pouvant être adsorbée par le matériau mis en suspension dans l'eau. Cette quantité est rapportée par proportionnalité directe à la fraction 0/50 mm de sol. la valeur de bleu du sol est directement liée à la surface spécifique des particules constituant le sol ou matériau rocheux [46].

Le dosage s'effectue en ajoutant successivement différentes quantités de bleu de méthylène et en contrôlant l'adsorption après chaque ajout. Pour ce faire, on prélève une goutte de la suspension que l'on dépose sur un papier filtre, ce qui provoque la création d'une tache [46].

L'adsorption maximale est atteinte lorsqu'une auréole bleu clair persistante apparait à la périphérie de la tache [46].



Figure II.2 : Essai au bleu de méthylène.

- **Mode opératoire :**

Cet essai s'effectue sur la fraction granulométrique 0/5mm. Ce sont principalement les éléments inférieurs à 2mm qui contiennent la fraction argileuse, cette fraction donne l'essentiel de la réaction au bleu de méthylène et donc la quantifie la sensibilité du sol à l'eau. On prélève 30g de fraction(0/5mm) sèche que l'on met à tremper dans 200ml d'eau déminéralisée. Attention le mélange est maintenu à l'aide de l'agitateur à ailette [46].

Ce test consiste à injecter successivement des dosages précis de bleu de méthylène jusqu'à avoir saturation des particules d'argiles L'avantage avec ce test est que l'instant de cette saturation peut être répété. Pour ce faire, on prélève une goutte de liquide dans le bécher contenant le sol imbibé (mouillé) de bleu, cette goutte est à l'aide de la baguette de verre déposée sur le papier filtre [46].

On obtient un dépôt de diamètre compris entre 8 et 12 mm possibles :

- La goutte centrale en bleue est cerclée d'une zone incolore avec ce résultat le test est négatif.
- La goutte centrale bleue est cerclée d'une zone teintée de bleu plus claire, avec ce résultat, le test est positif.

Pour la lecture du résultat on procède de la manière suivante :

1. ajout de (5 cm³) de bleu de méthylène première phase : addition de bleu de méthylène par grossier (5 cm³) suivi du test de la tâche.
2. teste immédiat de la tâche : si test négatif, retour en 1, si le test positif, faire le 3
3. Ajout de (2 cm³) de bleu de méthylène [46].
Deuxième phase : au premier test immédiat positif en ajoute de bleu par pas fins (2 cm³) suivi du test de la tâche.
4. : test immédiat de la tâche : si le test négatif retour en 3 si le test positif, aller à la 5ème étape.
5. 5 : effectuer (5 fois) la confirmation de test toutes les minutes pendant 5min : si le négatif retour en 3, s'il est positif, fin du dosage [46].

Une fois le test effectué on exploite les résultats :

Tel que :

n : Volume (ml) de solution de bleu utilisé jusqu'à obtention du test positif.

M : Masse sèche de la prise d'essai(g).

II.3.4 Analyse granulométrique (AFNOR NF P94-056) :

Cet essai consiste à déterminer la contribution en poids des grains du sol suivant leur dimension. Pour les particules supérieures à >80 µm, la séparation se fait par tamisage, st pour les particules de taille inférieure à < 80 µm, l'analyse granulométrique est faite par la méthode par sédimentation [47].

Celui-ci peut se faire à sec après lavage à l'aide d'une série de tamis. Les résultats de l'analyse sont représenté sur un diagramme semi-logarithmique où l'on porte les diamètres des particules en abscisse (Graduation log) et les pourcentages des tamisât cumulés en ordonnée.

L'essai consiste à séparer les grains agglomérés, laver le contenu du tamis en projetant de l'eau à faible débit avec un dispositif de lavage avec arroseur et éventuellement de malaxage, à fractionner ce sol tout en remuant et en brossant les matériaux jusqu'à ce qu'il ne reste que des éléments propres. Le récipient contenant les éléments de dimension supérieure la dimension nominale d'ouverture du tamis à mis à sécher dans une étuve de dessiccation à température réglable à 150°C [47].

Verser la totalité du matériau séché au sommet d'une colonne de tamis d'ouverture de maille décroissante du haut vers le bas et ayant à sa base un fond tamis. Agiter manuellement ou mécaniquement la colonne de tamis. Pour cette phase, il peut être utilisé par une tamiseuse électrique. Terminer le tamisage en remuant soigneusement le matériau à la main, jusqu'à ce que plus aucun élément ne passe à travers les mailles de chaque tamis. Verser dans un récipient le refus du premier tamise et peser successivement le refus cumulé

sur chaque tamis. La masse de refus cumulée est rapportée à la masse totale sèche de l'échantillon soumis à l'analyse [47].



Figure II.3 : Série de tamis utilisée pour l'analyse granulométrique

II.3.5 Analyse Sédiment métrique(afnor NF P94-057) :

L'analyse granulométrique par Sédimentation est un essai géotechnique qui complète l'analyse granulométrique par tamisage d'un sol et qui peut être nécessaire à sa description et de classification.

Cet essai est basé sur la loi de stockes qui donne la vitesse limite V_{lim} d'une particule de poids spécifique tombant sous l'action de la pesanteur, dans un liquide visqueux de poids spécifiques et de viscosité. En réalité cet essai se fait en dispersant les particules de sol dans l'eau par agitation. On laisse décanter, et on mesure la densité de la solution à différents niveaux et en fonction du temps. En établissant une relation entre le diamètre des particules et le temps d'une part, la densité et le pourcentage de particules d'autre part, on peut ainsi tracer la courbe sédiment métrique qui complète la courbe granulométrique. Lors de la décantation de grains solides en suspension dans l'eau, les grains les plus gros chutent plus rapidement que les plus petits. La vitesse de chute des grains est directement liée à leur diamètre D . cette vitesse de chute peut s'exprimer simplement par le quotient de la distance parcourue par la particule dans sa chute par le temps de parcours. Cette loi applique aux éléments d'un sol pour déterminer des diamètres équivalents de particule [47].

- **Mode Opératoire :**

Tamis : un tamis à maille carrée de $80\ \mu\text{m}$ d'ouverture.

Bac : un bac pour recueillir le tamisât à $80\ \mu\text{m}$.

Etuve : une étuve de dessiccation à température réglable à 105°C .

Balance : pour peser l'échantillon de sol.

Mortier : un mortier de 20 cm de diamètre minimal avec son pilon en matériaux souple pour séparer les particules de sols passées au tamis de $80\ \mu\text{m}$ d'ouverture.

Eau distillée ou déminéralisée et défloculant : un mélange d'eau distillée additionnée d'une solution défloculante dosé à 5% d'hexamétaphosphat de sodium ($\text{Na}_6(\text{PO}_3)_6 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$). [47]



Figure II.4 : 'Essai de Sédiment métrique

II.3.6 Limites d'Atterberg (Norme NF-P-94-051) :

Les limites d'Atterberg sont des teneurs en eau pondérales, caractéristiques du sol. Elles correspondent à des comportements particuliers de celui-ci sous l'action des variations de la teneur en eau. Ces limites sont déterminées sur la fraction de sol passant su travers du tamis 4 μm . les deux limites utilisées sont [47] :

WL : limite de liquidité : teneur en eau d'un sol remanie caractérisent la transition entre un état liquidité (le sol est humide et déformable) et un état plastique

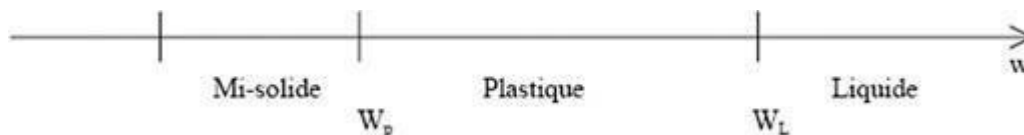
$$W_L = W * \left[\frac{N}{25} \right]$$

WP : limite de plasticité : teneur en eau d'un sol remanié caractérisent la transition entre un état solide- le sol durcit et se fissure.

A partir des résultats obtenus, on détermine deux paramètres.

IP : indice de plasticité : différence entre les limites de liquidité et de plasticité. Cet indice définit l'étendue du domaine plastique [47] :

$$I_P = W_L - W_P$$



a) Limite de liquidité :

Cet essai permet de prévoir le comportement des sols pendant les opérations terrassement, en particulier sous l'action des variations de teneur en eau.

Cet essai se fait uniquement sur les éléments fins du sol et il consiste à faire varier la teneur en eau de l'élément en observant sa consistance. Permet aussi de faire classification du sol. L'essai s'effectue en deux phases ;

- Recherche de la teneur en eau **WL** pour pas qu'elle une rainure de dimension normalisée, pratiquée dans le sol déposé dans la coupelle de Cassagnarde, se ferme sous l'action de 25 chocs appliquées de manière normalisée.

- Recherche de la teneur en eau **WP** pour laquelle un cylindre du sol de diamètre 3 mm, confectionné manuellement se fissure lorsqu'on le soulève [47].

Pour la détermination de **WL** : appareil de Casagrande, il est constitué d'une coupelle normalisé monté un support métallique avec manivelle, le tout étant fixé sur un socle en bois dur, l'ensemble permet de faire tomber la coupelle d'une hauteur de 10 mm sur le bloc du bois dur, chaque choc entraînant la fermeture progressivement de la rainure pratiquée dans l'échantillon de sol, celle-ci ayant été effectué à l'aide de l'outil a rainure [47].



Figure II.8 : Appareil de Casagrande [47] .

b) Limite de plasticité :

- Former une boulette à partir de la pâte préparée, rouler la boulette sur une plaque lisse, à la main ou éventuellement à l'aide d'une plaquette, de façon à obtenir un rouleau qui est aminci progressivement jusqu'il atteigne 3 mm de diamètre.
- L'amincissement du rouleau se fait de manière continue et sont effectuer de la coupure dans le sens de sa longueur le rouleau d'au moment où il atteint un diamètre de 3 mm doit avoir environ 10 à 15 cm de longueur et ne doit pas être creux [47].

- La limite de plasticité est obtenue lorsque simultanément, le rouleau se fissure et que son diamètre atteint 3mm. Si aucune fissure n'apparaît le rouleau est réintégré à la boulette la pâte est malaxée tout en étant séchée légèrement. Éventuellement sous un flux d'air chaud à une température inférieure à 50°.

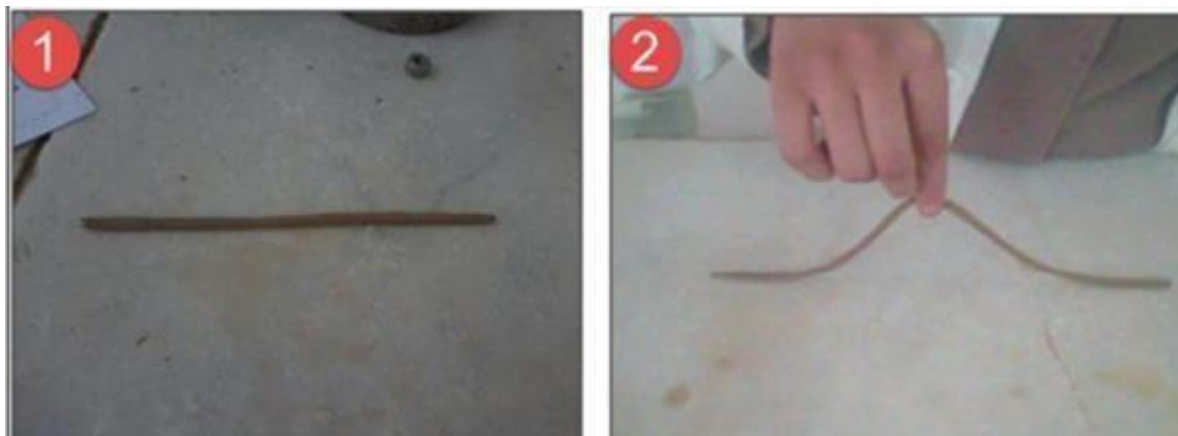


Figure II.5 : Essai de limite de plasticité

II.3.7 Essai Proctor normal & modifié (Norme NF P 94-093) :

Principe de l'essai :

Les caractéristiques de compactage Proctor d'un matériau sont déterminées à partir des essais dits : essai Proctor normal ou essai Proctor modifié. Les 2 essais sont identiques dans leur principe, seules différents les valeurs des paramètres qui définissent l'énergie de compactage appliquée.

Le principe de ces essais consiste à humidifier un matériau à plusieurs teneurs en eau et à compacter, pour chacune des teneurs en eau, selon un procédé et une énergie conventionnelle.

Pour chacune des valeurs de teneur en eau considérées, on détermine la masse volumique sèche du matériau et on trace la courbe des variations de cette masse volumique en fonction de la teneur en eau [47].

D'une manière générale cette courbe appelée courbe Proctor présente une valeur maximale de la masse volumique du matériau sec qui obtenu pour une valeur particulière de la teneur en eau. Ce sont ces deux valeurs qui sont appelés caractéristiques optimales de compactage Proctor normal ou modifier suivant l'essai réalisé [47].

Mode d'opérateur :

La masse totale de matériau nécessaire à l'exécution d'un essai doit permettre de faire un prélèvement différent pour chaque point de la courbe Proctor, car il n'est pas autorisé de réutiliser le même matériau pour la détermination de plusieurs points de la courbe Proctor. Elle varie entre 15 kg et 100 kg suivant la granularité du matériau et suivant que l'on cherche une détermination CBR après immersion et/ou de son Indice Portant immédiat [47].

La totalité du matériau prélevé est, si nécessaire, séchés à l'air ou dans une étuve réglée à 50°C maximum jusqu'à un état hydrique jugé suffisamment sec pour commencer l'essai.

Après séchage, le matériau est tamisé à 20 mm et seul le tamisât est conservé pour l'exécution de l'essai. Le matériau est homogénéisé et divisé par appréciation visuelle en au moins cinq parts égales.

Les parts sont humidifiées à une teneur en eau telle que le teneur en eau de trois parts au moins et quatre au plus soient réparties : 0,8 **wopm** et 1,2 **wopm**.



Figure II .6 : Appareille de Proctor

II.3.8 Essai CBR (AFNOR NF P94-078) :

- **But de l'essai :**

L'essai CBR (California Bearing Ratio test) est un essai de portance (aptitude des matériaux à supporter les charges) des remblais et des couches de formes compactées des ouvrages routiers.

Il s'agit de déterminer expérimentalement des indices portants (IPI, CBR) qui permettent

- d'établir une classification des sols (GTR)
- d'évaluer la traficabilité des engins de terrassement (IPI)
- - déterminer l'épaisseur des chaussées (CBR augmente \Rightarrow épaisseur diminue)

- **Principe de l'essai :**

La charge apportée par le pneu sur la chaussée poinçonne le sol de fondation. Ce poinçonnement est d'autant plus petit que l'épaisseur de la chaussée est grande.

P: pression appliquée par le pneumatique sur le sol de fondation.

S: surcharge simulant l'action de la chaussée qui s'oppose au déplacement vertical du sol de fondation lors de l'action du pneu [47].

On peut reproduire ce phénomène en compactant le matériau dans les conditions de l'essai Proctor dans un moule CBR puis en mesurant les forces à appliquer sur un poinçon cylindrique pour le faire pénétrer à vitesse constante dans une éprouvette de ce matériau.

