

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
جامعة غرداية
Université de Ghardaïa



كلية العلوم والتكنولوجيا
Faculté des Sciences et de la Technologie
قسم الهندسة المدنية والري
Département de Génie civil et Hydraulique
Mémoire de fin d'étude, en vue de l'obtention du diplôme

MASTER

Domaine : Sciences et Technologies

Filière : Génie civil

Spécialité : Structure

Par : BEN FETTACHA Ali Abderahman & AMIEUR Laid Nour Eddine

Thème

Influence du mode de compactage sur les propriétés
hydriques et mécaniques d'un matériau local

Soutenu publiquement le : 01/06/2025

Devant le jury :

Prénom et nom	Grade	Université	Président
M ^{ME} AZZOUZ .fatima zohra	MAA	Université de Ghardaïa	Encadrant
Pr. KEBALI Mostapha	MAA	Université de Ouargla	Co encadrant
MR.Nessil H	MCA	Université de Ghardaïa	Examineur
Mr. Saiti Issam	MAA	Université de Ghardaïa	President

Dédicaces

Au terme de ce long voyage universitaire, semé de défis, d'efforts et de moments de doute, il me tient à cœur de dédier ce modeste travail à des personnes chères qui ont été les piliers de mon parcours.

À mes chers parents,

Vous êtes la lumière qui éclaire mon chemin, le refuge dans les tempêtes, et l'inspiration constante qui m'a poussée à donner le meilleur de moi-même.

Merci pour votre amour inépuisable, votre patience face à mes absences, votre foi inébranlable en mes capacités, et vos prières silencieuses qui m'ont accompagné à chaque étape.

Sans vous, rien de tout cela n'aurait été possible. Ce mémoire, c'est avant tout le fruit de vos sacrifices et de votre dévouement.

À mes amis les plus proches,

Vous avez été ma deuxième famille durant ces années : toujours présents pour partager un sourire, apaiser un stress ou simplement écouter.

Merci pour votre soutien, vos encouragements, vos conseils sincères, et surtout, votre précieuse amitié.

Vous avez su rendre ce parcours plus léger et bien plus humain.

Que cet humble travail soit le témoignage de ma gratitude et de mon attachement à chacun d'entre vous.

BEN FETTACHA Ali abderahman

Dédicaces

À ceux qui m'ont donné la vie, l'amour et la force d'avancer...

À mon père et à ma mère,

Je vous dédie ces pages, remplies d'efforts, de nuits blanches, de doutes, mais aussi d'espoir et de persévérance.

Merci pour tout ce que vous avez fait, pour vos sacrifices silencieux, vos mots encourageants, et votre présence constante, même dans l'ombre.

Vous êtes la source de mon courage, les racines de ma réussite, et le sens de mon combat.

Que ce mémoire soit un hommage à votre amour inconditionnel et à votre foi en moi.

À mes amis de toujours et de parcours,

Ceux qui ont partagé les bancs de l'université, les stress des examens, les pauses café interminables, et les projets de dernière minute...

Merci pour vos rires, votre complicité, et votre capacité à rendre les moments les plus difficiles, supportables et parfois même inoubliables.

Ce travail est aussi le vôtre, car chaque encouragement, chaque échange, chaque geste d'amitié a compté.

À vous tous, je dis : merci du fond du cœur.

AMIEUR Laid Nour Eddine

Remerciements

*Nous souhaitons tout d'abord adresser nos sincères remerciements à **Monsieur Kabaili Mustapha**, notre encadrant, pour sa disponibilité, ses conseils avisés et son accompagnement bienveillant tout au long de l'élaboration de ce mémoire. Ses orientations précises et son soutien constant ont grandement contribué à la qualité et à la cohérence de notre travail.*

*Nous remercions également **Madame Azouz Fatima**, pour sa pédagogie exemplaire, sa rigueur académique et ses encouragements constants. Elle a su nous transmettre son savoir avec passion, clarté et générosité tout au long de notre parcours universitaire.*