Afin de pouvoir définir les caractéristiques mécaniques apportées par la présence du géotextile comme un autre mode de renforcement pour notre sol d'étude, nous avons cherché à tester d'un côté l'introduction du géotextile à différents états de compacité dans le sol étudié et d'un autre côté le type d'appareillage d'essai le plus adapté [47].



Figure II.7 : Appareille de presse CBR.



Figure II.8 : Logiciel de courbe CBR.

II.4 Conclusion :

Ce programme expérimental a permis de définir l'ensemble des essais nécessaires pour étudier le comportement du mélange sable-argile en laboratoire. Les tests réalisés fournissent les données indispensables à la caractérisation physique et mécanique du matériau. Les résultats obtenus serviront de base à une comparaison approfondie entre les différentes méthodes de compactage, notamment le Proctor (standard et modifié) et le compactage par vibration, afin de déterminer la technique la plus efficace pour ce type de sol.

Chapitre III

Investigation Expérimentale

III.1 Introduction :

Nous sommes intéressés dans ce chapitre à exploration des résultats des essais effectués sur un mélange optimal un mélange optimal qui trouve par (AZZOUZ 2017) Selon les travaux de doctorats, ce mélange optimal compose de de **70% sable de dune et 30% argile de Bouhraoua** de la wilaya de Ghardaïa.. Les essais ont été réalisés au sein du Laboratoire des Travaux Publics du Sud (LTPS) et visent à évaluer les performances géotechniques de ce mélange, notamment sa portance, à travers différentes méthodes de compactage. L'organisation du chapitre se fait en deux parties : la première expose de manière objective les données issues des essais, tandis que la seconde propose une analyse critique accompagnée de nos interprétations. Une attention particulière est accordée aux essais CBR, appliqués au mélange optimal selon deux types de compactage, dans le but d'identifier la méthode la plus efficace pour une utilisation en couche de fondation routière en milieu saharien.

III.2 Zone d'Étude :

Avant de procéder aux essais d'identification des matériaux choisis, il est important de situer la zone d'étude. Celle-ci se trouve dans la wilaya de Ghardaïa, une région issue du dernier découpage administratif défini par la loi n°19-12 du 12 novembre 2019. Ghardaïa est située dans le centre nord du Sahara algérien, à environ 600 km au sud d'Alger. Elle s'étend sur une superficie de 26 165,43 km² et compte une population de plus de 409 660 habitants. Administrativement, elle est divisée en 8 daïras et 10 communes.

La région est localisée à une latitude de 32° 23' Nord, une longitude de 4° 13' Est et à une altitude moyenne de 355 m au-dessus du niveau de la mer. Plus précisément, la zone ciblée pour cette étude couvre une superficie de 2 220 km², avec les coordonnées géographiques suivantes :

- **Latitude** : 30° 37' Nord
- **Longitude** : 3° 45' Est
- **Altitude** : 480 m

La wilaya de Ghardaïa est délimitée par :

- **Au nord** : la wilaya de Laghouat (à 200 km)
- **Au nord-est** : la wilaya de Djelfa (à 300 km)
- **À l'est** : la wilaya d'Ouargla (à 200 km)
- **Au sud** : la wilaya de Ménea (à 270 km)
- **À l'ouest** : la wilaya d'El Bayadh (à 350 km).

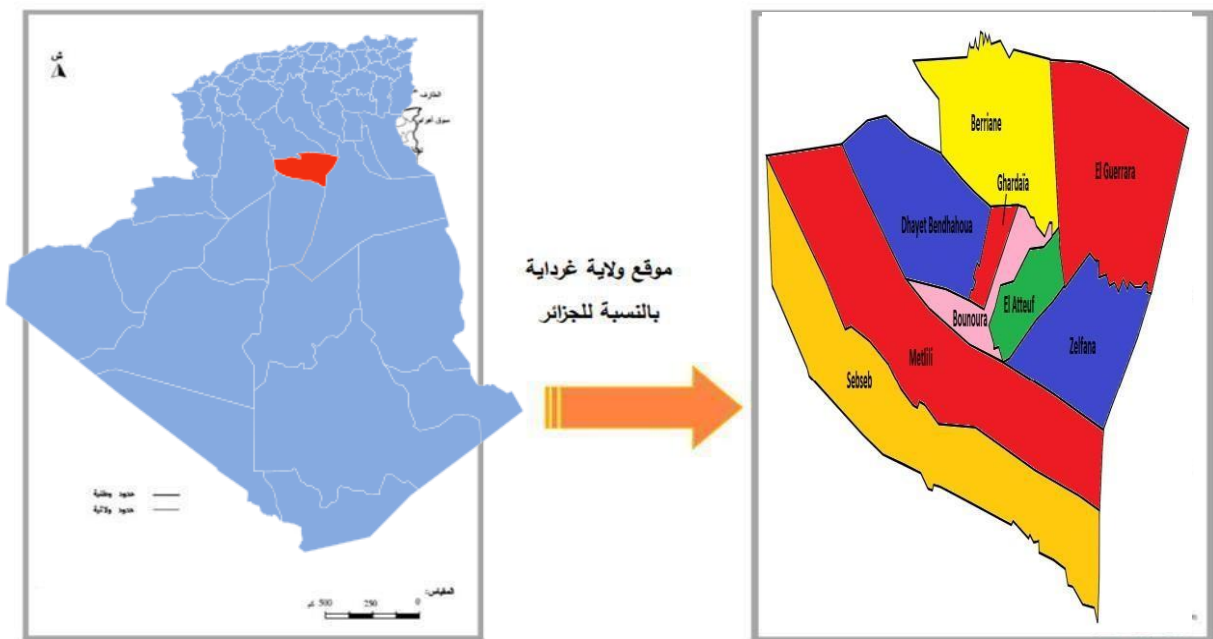


Figure III.1: Situation géographique de la wilaya de Ghardaïa.(hafsa 2023)

III.3 – Localisation des Sites de Prélèvement des Matériaux

1. **Sable de dune :**

La région de Ghardaïa étant une zone saharienne, elle dispose de vastes étendues de sable de dune. Le sable utilisé dans cette étude a été prélevé à environ 50 km de la ville de Ghardaïa, plus précisément dans la région de l'Oasis de Sebseb. Le prélèvement s'est fait en grande quantité, directement à la surface du sol.

2. **Argile :**

Le prélèvement de l'argile a été réalisé en collaboration avec un géologue du Laboratoire des Travaux Publics du Sud (LTPS). Trois échantillons ont été prélevés dans la région de Ghardaïa, dont le principal provient de la zone de **Bouhraoua**, située à la sortie nord de la ville, en direction de Laghouat.

Le point de prélèvement est localisé aux coordonnées GPS suivantes :

Latitude : N 32° 31' 43.1"

Longitude : E 003° 46' 21.0"

La zone présente deux faciès d'argile distincts :

- Un **faciès jaune**, contenant des cristaux de gypse
- Un **faciès rouge**, également marqué par la présence de gypse

Le premier échantillon d'argile a été prélevé manuellement sur un petit plateau rocheux de type "gara". En raison de la nature très dure et sèche de l'argile, typique des zones arides, l'opération a nécessité un creusement approfondi. L'utilisation d'une pioche s'est avérée indispensable pour briser la croûte argileuse compacte.

Ce prélèvement a été relativement difficile en raison de la résistance mécanique élevée du sol. Des photos illustrant les différents sites de prélèvement sont présentées pour mieux visualiser les zones d'origine des matériaux utilisés.

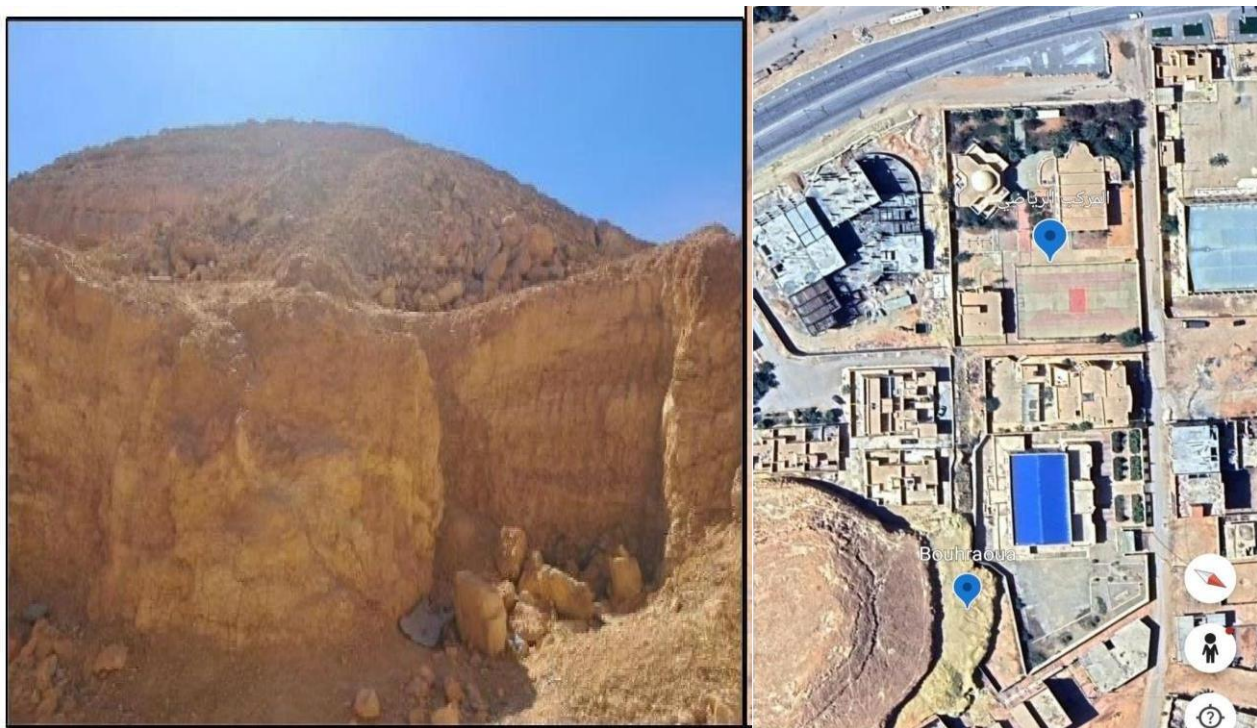


Figure III.1 : Site d'extraction de sable et d'argile

III.4 Essais d'identification des matériaux utilisés :

(Le tableau III.1) présente Les essais effectués

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

Argile	Sable
Analyse chimique	Analyse chimique
Analyse granulométrique.	Analyse granulométrique.
Limites d' atteberg.	Équivalent de sable
Teneur en Caco 3.	Essai au bleu de méthylène
Essai au bleu de méthylène.	

III.4.1 : Les essais sur l'argile de Bouhraoua :

III.4.1.1 Analyse chimique :

Tableau III.2: Les résultat de l'analse chimique de l'argile étudié

Caractéristique	Symboles	Unité	Argile Bouhraoua
Résidu insoluble	SiO ₂ +Silice	%	88.91
Sulfates	SO ₃	%	3.09
Chlorures	Cl -	%	0.023
Carbonate de Calcium	CaCO ₃	%	03
Matières organiques	MO	%	--

III.4.1.2 Analyse granulométrique (NF P94 – 056):

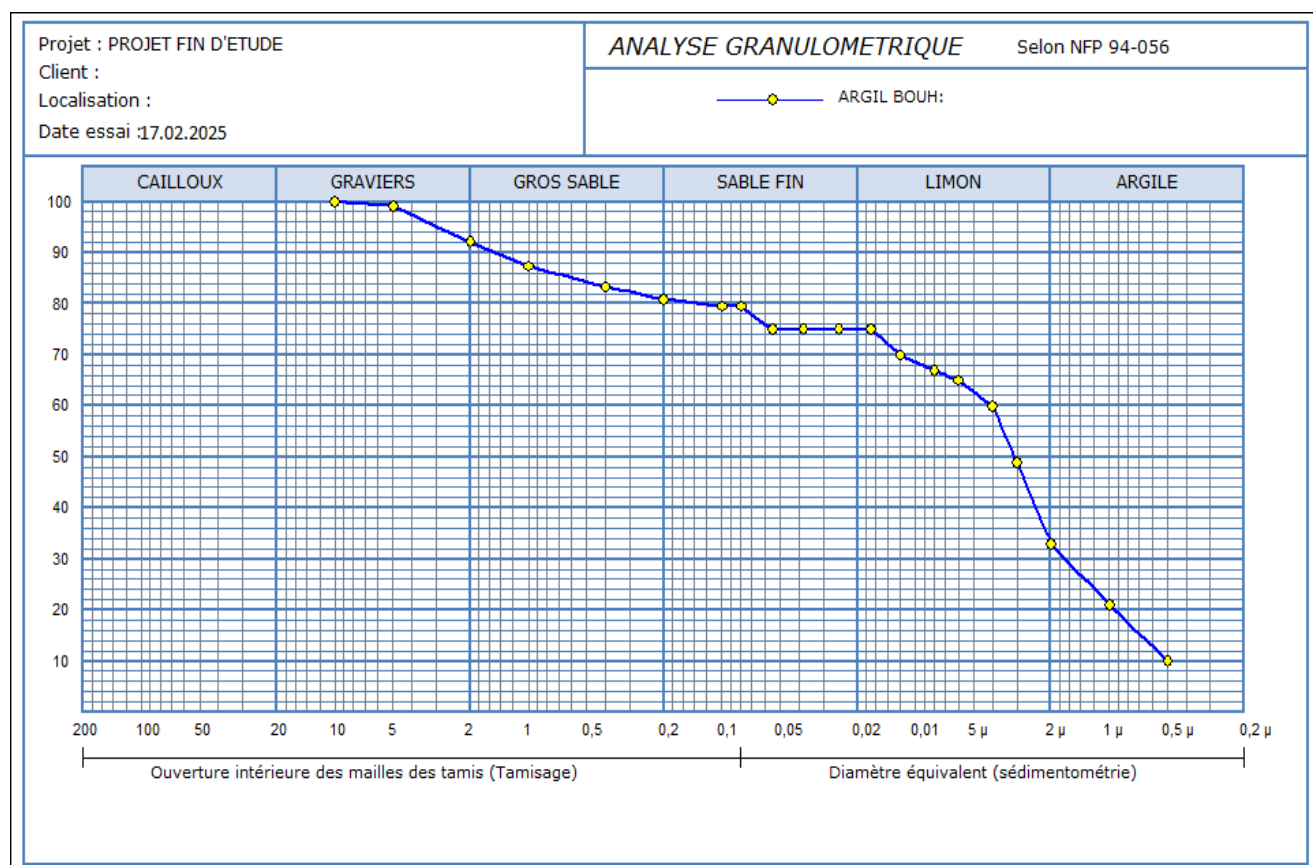


Tableau III.1 : Courbe granulométrique d'argile Bouhraoua

Tableau III.3: Résultats récapitulatif de l'analyse granulométrique D'Argile Bouhraoua

	Argile Bouhraoua
Dmax (mm)	5
Argile (%)	22
Limon (%)	44
Sable fin (%)	4
Sable gros (%)	11
Gravier (%)	8
Cailloux (%)	0
D10 (μ)	2
D30 (μ)	0.05
D60 (μ)	5
Cu= D60/D10	2.5
Cc= (D30)² / D10D60	0.00025

Cu : coefficient d'uniformité dit de Hazzen. $Cu = D60/D10$

Cc : coefficient de courbure. $Cc = (D30)^2 / D60.D10$

III.4.1.3 Limite d'Atterberg (NF-P-94-051) :

Tableau III.4: les valeurs de laisse limite Atterberg

Limites D' Atterberg	Valeur(%)
Limite de liquidité (WL)	57.60
Limite de plasticité (Wp)	26.83
Indice de plasticité (IP)	30.77

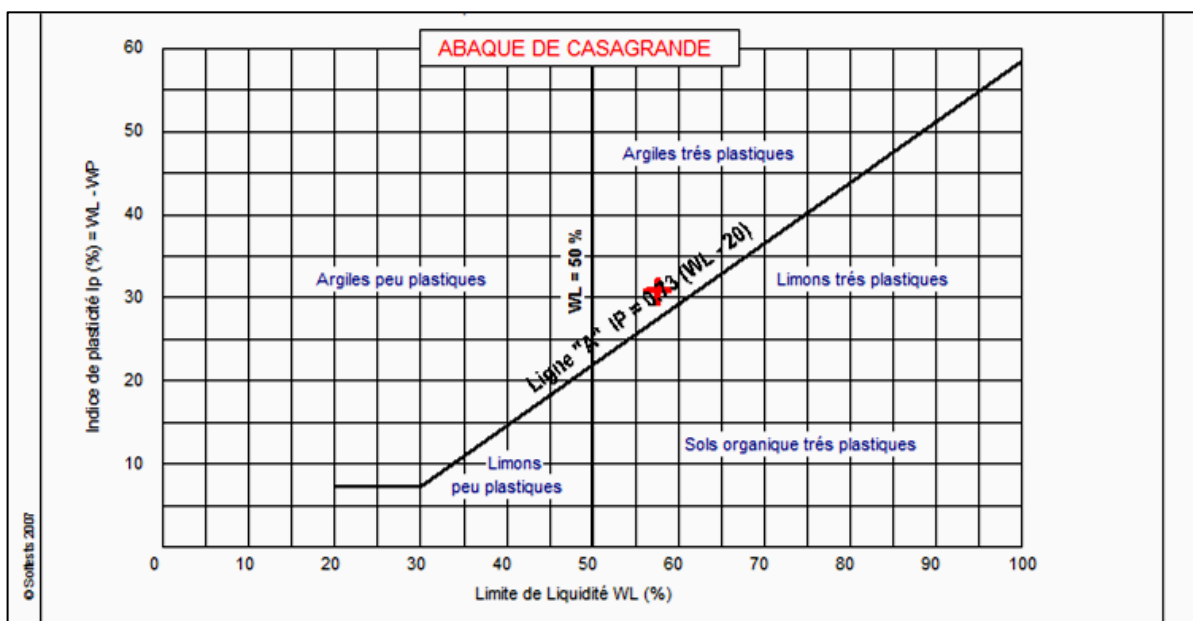


Tableau III.2 : Classification d'argile étudié selon l'abaque de Casagrande

Tableau III.5: Résultats de l'essai au bleu à la tâche.

Paramètre	Bouhraoua
Valeur de bleu « VB » (%)	2.75
Surface spécifique totale (m ² / g)	57.48

III.4.1.5 Teneur en carbonate de calcium de l'argile étudiée :

Tableau III.6: La classification par CaCO_3 de quelques sols. [47]

$\text{CaCO}_3(\%)$	Dénomination
0- 10	Argile ou limon.
10- 30	Argile calcaire.
30- 70	Marne.
70- 90	Calcaire argileuse.
90- 100	Calcaire.

D'après ce tableau au-dessus, notre l'argile classe comme des Argile ou limon (9%)

Tableau III.7: Récapitulatif des essais d'identification sur argile Bouhraoua

Paramètre des argiles	Argile de Bouhraoua
<i>WL</i>	57.60
<i>WP</i>	26.83
<i>Ip</i>	30.77
<i>AC</i>	1.59
<i>Vb</i>	2.75
<i>Teneur en carbonate de calcium</i>	09

III.4.2 les essais sur Sable de dune:

III.4.2.1 Analyse granulométrique : (NF P94-056 et NF P94-057) :

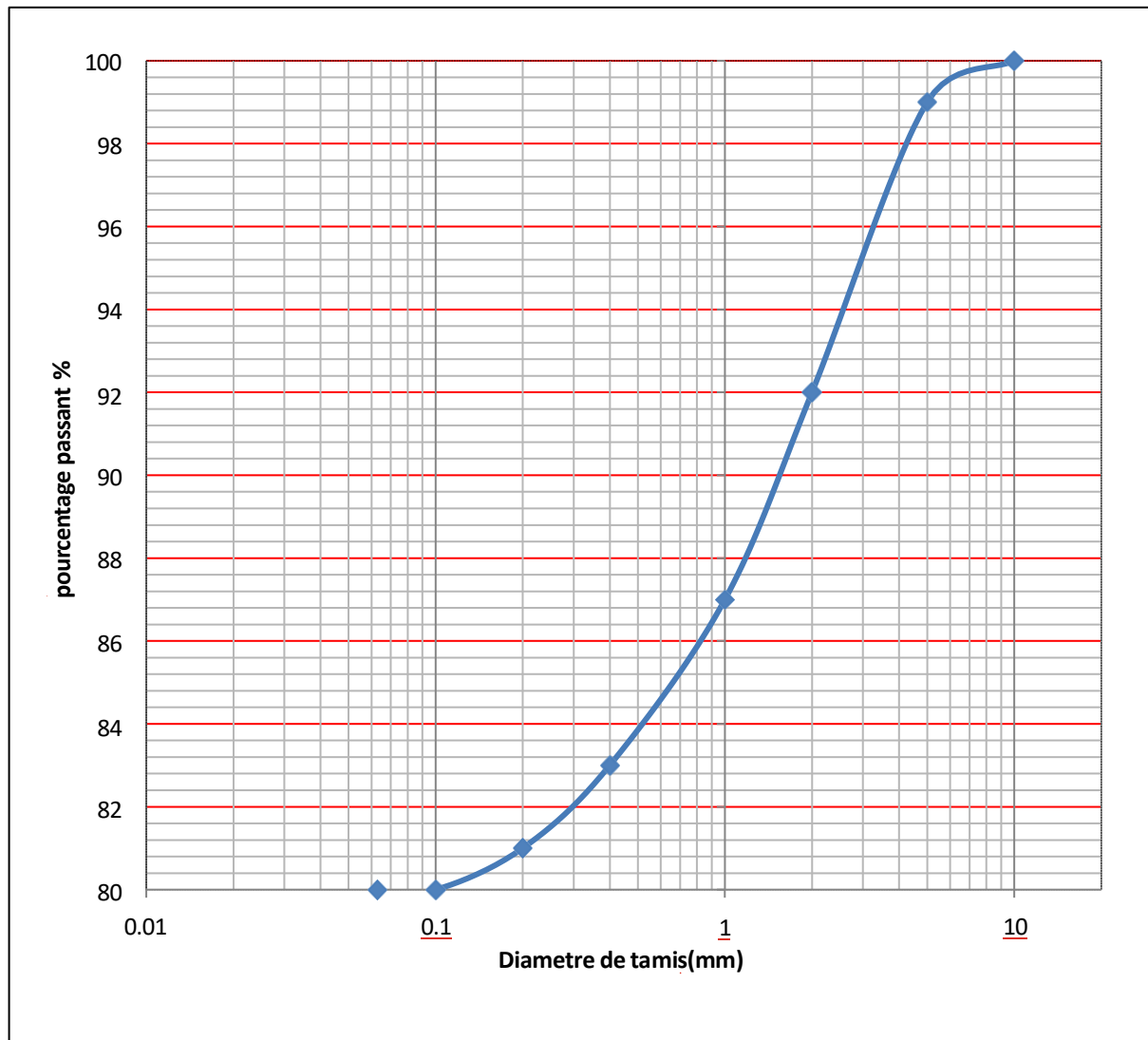


Tableau III.3 : Courbe granulométrique sable de dune (sebsab)

Tableau III.8: Récapitulatif des essais d'identification sur le sable de dune (sebseb)

Essais		Sable de dune
Granulométrie	Cu	1.5
	Cc	1.04
	LCPC	SB

III.4.2.3 Classification du sol :

- **Classification TRS (technique routière saharienne):**

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

- **Mélange de sable dune /Argile Bouhraoua**

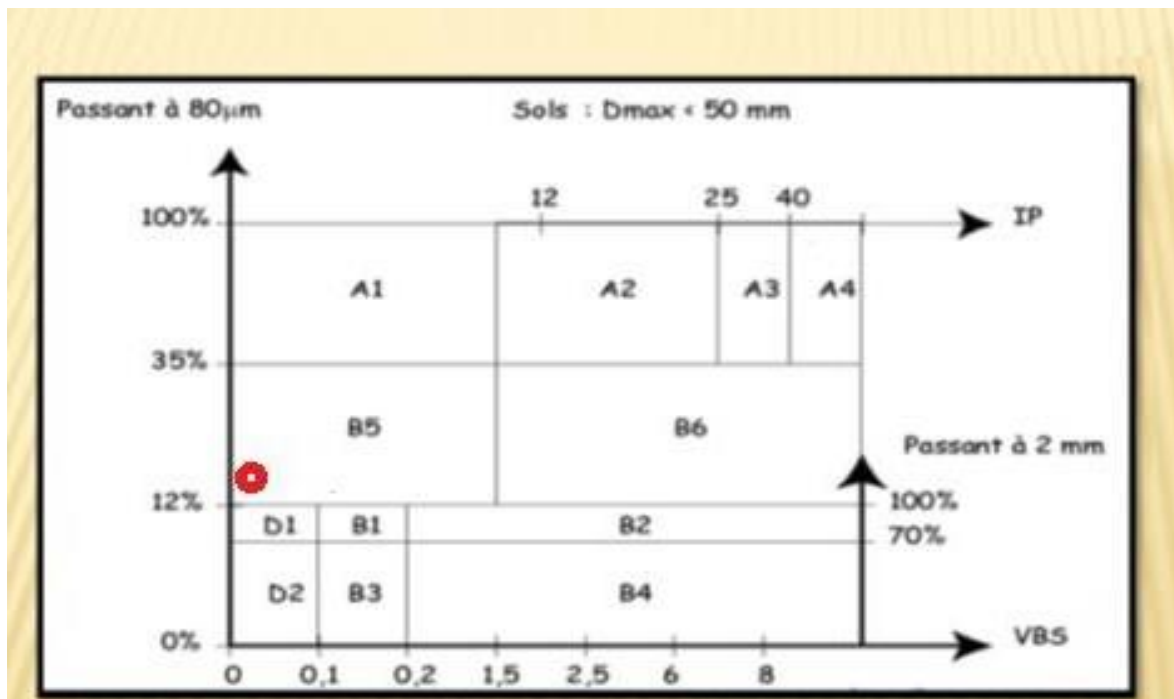
D_{max} < 50mm ;

Passant à 80µm =35%

I_p > 12%

CLASSIFICATION DES SOLS GRENUS (plus de 50% des éléments > 0,08 mm)					
Définitions			Symb	Critères	Appellation
Sable propre	Plus de 50% des éléments > 0,08 mm ont un diamètre > 2 mm (Tamis ASTM N° 7)	Moins de 5% d'éléments < 0,08 mm	Gb (GW)	$C_u > 4$ et $1 < C_c < 3$	Grave propre bien graduée
			Gm (GP)	Une des conditions Gb non satisfaites	Grave propre mal graduée
		Plus de 12% d'éléments < 0,08 mm	GL (GM)	Limites d'Atterberg au dessous de la ligne A (Voir figure 2.3)	Grave limoneuse
			GA (GC)	Limites d'Atterberg au dessus de A	Grave argileuse
Non gravier	Plus de 50% des éléments > 0,08 mm ont un diamètre < 2 mm	Moins de 5% d'éléments < 0,08 mm	Sb (SW)	$C_u > 6$ et $1 < C_c < 3$	Sable propre bien graduée
			Sm (SP)	Une des conditions Sb non satisfaites	Sable propre mal graduée
		Plus de 12% d'éléments < 0,08 mm	SL (SM)	Limites d'Atterberg au dessous de la ligne A (Voir figure 2.3)	Sable limoneux
			SA (SC)	Limites d'Atterberg au dessus de la ligne A (Voir figure 2.3)	Sable argileux
Lorsque : 5% < % d'éléments inférieurs à 0,08 mm < 12% => on utilise un double symbole					

B5 : sable de dune



	Sable de dune
Argile ‰	-
Limon ‰	-
Gros Sable ‰	54.66
Sable fin ‰	45.34
Tamisé à 0,08 mm ‰	-
Tamisé à 2 mm ‰	-
D10 (μ)	0.21
D30 (μ)	0.25
D60 (μ)	0.3
$C_u = D_{60}/D_{10}$	1.43
$C_c = (D_{30})^2 / D_{10}D_{60}$	0.99

Classification du sol selon le GTR :

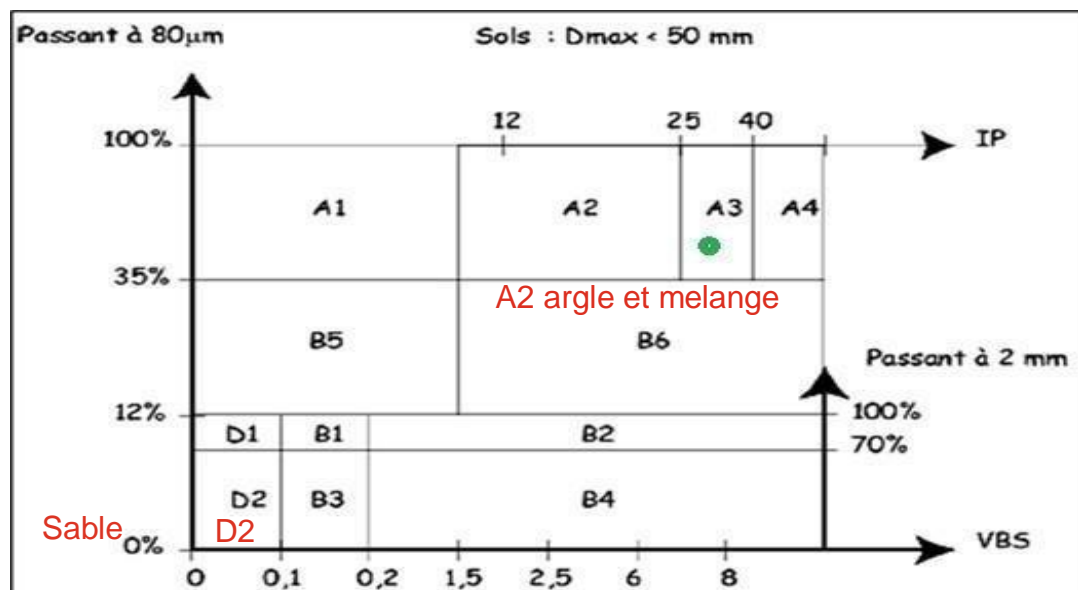


Tableau III.4 : Classification des sols fins selon GTR

Le sol classe A3 : Sols fins plastiques (argiles plastiques à très plastiques)

Classification du sol selon le LCPC :

Tableau III.9 : Classification LCPC de sable utilisée.