*Nos remerciements s'adressent aussi à **Madame Chkaoua** ainsi qu'à **toutes les personnes du laboratoire** pour leur aide précieuse, leur disponibilité et les échanges constructifs qui ont enrichi notre apprentissage et facilité la réalisation de ce travail.*

*Nous tenons également à exprimer notre gratitude à l'ensemble du **corps enseignant et administratif** du département pour la qualité de l'encadrement pédagogique qu'ils nous ont offert, ainsi que pour leur professionnalisme et leur dévouement.*

*Enfin, nous exprimons notre profonde reconnaissance à **tous ceux qui nous ont soutenus, de près ou de loin**, durant cette belle aventure universitaire.*

Résumé:

Ce mémoire présente une étude expérimentale portant sur le comportement mécanique et hydraulique d'un mélange sable-argile destiné aux travaux de remblai. Deux techniques de compactage ont été comparées : la méthode Proctor modifiée et le compactage par vibration. Les essais de caractérisation (granulométrie, limites d'Atterberg, perméabilité, cisaillement direct, Proctor) ont été réalisés sur un mélange composé de 90 % de sable de Sebseb et 10 % d'argile de Bouhrawa. Les résultats montrent que la méthode Proctor modifiée permet d'atteindre une densité sèche optimale de $1,77 \text{ g/cm}^3$ à une teneur en eau de 11,3 %, tout en garantissant une faible perméabilité et une bonne résistance mécanique. Bien que la méthode par vibration favorise un angle de frottement interne plus élevé, ses performances globales sont inférieures. L'étude conclut que la méthode Proctor modifiée est la plus adaptée dans le contexte géotechnique étudié, tout en insistant sur l'importance du choix de la méthode de compactage selon la nature du sol.

Mots-clés : sable de dune, argile, compactage, perméabilité, résistance au cisaillement, méthode Proctor, vibration.

Abstract:

This thesis presents an experimental study on the mechanical and hydraulic behavior of a sand-clay mixture intended for embankment applications. Two compaction methods were compared: the Modified Proctor method and vibratory compaction. Characterization tests (grain size analysis, Atterberg limits, permeability, direct shear, Proctor test) were conducted on a mixture consisting of 90% Sebseb dune sand and 10% Bouhrawa clay. The results show that the Modified Proctor method achieves an optimal dry density of 1.77 g/cm^3 at 11.3% moisture content, along with low permeability and good mechanical strength. Although vibratory compaction results in a higher internal friction angle, its overall performance is lower. The study concludes that the Modified Proctor method is the most suitable for the studied soil context, highlighting the importance of selecting the compaction method based on soil characteristics.

تتناول هذه المذكرة دراسة تجريبية حول السلوك الميكانيكي والهيدروليكي لخليط من الرمل والطين مخصّص لأعمال الردم. تمت مقارنة طريقتين للدمك: طريقة بروكتور المعدلة وطريقة الدمك بالاهتزاز. أُجريت اختبارات مختلفة (التحليل الحبيبي، حدود أتر بيرغ، النفاذية، القص المباشر، اختبار بروكتور) على خليط مكون من 90% رمل من منطقة سبب و 10% طين من بوحراوة. أظهرت النتائج أن طريقة بروكتور المعدلة تحقق كثافة جافة مثالية تبلغ 1.77 غ/سم³ عند محتوى مائي قدره 11.3%، مع نفاذية منخفضة ومتانة ميكانيكية جيدة. أما طريقة الدمك بالاهتزاز، فرغم تحقيقها لزاوية احتكاك داخلي أكبر، إلا أن كفاءتها العامة كانت أقل. خلصت الدراسة إلى أن طريقة بروكتور المعدلة هي الأنسب ضمن السياق الجيوتكني المدروس، مع التأكيد على ضرورة اختيار طريقة الدمك وفقاً لخواص التربة.