Définitions			Symbole	Conditions	Appellations
Graves	Plus de 50% des éléments > 0,08 mm ont un diamètre > 2mm	moins de 5%	Gb (GW)	$Cu = D_{60}/D_{10} > 4$ et $1 < Cc = (D_{30})^2/D_{10}D_{60} < 3$	Grave propre bien graduée
		d'éléments < 0,08 mm	Gm (GP)	Une des conditions de Gb n'est pas satisfaite	Grave propre mal graduée
		plus de 12% d'éléments < 0,08 mm	GL (GM)	Limites d'Atterberg au-dessous de la ligne A	Grave limoneuse
			GA (GC)	Limites d'Atterberg au-dessus de la ligne A	Grave Argileuse
Sable	Plus de 50% des éléments > 0,08 mm ont un diamètre < 2mm	moins de 5%	Sb (SW)	$Cu = D_{60}/D_{10} > 6$ et $1 < Cc = (D_{30})^2/D_{10}D_{60} < 3$	Sable propre bien gradué
		d'éléments < 0,08 mm	Sm (SP)	Une des conditions de Sb n'est pas satisfaite	Sable propre mal gradué
		plus de 12% d'éléments < 0,08 mm	SL (SM)	Limites d'Atterberg au-dessous de la ligne A	Sable limoneux
			SA (SC)	Limites d'Atterberg au-dessus de la ligne A	Sablr Argileue

III.5 Les essais de compactage:

III.5.1 Préparation des échantillons :

La préparation des échantillons est faite pour la détermination concomitante des caractéristiques de compactage et l'indice CBR.

L'échantillon de sable et les argiles sont desséchés, ensuite pulvérisé. L'échantillon de les argiles et éventuellement tamisé à un tamis d'ouverture égale à 2 mm est répandu dans un bac d'homogénéisation. Ensuite, 6 échantillons sont préparés, chacun contenant 70% de sable et 30% d'argile, soit l'équivalent de 3850 g de sable et 1650 g d'argile.



Figure III.2: Préparation des échantillons

III.5.2 Essais Proctor modifié:

Nous avons humidifié chaque échantillon avec un taux d'humidité spécifique (8 %, 10 %, 12 %, etc.), avant de procéder à l'essai Proctor modifié afin d'évaluer leur densité sèche maximale et leur teneur en eau optimale.



Figure III.3: Préparation de mélange d'échantillon

Les résultats obtenus à partir de l'essai Proctor sont présentés dans la (Graphe III.7) est le (Tableau III.10)

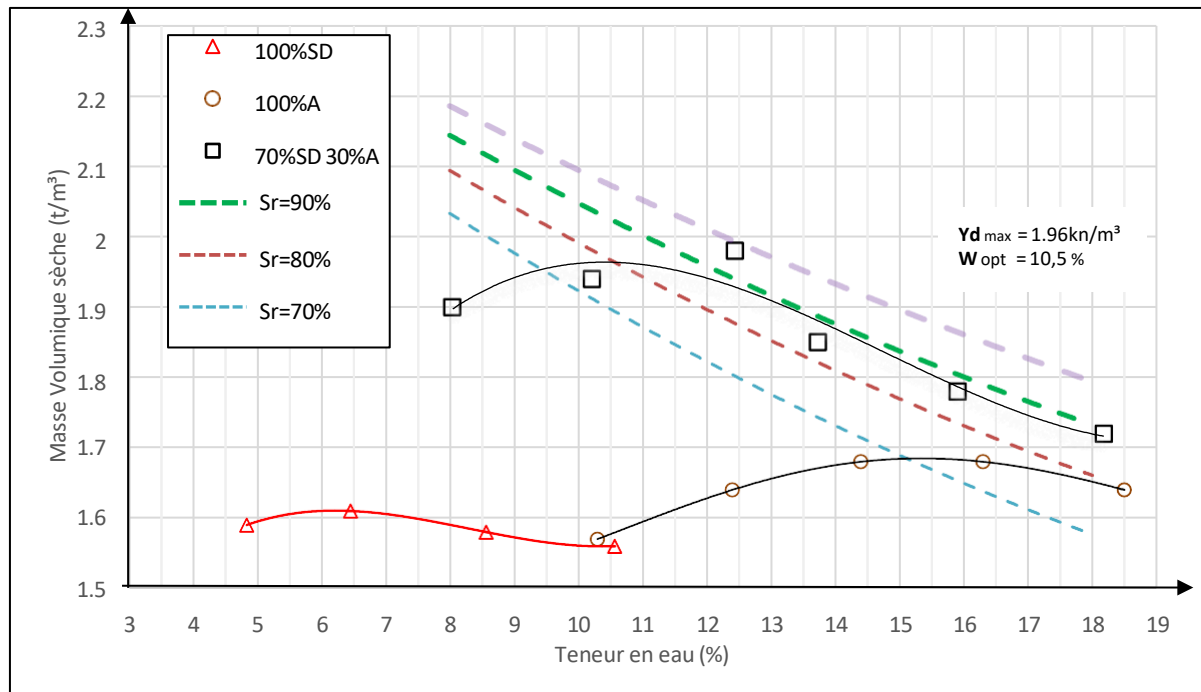


Tableau III.5 : Courbe de la masse volumique sèche et humide selon le mode de proctor du mélange (70 % sable de dune et 30 % Argile)

Tableau III.10: résultats obtenus d'essai de proctor

	8	10	12	14	16	18
Teneur en eau propose (%)						
Masse volumique sèche (g/cm ³)	1.90	1.94	1.98	1.85	1.78	1.72
Teneur en eau mesurée (%)	8.04	10.22	12.44	13.73	15.91	18.18

a) Essai de C.B.R pour les donné de Proctor :

Suite à la détermination de la densité sèche maximale et de la teneur en eau optimale grâce à l'essai Proctor, l'échantillon compacté selon ces paramètres est extrait et utilisé pour réaliser l'essai CBR.



Figure III.4: L'essai CBR dans le moule Proctor

Les résultats obtenus à partir de l'essai CBR selon le mode proctor présentés dans la (**Graphe III.8**) est le (**Tableau III.11**)

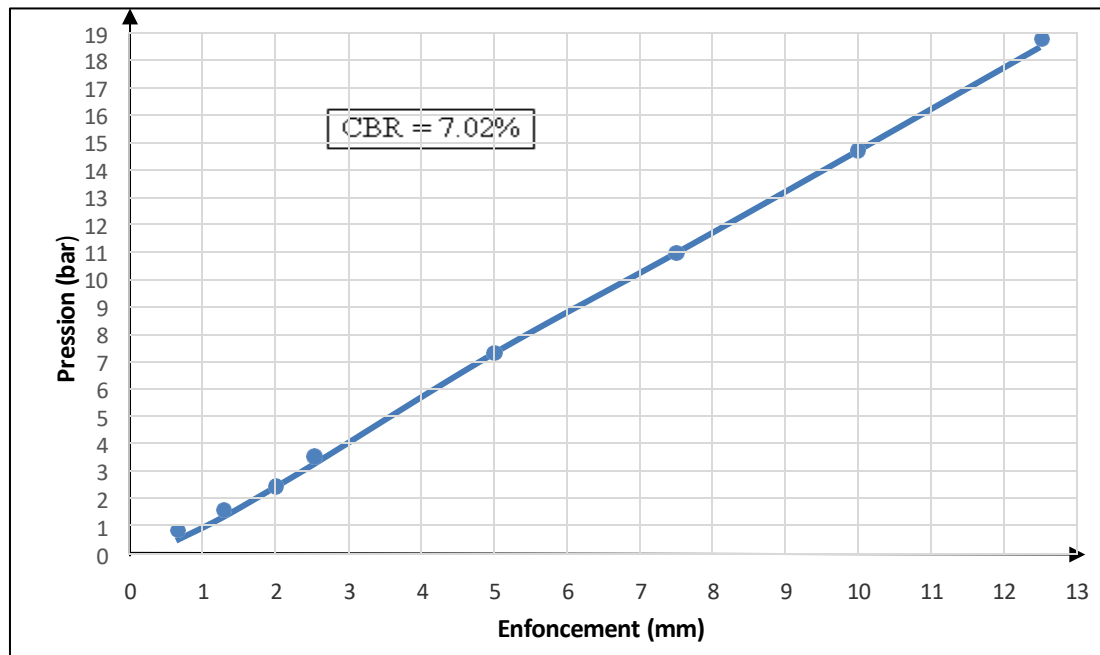


Tableau III.6 : Résultats de l'essai CBR immédiat (éprouvette compactée selon la méthode Proctor)

Tableau III.11: valeurs mesurées lors de l'essai C.B.R selon le mode proctor

Enfoncement(mm)	0.625	1.25	2	2.5	5	7.5	10	12.25
Pression (bar)	0.56	1.38	2.52	3.30	7.38	11.01	14.74	18.50

III.5.3 Essais Table de vibration :

Le mélange a été préparé conformément au protocole de l'essai Proctor, puis introduit dans un moule adapté à la table vibrante. Une charge a été appliquée sur l'échantillon afin d'assurer un bon contact, avant de le soumettre à des vibrations à 80 Hz pendant 10 minutes pour chaque essai.

Tableau III.12: Étapes de l'expérience de la table vibrante

	<p>moule de table vibrant</p>
	<p>Préparez le mélange 70/sable et 30/, humidifiez-le et placez-le dans le moule.</p>
	<p>Mettre du poids sur le mélange</p>
	<p>Réglez le niveau de vibration de la table sur 80 Hz.</p>

Suite à l'expérimentation effectuée avec des teneurs en eau variables, les résultats obtenus sont présentés ci-après.

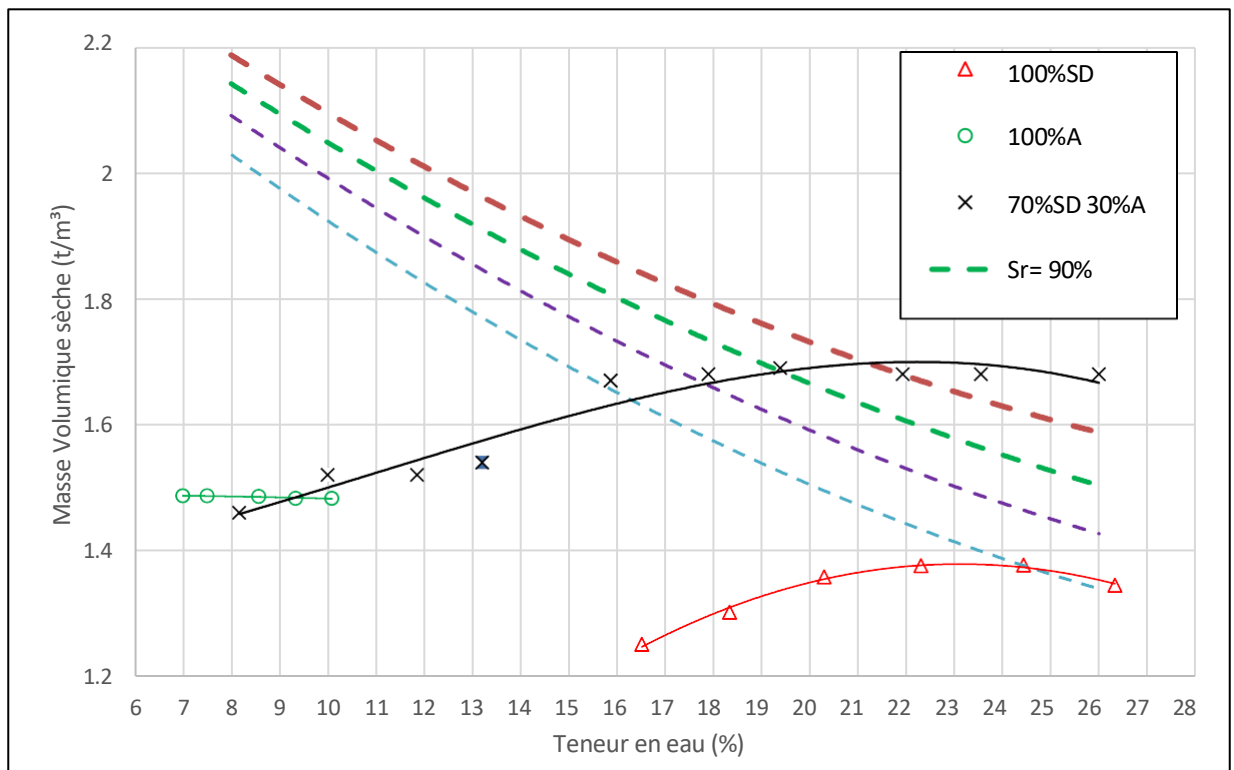


Tableau III.7 : Courbe de la masse volumique sèche et humide selon le mode de vibration du mélange (70 % sable de dune et 30 % Argile)

Tableau III.13: Résultats d'essai de compactage du mélange 70% sable de dune et 30% argile

Teneur en eau propose (%)	8	10	12	14	16	18	20	22	24	26
asse volumique sèche(g/cm3	1.46	1.52	1.52	1.54	1.67	1.68	1.69	1.68	1.68	1.68
Teneur en eau mesurée (%)	8.17	10	11.86	13.21	15.87	17.90	19.39	21.93	23.55	26

a) Essai de C.B.R pour les donné de Table de vibration :

Suite à la détermination de la densité sèche et de la teneur en eau optimales, un essai CBR a été effectué à la densité sèche maximale obtenue expérimentalement. Les résultats étant très faibles, nous avons répété l'essai en adoptant la densité sèche maximale issue de l'essai Proctor, Les résultats ont été les suivants

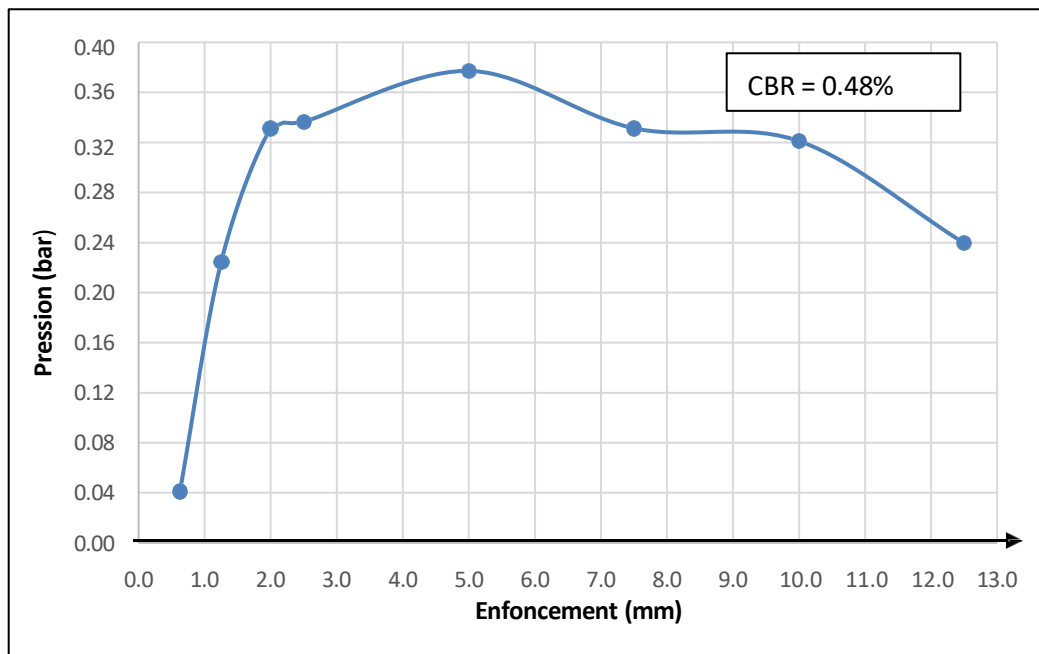


Tableau III.8 : Résultats de l'essai CBR immédiat (éprouvette compactée selon la méthode vibration).

3.3.3 Comparaison entre essai de proctor et essai T.vibration :

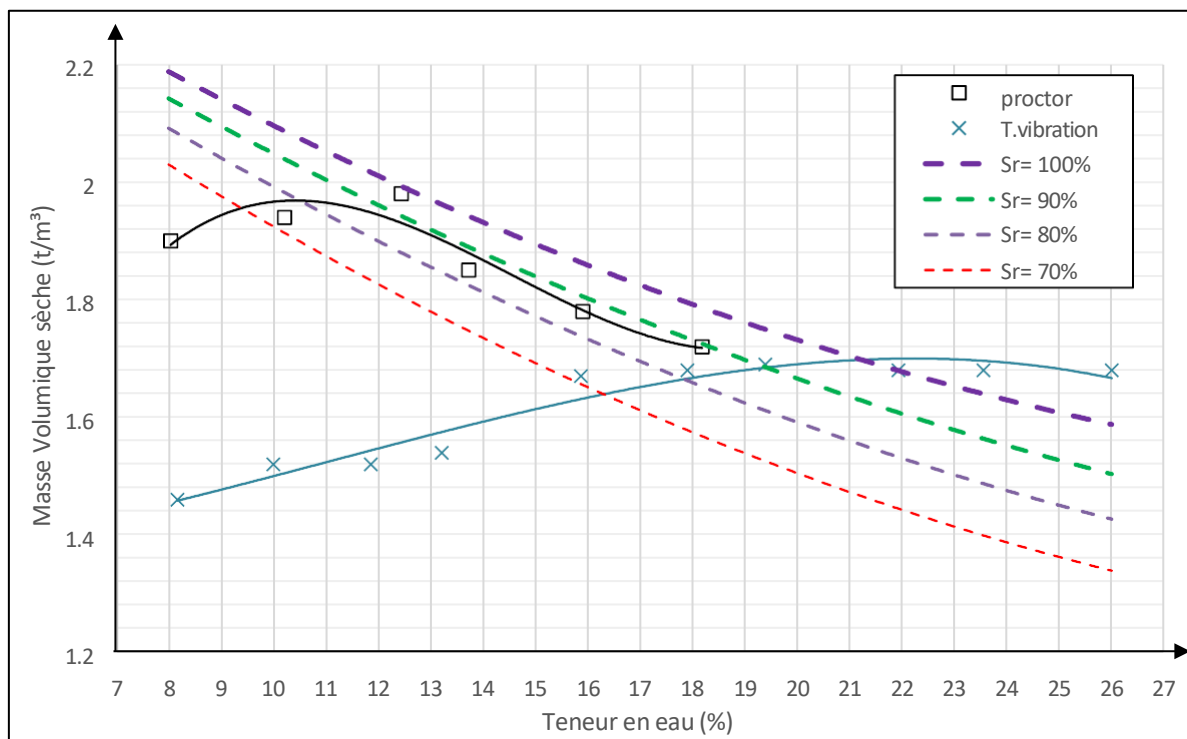


Tableau III.9 : Comparaison entre les résultats des essais de Proctor et les résultats des essaisTable de vibration.

III.6 Discussion et interprétation les résultats :

III.7 interprétations les résultats des essais d'identification :

III.6 .1.1 Analyse chimique :

D'après les résultats (**Tableau III.1**), nous remarquons que la silice est l'élément prépondérant. On constate aussi que le taux du gypse très élevé pour l'argile, donc on a des argiles gypseuse

III.7.1.1 Analyse granulométrique:

La distribution granulométrique (**Graphe III.1**) pour l'argile obtenue nous montre que : pour Bouhraoua

- 1) Une présence de particule gravier est de (8%),
- 2) La particule sableuse (gros et fin) est de (11%),
- 3) Le pourcentage de particules limoneuses est de (44%)
- 4) Le pourcentage de particule argileuse est de (22%)

Selon la distribution granulométrique, on peut dire que la courbe présente d'un sol à prédominance limono-argileux.

La courbe granulométrique obtenue pour le mélange sable dune-argile (**Graphe III.4**) : présente une distribution continue et bien étalée des particules. Elle s'étend des fractions grossières (sable) jusqu'aux particules fines (limon et argile), ce qui indique une granulométrie bien graduée.

Points clés à analyser :

Le pourcentage passant à 0.08 mm (80 μ m) est d'environ 35 %, ce qui indique une teneur importante en éléments fins.

Une courbe sans cassure ni plateau reflète une bonne transition entre les tailles de grains, traduisant un sol hétérogène mais stable, propice à la compaction.

Cette granulométrie confère au sol une bonne densité sèche maximale et une capacité à limiter les vides si bien compacté.

III.6.1.3 Limite d'Atterberg

Selon le Diagramme de Casa grande (**Graphe III.2**) le sol de Bouhraoua sont classe comme limons très plastique.

Selon le Diagramme de Casa grande du mélange sable dune-argile (**Graphe III.5**) : Le point (WL = 40 %, IP = 18 %) se situe au-dessus de la ligne A du diagramme.

Il correspond à la zone des argiles à faible plasticité (CL) selon le système de Casagrande.

Cela signifie que le sol est :

- Plastique (capacité de déformation sans fissuration).
- Cohérent (présente une certaine résistance mécanique),
- Peu sensible à l'eau (comparé à des argiles plus plastiques comme CH ou MH).
- Sol adapté à des charges modérées.
- Bonne aptitude au compactage .

III.7.2 les résultats de compactage selon mode Proctor modifié :

a) Interprétation la courbo de proctor :

Graphes III.5 présente la courbe de Proctor, qui se caractérise par une forme arquée s'élevant progressivement avec l'augmentation de la teneur en eau, jusqu'à atteindre une densité sèche maximale, puis décroît au-delà de ce point. Dans un premier temps, l'ajout d'eau aide à lubrifier les particules du sol et à réduire la friction entre elles, ce qui permet un réarrangement plus dense et compact. Cependant, lorsque la teneur en eau dépasse la valeur optimale, l'eau commence à remplir les vides au lieu d'évacuer l'air, ce qui entraîne une augmentation de la porosité et une diminution de la densité sèche du sol.

b) Interprétation des courbes de saturation et de leur relation avec la courbe de proctor :

À la teneur en eau optimale (W_{opt}), le sol est proche de l'état de saturation sans toutefois l'atteindre, ce qui correspond à la condition assurant le meilleur compactage. Le dépassement de cette teneur entraîne un degré de saturation supérieur à 90 %, ainsi qu'une augmentation de l'eau libre, ce qui affaiblit la cohésion entre les particules du sol et réduit la densité sèche obtenue.

Les courbes de saturation ont été tracées à l'aide de la relation :

$$\gamma_d = \frac{S_r * \gamma_w * G_s}{1 + w * G_s}$$

γ_d : densité sèche

S_r : Degré de saturation

G_s : Poids spécifique des particules du sol=2.65

W : Teneur en eau

c) interprétation la courbo C.B.R :

Les résultats de l'essai CBR ont montré une valeur de 7,02 % (**Graphe III.6**) , enregistrée pour un échantillon compacté selon la méthode Proctor modifiée. Cette valeur constitue un indicateur d'une résistance au port relativement acceptable, ce qui est attribué à la densité sèche élevée obtenue lors du compactage. Toutefois, cette valeur demeure faible en comparaison avec les matériaux utilisés dans la région de Ghardaïa, tels que le tuf, qui présente une meilleure capacité portante.

III.7.3 les résultats de compactage selon mode vibration :

a) interprétation la courbo de Table de vibration :

Concernant la méthode de compactage à l'aide de la table vibrante, les résultats (**Graphe III.7**) ont montré que la densité sèche maximale n'a pas dépassé 1,69 g/cm³, cette valeur ayant été enregistrée à une teneur en eau optimale de 20 %. Cela indique que cette méthode nécessite une teneur en eau plus élevée pour atteindre une densité maximale, en raison de la nature de l'énergie transmise par les vibrations, qui diffère de celle appliquée dans la méthode Proctor. De plus, la granulométrie uniforme du sable empêche un compactage efficace, car les grains de sable, étant de dimensions similaires, ne peuvent s'emboîter efficacement ; l'eau se contente alors de remplir les vides entre les particules sans améliorer significativement la densification.

b) interprétation la courbo C.B.R :

Pour l'échantillon compacté par vibration, la courbe CBR (**Graphe III.8**) montre une capacité portante moindre pour les mêmes niveaux de pénétration, ce qui correspond à une valeur estimée du CBR comprise entre 4 % et 5 %. Cette diminution de la résistance est principalement due à la densité relativement faible et aux vides résiduels dans l'échantillon, ainsi qu'à la possible présence d'eau non efficace mécaniquement dans ces vides, ce qui affaiblit la structure du sol sous charge.

III.7.4 Comparaison entre essai de proctor et essai T.vibration :

Graphe III.9 illustre la différence entre les résultats des essais réalisés selon les méthodes Proctor et table vibrante. On observe à partir des résultats une variation notable au niveau de la densité sèche maximale et de la teneur en eau optimale.

La densité sèche maximale (γ_d max) : diffère en raison de la variation de l'énergie appliquée dans chaque méthode de compactage. La méthode Proctor repose sur des coups réguliers et puissants, générant une pression directe sur les particules du sol, ce qui facilite leur réarrangement efficace et l'expulsion de l'air interstitiel. En revanche, la méthode utilisant la table vibrante dépend d'un ensemble de paramètres tels que

la durée, l'intensité des vibrations, la fréquence, ainsi que la masse appliquée sur le sol. Malheureusement, il n'a pas été possible d'estimer la valeur de l'énergie transmise dans cette méthode, faute d'informations précises sur l'intensité et la fréquence des vibrations, contrairement à la méthode Proctor où l'énergie de compactage est bien définie et quantifiable.

S'il avait été possible de déterminer avec précision la valeur de l'énergie appliquée par la table vibrante, nous aurions pu tracer les courbes Proctor et table vibrante en utilisant la même énergie dans les deux essais. Cela aurait permis une comparaison plus juste et plus rigoureuse entre les deux modes de compactage.

La grande différence observée au niveau de la teneur en eau optimale (w_{opt}) indique que la méthode de compactage par vibration nécessite une teneur en eau plus élevée pour permettre un réarrangement efficace des particules. En effet, l'eau joue ici un rôle de lubrifiant, réduisant les frottements entre les grains pendant la transmission des vibrations. En revanche, dans la méthode Proctor, les coups puissants sont suffisants pour assurer un bon compactage à une teneur en eau plus faible, et la perte d'énergie due à la dispersion de l'humidité a un impact moins significatif.

Dans le mode Proctor, on observe que la courbe de saturation atteint un niveau élevé sans toutefois le dépasser, ce qui reflète une bonne performance en termes de réduction des vides tout en maintenant un équilibre entre l'air et l'eau dans le sol. En revanche, la courbe obtenue par la méthode de vibration dépasse la ligne de saturation lorsque la teneur en eau excède 20 %, ce qui indique une présence excessive d'eau sans augmentation de la densité. Cela traduit une saturation excessive sans réel compactage effectif.

III.8 Conclusion :

En conclusion de ce chapitre, l'investigation expérimentale a permis de mieux comprendre le comportement du mélange sable-argile soumis à différentes méthodes de compactage, en mettant particulièrement l'accent sur la portance. Les résultats ont démontré que la méthode de compactage Proctor modifiée permet d'atteindre une densité sèche élevée et une meilleure portance (valeurs CBR plus élevées), ce qui traduit une bonne capacité de support des charges, rendant ce mélange adapté aux travaux de remblai et d'infrastructure. En revanche, la méthode de compactage par vibration a donné des résultats moins satisfaisants, nécessitant une teneur en eau plus élevée sans amélioration significative de la densité ni de la portance, en raison des vides résiduels et de la faible efficacité de l'énergie transmise. Par ailleurs, les essais d'identification ont révélé une teneur importante en carbonate de calcium dans l'argile, influençant sa cohésion et ses propriétés mécaniques. Ces résultats soulignent l'importance cruciale du choix de la méthode de compactage appropriée, en fonction de la nature du sol et de sa teneur en eau, afin d'assurer une portance optimale et une stabilité durable de la structure du sol.

Chapitre IV

Propositions de Mise en œuvre

IV.1 Introduction :

Dans ce chapitre, nous présentons une méthodologie de mise en œuvre des matériaux étudiés en laboratoire, en veillant à leur adaptation aux conditions réelles du terrain, notamment dans le contexte saharien de la région de Ghardaïa. La transposition des résultats expérimentaux vers le terrain prend en compte les contraintes pratiques, climatiques (fortes chaleurs, vents, sols secs) et logistiques. Une attention particulière est portée à la compréhension des propriétés des matériaux, aux conditions d'humidification ainsi qu'aux techniques de compactage, afin d'assurer la réussite des travaux de stabilisation et de portance sur des sols tels que les sables fins, les tufs ou les limons. Dans ce cadre, un mélange de 70 % sable et 30 % argile a été retenu comme solution de base, en raison de sa disponibilité locale et de ses performances prometteuses observées en laboratoire.

IV.2 Transposition des Résultats du Laboratoire au Chantier :

Les essais réalisés en laboratoire fournissent des indications précieuses sur le comportement des matériaux dans des conditions idéales et contrôlées. Cependant, leur transposition sur le terrain, notamment dans une région spécifique comme la wilaya de Ghardaïa, nécessite des ajustements rigoureux prenant en compte les réalités du chantier, les contraintes climatiques, la variabilité des sols locaux et les moyens techniques disponibles.

IV.2.1 Résultats obtenus en laboratoire :

Les essais de laboratoire les plus couramment utilisés dans les projets de terrassement sont :

- a) L'essai Proctor (normal ou modifié) : il permet de déterminer la masse volumique sèche maximale (γ_d max) et la teneur en eau optimale (w opt) qui assurent un compactage optimal.
- b) L'essai CBR (California Bearing Ratio) : mesure la portance d'un matériau compacté, utile pour le dimensionnement des couches de chaussée ou de plate-forme.
- c) L'analyse granulométrique : elle permet de classer les sols et d'évaluer leur aptitude au compactage selon la distribution des particules (argile, limon, sable, gravier).

Ces résultats sont fiables en laboratoire, mais ils ne tiennent pas compte des conditions environnementales réelles rencontrées à Ghardaïa, telles que les fortes chaleurs, les vents secs, et les variations d'humidité du sol naturel.