من اخطاء

Sommaire

ou est le remeciments et resume liste des tabeaux et liste de figures

INTRODUCTION GENERALE	XI
<i>Chapitre 01</i> :	14
TECHNIQUES DE COMPACTAGE AU LABORATOIRE	14
1.1. Introduction	14
1.2. Méthode standard de compactage en laboratoire	15
1.2.1. Matériaux compactables	15
1.2.2. Classification des matériaux selon leur aptitude au compactage	15
1.2.3. Paramètres influençant le comportement au compactage	16
1.2.4. Comportement typique lors d'un essai Proctor	16
1.2.5. Importance du choix du matériau dans cette étude	17
1.3. Méthode Proctor	17
1.3.1. Principe général	18
1.3.2. Procédures normalisées	18
1.3.3. Limites et considérations pratiques	19
1.4. Méthode vibratoire	19
1.5. Méthode par chocs	20
1.6. Méthode statique	22
1.7. Conclusion	23
<i>Chapitre 02</i>	24
PROGRAMME EXPERIMENTAL	24
2.1. Introduction	Error! Bookmark not defined.
2.2. Matériaux utilisés	Error! Bookmark not defined.
2.2.1. Choix et origine des matériaux	Error! Bookmark not defined.
2.2.2. Sable de dune de Sebseb	Error! Bookmark not defined.
2.2.3. Argile de Bouhrawa	Error! Bookmark not defined.
2.2.4. Composition du mélange retenu	Error! Bookmark not defined.
2.3. Planning des essais à effectuer	Error! Bookmark not defined.
2.3.1. Essai Proctor modifié	Error! Bookmark not defined.
2.3.2. Essais mécaniques	Error! Bookmark not defined.
2.3.3. Essai de perméabilité	Error! Bookmark not defined.
2.4. Conclusion	Error! Bookmark not defined.

Chapitre 03..... 28

INVESTIGATION EXPERIMENTALE 28

3.1. Introduction	28
3.2. Zone d'Étude	28
3.2.1. Sable de dune	29
3.2.2. Argile	29
3.3. Essais d'identification des matériaux utilisés :	31
3.3.1. Les essais sur l'argile de Bouhraoua.....	31
3.3.2. les essais sur Sable de dune	35
3.4. Les essais de compactage	36
3.4.1. Préparation des échantillons.....	36
3.4.2. Essais Proctor modifié:	37
3.4.3. Essai de perméabilité pour les donné de Proctor :	39
3.4.4. Essai de cisaillement direct.....	39
3.4.5. Comparaison entre l'essai Proctor et l'essai par vibration — Essai de perméabilité.....	44
3.4.6. Comparaison entre essai de Proctor et essai par vibration – Essai de cisaillement.....	45
3.4.7. Comparaison de la perméabilité selon le mode de compactage : Proctor vs. Vibration.....	46
3.4.8. Comparaison entre les résultats de cisaillement : méthode Proctor vs. Vibration.....	47
3.5.1. interprétation les résultats des essais d'identification :	48
3.5.2. les résultats de compactage selon mode Proctor modifié :	49
3.5.3. Comparaison entre essai de les résultats de perméabilité selon mode proctor et essai T.vibration.....	50
3.6. Conclusion	51

Chapitre 04..... 53

COMORTEMENT MEQUANIQUE ET HYDRIQUE DU MELANGE

SABLE - ARGILE 53

4.1. Introduction	53
4.2. Comparaison des résultats de compactage (Proctor modifié vs vibration).....	53
4.3. Comparaison des résultats de perméabilité.....	54
4.4. Comparaison des résultats de cisaillement	54
4.5. Limites de l'étude.....	55
4.6. Recommandations pratiques	55
4.7. Perspectives de recherche.....	56
4.8. Synthèse finale	57