IV.2.2 Adaptation sur le chantier :

Sur le terrain, plusieurs adaptations sont nécessaires pour que les résultats issus des essais de laboratoire soient valides. Cela se fait par des essais in situ comme l'essai à la plaque, le densitomètre nucléaire ou à membrane, et le suivi de l'humidité naturelle.



Figure IV.1 : Essai à la plaque [50] .

Des recherches menées par Bentassa et Saadi (2023) à l'Université de Ghardaïa, sur le mélange de sable de dune avec des fines calcaires, ont montré que les caractéristiques obtenues en laboratoire, notamment la densité sèche maximale et le CBR, peuvent être effectivement atteintes sur site grâce à un ajustement précis de l'humidité et un contrôle rigoureux du compactage, même dans un climat saharien exigeant.

IV.2.3 Facteurs climatiques et hydriques :

Dans une région aride comme Ghardaïa, le climat saharien influe fortement sur l'humidification du sol. L'évaporation rapide peut faire chuter la teneur en eau en quelques heures, compromettant la qualité du compactage. Il est donc essentiel de [51] :

- a) Adapter l'arrosage du sol juste avant le compactage,
- b) Réaliser les travaux tôt le matin ou en fin de journée pour éviter les heures de forte chaleur,
- c) Protéger les zones préparées en les couvrant temporairement ou en les traitant rapidement.

IV.2.4 Importance du suivi et de l'ajustement :

une transposition réussie passe par [51] :

- a) Une vérification constante entre les données de laboratoire et les mesures in situ,

-
- b) Une réactivité sur le terrain pour ajuster la méthode de compactage, les engins utilisés, ou les proportions de matériaux,
 - c) La formation du personnel sur les techniques de mesure d'humidité et de contrôle de densité.

IV.2.5 Application concrète à Ghardaïa :

Dans la région de Ghardaïa, les sols présentent souvent des propriétés loessiques ou sablo-argileuses, avec une portance initiale faible. Grâce aux essais de laboratoire, il est possible d'identifier des mélanges optimisés (ex. : fines calcaire + sable) puis de valider leur efficacité sur site à travers un protocole rigoureux de compactage et de contrôle [51] .

Ainsi, la transposition n'est pas une simple reproduction des résultats du laboratoire, mais un processus dynamique d'ajustement, en interaction constante avec le terrain, les ressources disponibles, et les objectifs du projet.

IV.3 Préparation et Mélange des Matériaux :

IV.3.1 Types de matériaux à mélanger:

La région de Ghardaïa, située dans le nord du Sahara algérien, présente une géologie variée et riche en matériaux naturels exploitables pour les travaux de terrassement, de voirie et d'infrastructure. Ces matériaux sont généralement extraits de carrières locales situées dans des zones telles que Bounoura, El Atteuf et Zelfana. Leur utilisation est motivée par leur disponibilité, leur coût réduit, et leur adéquation, après traitement, aux normes techniques requises pour les projets de génie civil [52] .

Grave concassée : Extraite de roches dures, elle offre une excellente portance et stabilité. Utilisée principalement dans les couches de forme et de fondation, elle peut être mélangée à du sable ou du tuf pour ajuster la granulométrie et améliorer le compactage.

Tuf : Matériau pulvérulent calcaire, abondant mais peu porteur. Il est souvent stabilisé avec 2 à 5 % de ciment ou mélangé avec de la grave concassée pour créer une couche de fondation économique adaptée aux voiries à faible trafic.

Sable local : De granulométrie fine, il nécessite une stabilisation (par ajout de ciment, chaux ou tuf) pour améliorer ses propriétés mécaniques. Il est souvent intégré dans des mélanges sable-tuf ou sable-grave pour les couches de forme.

Argile concassée : Utilisée en faibles proportions pour corriger les courbes granulométriques ou enrichir un mélange en fines, notamment dans les formulations sable-tuf-argile. Un dosage contrôlé est essentiel pour éviter les effets de retrait.

Exemples de mélanges utilisés localement :

Sable + Tuf + Ciment : pour les plateformes compactées stabilisées (ex. : 2 % ciment).

Tuf + Grave : mélange économique pour couches de base.

Sable + Argile : en complément pour améliorer la cohésion dans les couches de forme.

Ces combinaisons permettent une valorisation optimale des ressources locales tout en répondant aux critères de portance et de durabilité des structures routières en climat saharien [52] .



Figure IV.1 : Stock de matériaux granulaires sur site dans la région de Ghardaia

IV.3.2 Techniques de malaxage sur site :

techniques disponibles, et des conditions logistiques. Trois principales méthodes sont observées dans la région de Ghardaïa :

a) Méthode manuelle

Utilisée dans les projets de petite envergure ou en zones difficiles d'accès (villages reculés, zones montagneuses ou vallées), cette méthode consiste à effectuer le mélange directement sur sol, à la pelle ou à l'aide de moyens rudimentaires. Bien que peu coûteuse, elle présente une faible homogénéité du mélange et un rendement limité [52].

b) Malaxeur à béton ou mini-centrale mobile

Pour les projets de taille moyenne, cette solution offre un bon compromis entre qualité du mélange et mobilité. Elle permet de réaliser des mélanges plus homogènes et de mieux contrôler les proportions de matériaux et d'eau, notamment lors de la stabilisation au ciment ou à la chaux.



Figure IV.2 : Malaxeur de béton [52]

c) Centrale sèche avec arrosage ultérieur

Dans les projets de grande envergure (routes, plateformes logistiques, zones industrielles), l'utilisation de centrales sèches permet de préparer les matériaux en vrac, auxquels on ajoute l'eau ultérieurement par camion-citerne. Cette technique nécessite une synchronisation rigoureuse entre le malaxage, le transport et le compactage pour éviter le dessèchement prématuré du mélange [52].

IV.3.3 Ajout et gestion de l'eau :

L'ajustement de l'humidité dans les mélanges granulaires ou stabilisés est un facteur déterminant de la qualité du compactage. Dans le climat saharien de Ghardaïa, la gestion de l'eau est particulièrement délicate en raison :

De l'évaporation rapide, qui réduit la fenêtre optimale de mise en œuvre

De la rareté de la ressource, qui oblige à recourir à des camions-citernes ou à des puits forés à proximité du site ;

Du besoin d'un ajustement progressif, souvent réalisé en plusieurs passes, pour atteindre la teneur en eau optimale (OMC – Optimum Moisture Content) sans dépasser le point de saturation.

Une mauvaise gestion de l'eau peut entraîner une baisse de la densité obtenue après compactage, une perte de portance, ou au contraire une saturation excessive, nuisible à la stabilité du mélange. Il est donc essentiel de coordonner étroitement les opérations de malaxage, de transport, de mise en œuvre et de

compactage [52].

IV.4 Mise en place et compactage des matériaux:

IV.4.1 Transport et épandage:

Le transport des matériaux depuis la carrière ou la centrale de malaxage vers le site est une étape cruciale.

Il dépend principalement de :

La distance entre le point d'approvisionnement et le chantier, La nature du terrain (accès difficile, sols meubles ou en pente),

Les conditions climatiques, notamment les températures élevées, qui imposent des délais restreints avant mise en œuvre pour éviter le dessèchement du matériau [53].

a) Estimation du volume requis :

Pour une plateforme de 2 000 m² avec une épaisseur de 20 cm, il faut environ 400 m³ de matériau, soit entre 50 et 60 rotations de camions de 6 à 8 tonnes chacun, en fonction de la densité du matériau transporté (~1,5 à 1,8 t/m³)[53].

b) Techniques d'épandage :

L'épandage s'effectue selon la configuration du site :

Manuellement dans les zones étroites, difficiles d'accès ou en pente, À la niveleuse pour les grandes surfaces planes,

À la pelle mécanique équipée d'un godet orientable pour les zones confinées.

Remarque : dans des zones venteuses comme Mansoura ou Sebseb, il est recommandé d'humidifier légèrement la surface avant épandage pour limiter l'envol des particules fines.

IV.4.2 Compactage :

Le compactage vise à réduire la porosité du matériau, augmenter sa densité et améliorer ses propriétés mécaniques. Il doit être effectué immédiatement après l'épandage pour garantir une efficacité maximale, notamment dans un climat chaud et sec [53].

a) Engins de compactage utilisés :

Rouleau lisse (pour couches granulaires fines ou sablonneuses), Rouleau pied de mouton (adapté aux sols cohésifs ou argileux),

Plaque vibrante/dame vibrante (pour petites surfaces ou zones confinées).



Figure IV.3 : Rouleau de compactage dans la région de Ghardaia [53]

b) Procédure de compactage :

Compactage en passes successives (généralement entre 3 et 5 passes),

Vérification de la densité après chaque passe à l'aide :

De la méthode Proctor modifié (comparaison avec la densité de référence),

Ou d'un densitomètre nucléaire ou à membrane (mesure in situ immédiate).

Il est recommandé de réaliser un suivi différé (24 à 72 heures après) afin de vérifier la stabilisation du compactage, surtout en cas de variations d'humidité.

IV.4.3 Facteurs influençant la qualité du compactage :

La réussite du compactage dépend de plusieurs facteurs environnementaux et opérationnels[53] :

a) Conditions climatiques :

La pluie peut saturer les couches et empêcher un compactage efficace,

La sécheresse favorise un sol trop sec, souvent en dessous de la teneur en eau optimale.

b) Correction de la teneur en eau :

Arrosage contrôlé des couches si le sol est trop sec,

Séchage à l'air libre ou à l'aide de passages répétés si le sol est trop humide.

c) Fréquence et méthode de contrôle :

Contrôle continu avec densitomètre pendant l'avancement du chantier,

Contrôle différé après quelques jours pour observer d'éventuelles pertes de densité dues à des phénomènes de retrait ou d'évaporation.

IV.4.4 Contrôles sur site :

Le contrôle qualité sur chantier constitue une étape essentielle pour vérifier la conformité des travaux de mise en œuvre avec les spécifications techniques issues des essais de laboratoire. Dans le contexte saharien de la région de Ghardaïa, ces contrôles prennent une importance accrue en raison des contraintes climatiques, hydrologiques et géotechniques particulières [51].

IV.4.4.1 Méthodes de contrôle utilisées à Ghardaïa :

En raison des conditions extrêmes (sécheresse, chaleur, vents, sols meubles), les contrôles doivent être rigoureux, fréquents et adaptés au contexte local

a) Densité in situ :

mesurée selon différentes méthodes, notamment :

Méthode de la boîte de sable (NF P 94-061) — adaptée aux matériaux non saturés,

Densitomètre nucléaire (AFNOR NF P 94-061-2) , lorsque disponible, pour des mesures instantanées et fiables.

b) Teneur en eau :

Évaluée par prélèvement d'échantillons et séchage à l'air libre ou en étuve ($105^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$),

Ce paramètre est fondamental pour confirmer la compatibilité avec la teneur en eau optimale définie par l'essai Proctor [51].

c) Portance :

Vérifiée à l'aide d'un essai à la plaque de charge (NF P 94-117-1) pour déterminer le module de déformation,

Utilisation de pénétromètres dynamiques légers pour un suivi rapide, notamment en zone de voirie urbaine

Remarque : une humidification ou un séchage partiel du sol peut être nécessaire sur place pour atteindre des valeurs de densité conformes aux exigences de compactage [51].

IV.4.4.2 Comparaison avec les résultats de laboratoire :

Les résultats obtenus sur site doivent être confrontés à ceux du laboratoire afin d'évaluer l'efficacité de la mise en œuvre :

Masse volumique sèche : comparée à la valeur optimale déterminée par l'essai Proctor (normal ou modifié). Une différence supérieure à 5 % peut nécessiter un recompactage.

Indice CBR in situ : bien que souvent inférieur à celui du laboratoire, il doit rester dans les limites acceptables pour garantir une bonne portance.

Granulométrie post-mélange : un contrôle ponctuel après malaxage permet de vérifier l'homogénéité du mélange, et d'identifier d'éventuelles dérives (appauvrissement en fines, ségrégation des grains).

IV.4.4.3 Suivi différé et besoins de recompactage :

La stabilisation des sols ne se produit pas instantanément après le compactage. Un suivi différé à 48 h ou 72 h est souvent requis pour :

Observer des éventuels phénomènes de retrait ou gonflement différé (notamment en présence d'argiles ou d'eau souterraine),

Vérifier la conservation des propriétés mécaniques en l'absence de circulation ou de surcharge immédiate,

Décider si un recompactage localisé est nécessaire, particulièrement dans les zones sensibles aux infiltrations souterraines (vallées, oueds, talwegs).

IV.5 Approvisionnement et Logistique :

La gestion efficace de l'approvisionnement et de la logistique constitue un pilier fondamental de la réussite d'un chantier de terrassement ou de stabilisation. Elle permet non seulement de garantir la continuité du travail, mais aussi d'assurer la qualité des matériaux mis en œuvre et le respect des délais contractuels [54].

IV.5.1 Approvisionnement :

L'approvisionnement des matériaux doit faire l'objet d'une planification rigoureuse prenant en compte les contraintes géographiques, climatiques, et opérationnelles du chantier. En particulier dans les régions arides, comme celle de Ghardaïa, où la distance entre les sources d'extraction et le site peut affecter directement la fraîcheur et l'humidité des matériaux [54].

a) Organisation des livraisons :

L'acheminement des matériaux (graves, sables, argiles, tufs) repose généralement sur une flotte de camions-bennes (6x4 ou 8x4) adaptés aux terrains difficiles et sablonneux.

Un planning journalier des rotations est établi pour :

Assurer une alimentation continue du chantier,

Éviter les temps morts entre livraison, épandage et compactage,

Coordonner l'arrivée des matériaux avec la disponibilité des équipes et des engins.

b) Stockage sur site :

Les matériaux doivent être stockés dans des zones planes, sèches et bien drainées, éloignées de toute source de contamination (huiles, déchets...)[54].

Si possible, des zones de stockage couvertes ou protégées par des bâches sont mises en place afin de préserver l'humidité des matériaux fins ou argileux,

très sensibles au dessèchement ou à l'érosion éolienne.

Il est également recommandé de procéder à un prélèvement de contrôle sur les matériaux stockés (granulométrie, humidité) avant malaxage ou mise en œuvre.

IV.5.2 Centrale et équipements

Le choix et l'organisation de l'équipement de production et de malaxage doivent être adaptés à la nature du projet (volume, durée, isolement du site) et aux exigences de qualité du matériau compacté [54].

a) Type de centrale utilisée :

Les centrales sèches assurent un malaxage à sec des composants solides, l'eau étant ajoutée manuellement ou séparément lors de l'épandage.

Les centrales humides permettent un mélange homogène eau/matériau, avec un dosage contrôlé de l'humidité, ce qui est idéal pour respecter la teneur en eau optimale définie au laboratoire.

b) Dosage de l'eau :

L'un des paramètres les plus critiques est le contrôle précis de la teneur en eau, qui influence directement la compacité et la portance du sol.

Des systèmes de dosage automatique (dans les centrales humides) ou des arrosages manuels contrôlés (dans les centrales sèches) sont utilisés en fonction des moyens disponibles.

En environnement chaud et sec, des ajustements fréquents sont requis pour compenser les pertes par évaporation [54].

c) Réservoirs et dispositifs auxiliaires :

La mise en place de réservoirs d'eau mobiles de grande capacité (6 000 à 10 000 litres), ou de camions-citernes, est indispensable pour alimenter les centrales, humidifier les couches, et nettoyer les équipements. [54].

Pour les chantiers isolés, il est courant d'utiliser des malaxeurs tractés ou autonomes, pouvant être déplacés facilement d'un point à un autre.

IV.6 Autres procédés d'amélioration de la portance :

Dans la construction routière, la portance des sols constitue un paramètre fondamental influençant la durabilité et la performance de la chaussée. Lorsque la nature du sol ne permet pas d'assurer un support adéquat, plusieurs techniques d'amélioration sont mobilisées. Parmi celles-ci, la stabilisation aux liants hydrauliques et l'utilisation des géotextiles représentent des solutions éprouvées, particulièrement adaptées aux conditions géotechniques et climatiques des régions semi-arides.

IV.6.1 Stabilisation aux liants (ciment, chaux) :

Les sols limoneux et argileux, fréquents dans de nombreuses zones alluviales, sont caractérisés par une faible portance naturelle due à leur structure fine et leur forte sensibilité à l'humidité. La stabilisation chimique par ajout de liants hydrauliques vise à modifier physiquement et chimiquement cette structure [46].

Réactions chimiques : Le ciment et la chaux réagissent avec les silicates et aluminosilicates contenus dans les argiles, conduisant à la formation de composés cimentaires (calcium silicate hydrate - CSH, calcium aluminate hydrate - CAH) qui rigidifient le matériau traité.

Modification physique : Le liant diminue la plasticité du sol, réduit sa compressibilité et améliore la cohésion entre particules [47].

Cette double action transforme un sol naturellement faible en un matériau semi-rigide, capable de supporter des charges mécaniques importantes.

Paramètres techniques essentiels.



Figure IV.4 : Sac de ciment pour travaux de stabilisation [49].

Pourcentage de liant : Typiquement entre 1% et 3% en poids du sol, selon la nature du terrain et la résistance recherchée.

Un dosage excessif peut induire des fissures dues à la rigidité excessive, tandis qu'un dosage trop faible ne garantit pas une amélioration significative.

Contrôle de l'humidité : La teneur en eau doit être proche de l'optimum Proctor modifié pour permettre un compactage efficace [47].

Une humidité insuffisante entrave la réaction chimique, alors qu'un excès empêche un compactage correct.

Temps de traitement : Le compactage doit impérativement s'effectuer dans un délai maximal de 2 heures après incorporation du liant, avant le durcissement initial.

Un retard au-delà de ce délai peut entraîner une mauvaise homogénéité et un affaiblissement de la structure traitée [47] .

Méthodologie de mise en œuvre

Préparation du site : Débroussaillage, nivellement et décapage éventuel des terres végétales.

Épandage du liant : Distribution régulière du ciment ou de la chaux à l'aide de matériel adapté (épandeur, gylly).

Mélange et malaxage : Utilisation de fraiseuses ou malaxeurs mécaniques pour assurer une incorporation complète.

Contrôle de l'humidité : Application d'eau pour ajuster la teneur si nécessaire.

Compactage : Exécution immédiate à l'aide de rouleaux lourds (vibrants, pneumatiques ou statiques) pour atteindre la densité requise. Curing : Protection de la surface contre la dessiccation prématurée (arrosage ou couverture) [47].

Avantages et limites :

a) Avantages :

Amélioration durable et significative de la portance,
Réduction des risques d'affaissement différentiel,
Résistance accrue aux cycles hydriques et thermiques,
Utilisation de matériaux locaux et réduction des déblais. [47]

b) Limites :

Nécessite un contrôle rigoureux en chantier,
Sensibilité aux conditions météorologiques (pluie, chaleur excessive),
Coût supplémentaire lié à l'achat des liants et à la machinerie [47].

IV.6.2 Utilisation de géotextiles :

a) Nature et propriétés des géotextiles

Les géotextiles sont des matériaux textiles synthétiques tissés ou non tissés, conçus pour renforcer les sols et assurer une meilleure gestion des interfaces entre couches géotechniques [49].



Figure IV.5 : Le techniques de la stabilisation par géotextiles [48] .

b) Types :

Géotextiles tissés (à forte résistance mécanique),

Géotextiles non tissés (à haute perméabilité et filtration) [49].

c) Propriétés fonctionnelles :

Résistance à la traction, perméabilité, stabilité chimique, résistance à la dégradation biologique.

Mécanismes d'amélioration de la portance [49] .

d) Renforcement :

Le géotextile agit comme une membrane résistante à la traction, limitant les déformations latérales et augmentant la résistance au cisaillement des sols sous-jacents.

e) Séparation :

Empêche le mélange des couches granulaires de granulométrie différente (par exemple, entre sols fins et couche de forme), ce qui préservera les caractéristiques mécaniques initiales de chaque couche [49] .

f) Filtration et drainage :

Permet le passage de l'eau tout en retenant les particules fines, ce qui prévient le pompage capillaire et les phénomènes d'érosion interne [49].

g) Positionnement :

Le géotextile est déployé sur la plateforme préparée, avant l'épandage de la couche de forme ou du matériau granular [49].

h) Fixation :

Selon la pente et les conditions, fixation mécanique ou lestage pour éviter le déplacement lors de la mise en œuvre [48].

i) Recouvrement :

Recouvrement des lés avec chevauchement suffisant (généralement 30 cm) pour assurer la continuité du renforcement.

Effets mesurés sur la portance

Amélioration de la résistance au cisaillement mesurée en laboratoire et sur site,

Diminution significative des tassements différenciés sous charge dynamique,

Prolongement de la durée de vie des couches structurales en limitant la dégradation liée à la saturation en eau [48].

L'amélioration de la portance des sols, notamment pour des mélanges composés de 70 % de sable et 30 % d'argile, peut être efficacement réalisée par stabilisation chimique ou par renforcement mécanique à l'aide de géotextiles. Ces procédés apportent des solutions adaptées aux contraintes géotechniques spécifiques des régions arides et semi-arides. Le choix entre ces techniques dépendra principalement de la nature exacte du sol, des exigences techniques du projet, des contraintes budgétaires ainsi que des conditions environnementales locales.

IV.7 Recommandations Techniques pour la Mise en Œuvre des Travaux :

Pour garantir la qualité, la durabilité et l'efficacité des travaux de construction et d'amélioration des plateformes dans la région de Ghardaïa, il est essentiel d'adopter des recommandations techniques adaptées aux caractéristiques spécifiques des sols locaux, notamment le mélange composé de 70 % de sable et 30 % d'argile. Ce type de sol présente des comportements particuliers qui influencent directement les méthodes de mise en œuvre.

a) Gestion de l'humidité et apport en eau :

Le mélange sable-argile à 70/30 nécessite un contrôle rigoureux de l'humidité, car

La présence de 30 % d'argile confère au sol une certaine plasticité et sensibilité à l'eau,

Un taux d'humidité insuffisant peut provoquer une mauvaise cohésion et un compactage inefficace,

Une humidité excessive peut entraîner un affaiblissement par saturation.

Il est donc primordial de prévoir une marge de correction d'eau sur site, permettant d'ajuster précisément la teneur en eau pour atteindre les conditions optimales de compactage et de stabilité, en particulier dans le climat sec et chaud de Ghardaïa.

b) Choix et adaptation des engins de chantier

Le mélange 70 % sable - 30 % argile présente une granulométrie hétérogène qui exige :

L'utilisation d'engins compatibles avec la finesse de l'argile, tels que des compacteurs vibrants ou pneumatiques qui évitent la désagrégation excessive du sol,

Des équipements capables de garantir une homogénéité dans le malaxage, afin d'assurer une bonne répartition de l'argile dans le sable,

Une cadence adaptée à la nature fine et cohésive du mélange, pour éviter les effets de surcompactage ou de délamination.

c) Organisation temporelle des travaux

Pour le mélange sable-argile, les travaux doivent être planifiés en tenant compte de :

La sensibilité du sol à la dessiccation rapide sous les fortes chaleurs,

La nécessité d'exécuter les interventions en demi-journées pour éviter les pics thermiques,

La prise en compte des temps de réaction rapide lors de la stabilisation chimique éventuelle.

d) Pilotage et essais préalables

Avant toute généralisation, il est indispensable de réaliser des essais pilotes spécifiquement sur ce type de mélange pour :

Déterminer le dosage optimal des liants (ciment, chaux) qui améliore la portance sans compromettre la flexibilité,

Ajuster la teneur en eau optimale pour un compactage maximal,

Valider la résistance mécanique et la durabilité dans les conditions réelles de terrain.

e) Contrôles post-compactage et maintenance

Le comportement différencié des sols sableux-argileux nécessite :

Des contrôles réguliers de la densité et de l'uniformité après compactage,

Une surveillance accrue des éventuels tassements différenciés dus à la plasticité de l'argile,

La mise en place d'interventions correctives rapides pour garantir la stabilité à long terme.

En intégrant ces recommandations spécifiques au mélange 70 % sable et 30 % argile, les travaux à Ghardaïa bénéficieront d'une meilleure maîtrise technique, adaptée aux caractéristiques particulières des sols locaux et aux contraintes climatiques, assurant ainsi une portance optimale et une durabilité prolongée des infrastructures.

IV.8 Conclusion :

La mise en œuvre des matériaux dans les projets de construction, notamment dans la région de Ghardaïa au climat saharien, nécessite une adaptation rigoureuse des paramètres établis en laboratoire aux conditions réelles du site. Le contrôle de l'humidification, du malaxage et du compactage constitue une étape essentielle pour garantir la qualité des résultats, en particulier lorsqu'il s'agit de mélanges locaux tels que 70 % de sable et 30 % d'argile, qui exigent un équilibre précis entre l'humidité et la cohésion afin d'assurer une portance optimale. De plus, la réalisation d'essais préliminaires in situ, une planification logistique efficace et un suivi permanent représentent des facteurs clés pour assurer la stabilité et la durabilité des ouvrages dans ce contexte géographique et géotechnique particulier.

Conclusion Générale

Conclusion :

La faible capacité portante des sols naturels dans les zones sahariennes, comme la wilaya de Ghardaïa, constitue un obstacle majeur à la durabilité des infrastructures routières. Pour surmonter cette problématique, cette étude a proposé une solution basée sur l'utilisation des ressources locales, à travers un mélange composé de 70 % de sable de Sebseb et 30 % d'argile de Bouhraoua. L'objectif principal était d'identifier la méthode de compactage la plus efficace afin d'améliorer les propriétés géotechniques de ce mélange, tout en valorisant les matériaux disponibles localement.

Au chapitre III, une série d'essais de laboratoire a été réalisée pour évaluer l'impact de deux techniques de compactage : le Proctor modifié et la table vibrante. Les résultats ont montré que:

La méthode Proctor modifié a permis d'atteindre une densité sèche maximale de $1,98 \text{ g/cm}^3$ et un indice CBR de 7,02 %, traduisant une amélioration notable de la portance du sol.

En comparaison, la table vibrante a donné une densité sèche maximale plus faible ($1,69 \text{ g/cm}^3$) à une teneur en eau plus élevée (20 %), avec un indice CBR compris entre 4 % et 5 %. Cela s'explique par une énergie de compactage moins concentrée et la granulométrie uniforme du sable, qui limite le réarrangement efficace des particules.

La comparaison entre les deux méthodes a donc mis en évidence la supériorité du Proctor modifié, notamment dans les milieux arides où le contrôle de l'humidité est difficile. Toutefois, le compactage vibratoire pourrait être envisagé dans certains cas particuliers si les conditions d'humidification et l'équipement sont bien maîtrisés.

Au chapitre IV, les résultats ont été transposés au contexte réel de chantier, avec des recommandations pratiques telles que le contrôle strict de l'humidité, le choix adapté des engins, et la réalisation d'essais in situ (densité, portance, humidité). L'étude a également souligné l'apport potentiel de techniques complémentaires, comme l'ajout de liants hydrauliques (chaux, ciment) ou l'utilisation de géotextiles, afin de renforcer davantage la stabilité du sol.

Cependant, cette étude présente certaines limites. Les essais ont été effectués en laboratoire, dans des conditions contrôlées, ce qui ne reflète pas totalement les contraintes du terrain (sécheresse, vent, variabilité des sols). De plus, l'énergie exacte transmise par la table vibrante n'a pas pu être mesurée, ce qui limite la précision de la comparaison avec la méthode Proctor.

Pour les perspectives futures, il serait pertinent de:

Tester les mélanges stabilisés sur chantier dans des conditions climatiques réelles

Étudier le comportement à long terme des sols compacté

Optimiser le dosage des liants afin d'améliorer la portance sans excès de rigidité

Expérimenter des techniques de compactage à haute énergie ou alternatives (compactage dynamique, plaques vibrantes portatives, etc.).

En conclusion, cette étude confirme que la combinaison judicieuse de matériaux locaux abondants et d'une méthode de compactage appropriée permet d'obtenir un sol amélioré et stable.

Cela ouvre des perspectives prometteuses pour la réalisation de chaussées économiques et durables dans les zones sahariennes, sans dépendre de matériaux importés coûteux .