CONCLUSION GENERALE DE L'ETUDE 1

Liste des tableaux

Tableau 3.1 : Programme des essais d'identification des matériaux utilisés.....	31
Tableau 3.2 : Analyse chimique d'argile Bouhraoua	32
Tableau 3.3 : Résultats récapitulatif de l'analyse granulométrique D'Argile Bouhraoua.....	32
Tableau 3.4 : les valeurs de la limite Atterberg.....	33
Tableau 3.5 : Résultats de l'essai au bleu à la tâche.....	34
Tableau 3.6 : La classification par CaCO ₃ de quelques sols	34
Tableau 3.7 – Récapitulatif des essais d'identification sur l'argile de Bouhrawa.....	34
Tableau 3.8 : Récapitulatif des essais d'identification sur le sable de dune.....	Error! Bookmark not defined.
Tableau 3.9 : Résultat obtenu d'essai de proctor	39
Tableau 3.10 – Résultats de l'essai de cisaillement direct après compactage.....	40
Tableau 3.11 : Résultats d'essai de compactage du mélange 90% sable de dune et 10% argile.....	43
Tableau 3.20 – Paramètres déduits des équations de rupture pour les deux méthodes de compactage	45
Tableau 3.21 – Résultats comparatifs des essais de cisaillement selon la méthode de compactage (Proctor vs. Vibration)	47
Tableau 4.1 – Comparaison des paramètres de compactage.....	53
Tableau 4.2 – Résultats des coefficients de perméabilité en fonction du temps.....	54
Tableau 4.3 – Paramètres de résistance au cisaillement selon la méthode de compactage	54

INTRODUCTION GENERALE

La construction d'infrastructures durables et performantes repose en grande partie sur la qualité et l'adéquation des matériaux utilisés. Dans le contexte actuel de développement durable et d'optimisation des ressources, l'utilisation de matériaux locaux dans les travaux de génie civil – notamment les remblais, les fondations ou les couches de forme – constitue une solution à la fois économique et écologique. Parmi ces matériaux, les mélanges sable-argile occupent une place importante. Toutefois, leurs propriétés hydriques et mécaniques, essentielles à la pérennité des ouvrages, dépendent fortement des conditions de mise en œuvre, en particulier du mode de compactage appliqué.

Le compactage est une opération clé visant à améliorer la densité, la résistance mécanique et la stabilité des sols en réduisant leur teneur en vides. Cependant, les effets des différentes techniques de compactage sur les propriétés finales du matériau restent mal maîtrisés, surtout lorsqu'il s'agit de matériaux locaux, dont les caractéristiques peuvent diverger sensiblement de celles des sols normalisés. En effet, un compactage excessif peut altérer la perméabilité du sol, ce qui peut être bénéfique ou préjudiciable selon les applications visées. Par ailleurs, la relation entre l'énergie de compactage et les performances mécaniques du matériau n'est pas toujours linéaire, étant influencée par la granulométrie et la teneur en eau initiale. Il est donc essentiel de mieux comprendre ces interactions pour adapter les techniques de compactage aux spécificités des matériaux locaux.

Face à cette problématique, ce mémoire a pour objectif principal d'analyser l'impact de différentes méthodes de compactage sur les propriétés hydriques (perméabilité, rétention d'eau) et mécaniques (résistance au cisaillement, portance) d'un matériau local sableux-argileux. Plus précisément, l'étude vise à :

- Caractériser le matériau local à travers des essais physiques et mécaniques (granulométrie, limites d'Atterberg, densité maximale, teneur en eau optimale).
- Évaluer plusieurs méthodes de compactage (Proctor, statique, vibratoire, par chocs) et comparer leurs effets sur la densité, la perméabilité et la résistance du matériau.
- Analyser l'influence du compactage sur les propriétés hydriques et mécaniques afin d'identifier les conditions optimales pour chaque type d'application.