Références bibliographiques

Références:

- [1] ASTM International. (2012). Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil (ASTM D698 & D1557).
- [2] Braja M. Das. (2016). Principles of Geotechnical Engineering.
- [3] Code des marchés publics – Ministère des Transports.
- [4] Lambe, T. W., & Whitman, R. V. (1969). Soil Mechanics.
- [5] SETRA. (2000). Guide Technique sur le Compactage des Matériaux.
- [6] Terzaghi, K., Peck, R. B., & Mesri, G. (1996). Soil Mechanics in Engineering Practice.
- [7] Fahmi, M. (2005). Manuel Pratique des Matériaux Routiers.
- [8] Jalal Arefa. (2007). Étude sur le compactage des sols.
- [9] Rahmouni, O. E., Saidi, M., & MOULAY, O. (2016). Caractérisation Mécanique De L'optimum Proctor Modifié d'un Mélange Tuf-Sable De Dune-Argile (Doctoral dissertation, Université Ahmed Draya-Adrar).
- [10] Ahmed, B. O. U. K. H. A. R. I. (2024). Mécanique des sols.
- [11] Mansouri, T. (n.d.). *Mécanique des sols 3*. https://staff.univ-batna2.dz/sites/default/files/mansouri_tarek/files/mds3.pdf.
- [12] Bourges, A. (2010). Mécanique des sols et fondations. Éditions Eyrolles.
- [13] Delage, P., & Garnier, J. (2002). Mécanique des sols – Application aux ouvrages de génie civil. Presses de l'ENPC.
- [14] AFNOR (1990). NF P 94-061 : Sols – Essai Proctor.
- [15] Bachelez, J., & Leroux, C. (2015). Le guide du terrassement. CSTB Éditions.
- [16] LCPC-SETRA (2000). Guide des terrassements routiers. Éditions du LCPC.
- [17] Bachelez, J., & Leroux, C. (2015). *Le guide du terrassement*. CSTB Éditions.
- [18] Sétra. (1996). *Sécurité sur les chantiers routiers – Guide technique*. Ministère de l'Équipement.
- [19] France Espace Vert. (n.d.). *Nettoyage et débroussaillage de terrains à Bruges pour une société de construction*. France Espace Vert. <https://www.franceespacevert.fr/details-nettoyage+et+debroussaillage+de+terrains+a+bruges+pour+une+societe+de+construction-95>.
- [20] John Deere. (s.d.). *Opérations de nivellement et équipements de construction*. Consulté le 8 avril 2025, sur <https://www.deere.ca/assets/images/common/gf-grading-hero-large-1366x768.png>
- [21] Plant Care for Beginners. (s.d.). *Comment faire pour retenir l'eau dans les sols*. Récupéré le 8 avril 2025, de <https://francais.plantcareforbeginners.com/conseils/comment-faire-pour-retenir-eau-sols>
- [22] Author Unknown. (n.d.). *8Compactage_cours-routes_procedes-generaux-de-construction (2)*. Chapitre 7, Compactage, Théorie du Compactage, Méthode pratique GTR.
- [23] Université de Tanta. (s.d.). Compactage du sol. Faculté d'ingénierie, Université de Tanta. Récupéré de <https://tg.tanta.edu.eg/admin-cp/uploads/compaction.pdf>
- [24] Bouafia, A. et al. (2017) – *Étude sur les applications du compactage dans les sols désertiques*.
- [25] Bensaidi, M. (2019) – *Optimisation des paramètres de compactage pour les sols argileux* (Université de Chlef).
- [26] Université de Blida (2021) – *Technique RIC (Rapid Impact Compaction) en milieu urbain*.
- [27] Université de Constantine (2019) – *Applications haute énergie dans les aéroports*.
- [28] Université d'Annaba (2018) – *Utilisation du motif en grille dans les chemins de fer*.
- [29] Université d'Oran (2020) – *Défis de la profondeur du compactage dynamique*.
- [30] Mitchell, J. K. (1976). *Fundamentals of Soil Behavior*. Wiley.
- [31] Bjerrum, L., & al. (1967). Application of electro-osmosis in stabilizing soft clays. *Geotechnique Journal*.
- [32] Karol, R. H. (2003). *Chemical Grouting and Soil Stabilization*. CRC Press

- [33] BAAMAR, A., & MAHLALI, A. (2023). Fabrication des Briques de Terre Comprimées Stabilisées (BTCS) - Application des matériaux de la région de Timimoun (Mémoire de fin d'études, Université Ahmed Draïa - Adrar).
- [34] Stabilisation des sols gonflants – Mémoire de fin d'études, Université Abderrahmane Mira – Béjaïa, disponible sur : www.memoireonline.com
- [35] Bendaoud, A., & Mazouzi, M. (2022). Étude expérimentale de la stabilisation des sols argileux par la chaux et le ciment [Mémoire de Master, Université 8 Mai 1945 - Guelma]. DSpace Université de Guelma.
- [36] Anonyme. (s.d.). *Essais Proctor – Compactage des sols* [Document PDF]. Scribd. <https://fr.scribd.com/doc/304897449/Proctor>
- [37] Boukhelkhal, M., & Maameri, M. (2019). Étude géotechnique d'un site destiné à la réalisation d'un projet de construction [Mémoire de fin d'études, Université Ziane Achour – Djelfa]. DSpace Université de Djelfa. http://dspace.univ-djelfa.dz:8080/xmlui/bitstream/handle/123456789/1130/ch7.etude-geotechnique_CORR.pdf?sequence=9&isAllowed=y
- [38] L'étude de Hazzab et al. (2018) sur les loess de Ghardaïa met en évidence cette difficulté.
- [39] L'étude de Hazzab et al. (2018) sur les loess de Ghardaïa met en évidence cette difficulté.
- [40] Belarbi, M., & Touahria, M. (2024). Amélioration du compactage des sols loessiques en zone aride. Mémoire de Master, Université de Biskra
- [41] Ouali, A. (2020). Contribution à l'amélioration du compactage des sols pour les routes en Algérie. Université de Constantine
- [42] Nader, S. (2020). Évaluation de la compaction du sol et de son effet sur les valeurs CBR pour la conception des routes. Université d'Alger, Faculté de Génie Civil.
- [43] Bouhadou, A. (2019). Étude des tests de Proctor et CBR pour la conception des sous-couches de routes. Journal d'Ingénierie Civile, 15(3), 78-82.
- [44] Sellam, M., & Hammou-Tani, A. (2016). Compactage à sec pour les projets routiers en zones arides (Mémoire de Master, Université Abou Bekr Belkaid – Tlemcen, Algérie).
- [45] ASTM International. (2021). Standard test method for preparation and determination of the relative density of asphalt mix specimens by means of the gyratory compactor (ASTM D6925-21). West Conshohocken, PA : ASTM International.
- [46] Azouz, F. Z. (2006). Contribution à l'étude de la stabilisation chimique de quelques argiles gonflantes de la région de Tlemcen [Mémoire de master, Université de Ghardaïa]. ResearchGate. <https://www.researchgate.net/publication/374914605>
- [47] Azzouz, F. Z. (2017). Caractérisation physique et mécanique de mélanges argile-sable de dune destinés à la réalisation des couches compactées en région arides de l'Algérie [Mémoire de master, Université non spécifiée].
- [48] Rachedi, H., & Bedoui, S. (2021). Étude expérimentale sur comportement des mélanges optimaux sable dune-argiles au cisaillement direct traité au ciment et renforcé au géotextile [Master's thesis, Université de Ghardaïa].
- [49] Guessoum, H., & Hebal, F. (2023). *Influence des trois types de géotextiles sur les paramètres des gonflement libre pour d'un mélange optimal 70% sable de dune de Sebseb et 30% argile de Metlili El Djadida - région de Ghardaïa*. Université de Ghardaïa, Département de Hydraulique et Génie Civil.

AFNOR :

Analyse Granulométrique (afnor NF P94-056).

Bleu de méthylène (Norme NF 94-068).

Essai Proctor (normal & modifié) (Norme NF P 94-093).

Limites d'Atterberg (Norme NF-P-94-051).

Essai de cisaillement direct (AFNOR NF P 94-071-1. (1994b))

Équivalent de sable. (AFNOR NF EN 933-8+A1. (2015))

Essai de perméabilité (AFNOR NFX 30-441)

Essai CBR (AFNOR NF P94-078)

[50] Lanisol. (n.d.). Essai à la plaque de charge. Lanisol Laboratoire. Consulté en mai 2025, à l'adresse : <https://lanisol.com/article-essai-a-la-plaque>.

. [51] Bentassa, S., & Saadi, N. (2023). Influence de l'ajout des fines calcaire sur certaines caractéristiques géotechniques du sable de dune – Application à la technique routière saharienne [Mémoire de Master, Université de Ghardaïa]. DSpace Université de Ghardaïa.

. [52] Kebaili, M., Boucherba, M., & Bouaka, W. (2013). Caractérisation géotechnique des matériaux de la région de Ouargla [Mémoire de master, Université Kasdi Merbah – Ouargla]. DSpace Université de Ouargla. <https://dspace.univ-ouargla.dz/jspui/handle/123456789/1590>

[53] SETRA. (2000). Guide Technique sur le Compactage des Matériaux.

[54] LCPC-SETRA (2000). Guide des terrassements routiers. Éditions du LCPC.

Annexes

ANNEXE1 : Méthylène sable de dune

Prise D’essai Mh =100 g		
Calcul de la Teneur en Eau		
Tare N°	5	8
PT	117.66	116.84
Ph+T	198.18	218.54
PS+T	198.11	218.43
ps	80.45	101.59
W (%)	0.09	0.11
W _{moy}	0.10	
Ps=ph×100 / 100 +w (%)		
PS = 99.90		

Volume de bleu injecte dans la prise d’essai V = 05 cm³

Valeur au bleu de la prise d’essai passant a :

V_b= V/M_s = 5 / 99.90 =0.05

ANNEXE 2 : Essai Equivalent de sable de dune

		Essai n° 1	Essai n° 2	Moyenne
Sable de dune	h_1 (cm)	11.10	11.00	54.65
	h_2 (cm)	6.20	5.90	
	$ES = \frac{h_2}{h_1}$	55.85	53.44	

ANNEXE3 : Essai volume et bleu de méthylène d'argile Bouhraoua

PRISE D'ESSAI $M_h = 30\text{grs}$				VOLUME DE BLEU INJECTE DANS LA PRISE				
CALCUL DE LA TENEUR EN EAU				D'ESSAI $V = 80 \text{ cm}^3$				
TARE N°	C		Z					
PH+T	122,21		116,6	VALEUR AU BLEU DE LA PRISE D'ESSAI				
PS+T	265,7		261,57	PASSANT A :				
PT	261,54		257,39					
Ps	139,33		140,79	$VB = \frac{V}{Ms} = \frac{80}{29.13} = 2.75$				
W (%)	2.99		2.97					
$W_{\text{moy}}(\%)$	2.98							
CALCUL DE LA MASSE SECHE DE LA								
PRISE D'ESSAI M_s :				$VB_t = \frac{VB \times \% t}{100}$				
$W \% = \frac{Ph - Ps}{Ps} \cdot 100 = 2.98\%$								
$Ps = \frac{Ph \times 100}{100 + W\%} = 29.13 \text{ grs}$								

ANNEXE 4 : Limite d'Atterberg (LIMITE DE PLASTICITE)

	1 ^{er} Essai		2 ^{ème} Essai		3 ^{ème} Essai	
N° de la tare	S3		F3		X10	
Poids total humide	36,44		36,7		36,96	
Poids total sec	36,17		36,44		36,65	
Poids de la tare	35,16		35,47		35,5	
Poids de l'eau	0,27		0,26		0,31	
Poids du sol sec	1,01		0,97		1,15	
Teneur en eau (%)						
Moyenne	26.73		26.80		26.96	
LP = 26.83						

ANNEXE 5 : ANALYSE SEDIMENTOMETRIQUE

Température ° C	Temps	Durée de chute	$R' = R - \frac{1000}{R}$ R : lecture au densimètre	Correction (C)	Lecture corrigée $R1 = R' + C$ Ou $R1 = R' - C$	Diamètre (D)	% des éléments (D) sur l'ensemble de l'échantillon
22C°	8h25	30 "	15	+0.380	15.380	0.075	80
22C°	8h26	01'	14	+0.380	14.380	0.055	75
22C°	8h27	02'	14	+0.380	14.380	0.038	75
22C°	8h30	05'	14	+0.380	14.380	0.025	75
22C°	8h35	10'	14	+0.380	14.380	0.017	75
22C°	8h45	20'	13	+0.380	13.380	0.012	70
22C°	9h05	40'	12.5	+0.380	12.880	0.008	67
22.6C°	9h45	80'	12	+0.500	12.500	0.006	65
22.6C°	11h05	160'	11	+0.500	11.500	0.004	60
22.6C°	13h45	320'	09	+0.500	9.500	0.003	49
21.80C°	24 h	1440'	06	+0.342	6.342	0.002	33
20C°	48h	-	04	0.000	4.000	0.001	21
20C°	72 h	-	02	0.000	2000	0.0005	10

ANNEXE 6 : ANALYSEGRANULOMETRIQUE DE SABLE

Poids De	Tamis	Poids Refus	Poids refus	Poids refus	Complément	Tamisat
<i>L'Echantillon</i>	(mm)	Partiels	Cumulés	cumulés	à 100	(%)
(g)		(g)	(g)	(%)		
	200					
	100					
	80					
	50					
	31.5					
	20					
	10	0.00	0.00	0.00	100.00	100
500	5	4.20	4.20	0.84	99.16	99
	2	35.30	39.50	7.90	92.10	92
	1	23.63	63.13	12.63	87.37	87
	0.4	20.11	83.24	16.65	83.35	83
	0.2	12.05	95.29	19.06	80.94	81
	0.1	7.09	102.38	20.48	79.52	80
	0.063	0.00	102.38	20.48	79.52	80

ANNEXE 7: Essai de proctor

Carat du sol						
P eau ajouté	8	10	12	14	16	18
p T humid e	7975	8369	8344. 4	8119. 1	8025. 1	7957. 8
p moule vide	3652	3866	3678	3678	3678	3678
p sol humid e	4323	4503	4666. 4	4441. 1	4347. 1	4279. 8
p du sol sec	4002. 77	4093. 64	4166. 43	3895. 70	3747. 50	3626. 95
V moule	2104	2104	2104	2104	2104	2104
densit e seche	1.90	1.94	1.98	1.85	1.78	1.72

W en eau	8		10		12		14		16		18	
N Tare	MT	A14	56	O8	A1	H11	75	co	IV	ER	I2	W4
p T humid e	169.8	179.2	222.5	227.8	37.6	47.1	38	35. 4	42. 6	42. 7	172. 7	183. 6
p T sec	158.4	167.1	203.2	208.8	34.8	42.8	34. 4	32. 1	37. 9	38	148. 5	158. 5
P de taire	16.8	18.8	18.4	18.3	8.4	8.6	7.7	8.5	8.3	8.5	17.3	18.4
P Eau	11.40	11.90	19.30	19.00	3.20	4.30	3.6 0	3.3 0	4.7 0	4.7 0	24.2 0	25.1 0
p du sol sec	141.6 0	148.3 0	184.9 0	189.8 0	26.00	34.20	26. 70	23. 60	29. 60	29. 50	131. 20	140. 10
T en eau w	8.05	8.02	10.42	10.01	12.31	12.57	13. 48	13. 98	15. 88	15. 93	18.4 5	17.9 2
Moyen ne	8.04		10.22		12.44		13.73		15.91		18.18	

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieur Et de La Recherche Scientifique

Faculté des sciences et de la
technologie
Département d'Hydraulique et
Génie Civil

جامعة غرداية



Université de Ghardaïa

كلية العلوم و التكنولوجيا

قسم الري والهندسة المدنية

ترخيص بإيداع مذكرة الماستر

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

الطالب(ة): بن حمدون ياسين و شريف فارس

الشعبة: هندسة مدنية

التخصص: هياكل

نحن الأساتذة:

الإمضاء	الصفة	الرتبة والجامعة الأصلية أو المؤسسة	الإسم واللقب
	رئيس	أستاذ محاضر أ (جامعة غرداية)	كادي مختارية
	ممتحن	أستاذ محاضر أ (جامعة غرداية)	ظاهر حاج قاسمية
	مؤطر	أستاذ مساعد أ (جامعة غرداية)	عزوز فاطمة الزهراء

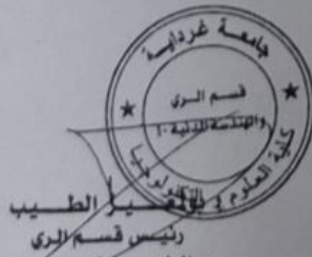
نرخص بإيداع النسخة النهائية لمذكرة الماستر بعنوان:

INFLUENCE DU MODE DE COMPACTAGE SUR LA PORTANCE D'UN MATERIAU LOCAL

اشهد ان الطلبة قد قام / قاموا بالتعديلات والتدريجات المطلوبة من طرف لجنة المناقشة

وقد تم التحقق من ذلك من طرفنا وقد استوفت جميع الشروط المطلوبة

مصادقة رئيس القسم



امضاء المسؤول عن التصحيح