- Proposer des recommandations pratiques pour une utilisation efficace des techniques de compactage adaptées aux matériaux locaux. Pour atteindre ces objectifs, l'étude adopte une démarche rigoureuse et progressive, structurée comme suit :

1. **Revue bibliographique** : analyse des méthodes de compactage existantes et des études antérieures sur les sols similaires.
2. **Programme expérimental** : élaboration d'un plan d'essais pour tester le matériau selon différentes énergies et techniques de compactage.
3. **Essais en laboratoire** : réalisation de tests normalisés (Proctor, cisaillement direct, CBR, perméabilité) sur des échantillons compactés.
4. **Analyse et interprétation** : comparaison des résultats expérimentaux, mise en évidence des relations entre les paramètres de compactage et les propriétés mesurées.
5. **Validation et recommandations** : formulation de recommandations basées sur les résultats obtenus, visant à optimiser le compactage des matériaux locaux en génie civil.

Le mémoire est structuré en quatre chapitres principaux :

- **Chapitre 1** : Présentation des techniques de compactage utilisées en laboratoire et des principes fondamentaux du compactage des sols.
- **Chapitre 2** : Description du programme expérimental, des matériaux étudiés et des essais réalisés.
- **Chapitre 3** : Présentation et analyse des résultats expérimentaux relatifs aux propriétés hydriques et mécaniques du matériau compacté.
- **Chapitre 4** : Validation des résultats, comparaison avec les objectifs initiaux et proposition de recommandations pour l'optimisation du compactage.

Ce mémoire vise à apporter une contribution pertinente à la compréhension de l'impact du mode de compactage sur le comportement des matériaux locaux. Les résultats obtenus permettront de formuler des recommandations pratiques pour les ingénieurs et les décideurs, afin d'améliorer la durabilité et la performance des ouvrages en terre. À plus long terme, cette étude pourrait ouvrir la voie à des recherches complémentaires portant sur d'autres types de sols locaux, sur l'effet du vieillissement ou encore sur le comportement du matériau en conditions réelles de chantier.

Chapitre 01:

TECHNIQUES DE COMPACTAGE AU LABORATOIRE

1.1. Introduction

Le compactage des sols constitue une opération fondamentale en géotechnique, tant pour les ouvrages routiers que pour les fondations ou les remblais. Il s'agit d'un processus mécanique destiné à améliorer la densité d'un sol en réduisant le volume des vides par application d'une énergie externe. Cette opération permet ainsi d'augmenter la résistance mécanique du sol, de réduire sa perméabilité, et d'améliorer sa stabilité à long terme. Ces propriétés sont particulièrement essentielles lorsque le sol est utilisé comme matériau de construction, notamment dans les contextes où l'on souhaite exploiter des matériaux locaux.

Dans les laboratoires de géotechnique, plusieurs méthodes de compactage ont été développées afin de reproduire, à échelle réduite, les conditions de mise en œuvre sur le terrain. Ces techniques permettent d'évaluer les performances d'un matériau donné en fonction de différents paramètres : taux d'humidité, énergie de compactage, mode de sollicitation, etc. Parmi les méthodes les plus couramment utilisées figurent le compactage Proctor (standard et modifié), le compactage par vibrations, le compactage par chocs et le compactage statique. Chacune de ces méthodes présente des avantages, des limites, et des domaines d'application spécifiques, qui influencent directement les propriétés hydriques et mécaniques du sol compacté.

Ce chapitre vise ainsi à présenter, de manière structurée, les différentes techniques de compactage couramment utilisées en laboratoire. L'objectif est de fournir un cadre théorique solide permettant de comprendre les principes physiques sous-jacents à chaque méthode, et de justifier leur choix dans le cadre de l'étude menée. Cette revue des techniques permettra également de mieux interpréter les résultats expérimentaux présentés dans les chapitres suivants, en lien avec l'influence du mode de compactage sur un matériau local.

1.2. Méthode standard de compactage en laboratoire

1.2.1. Matériaux compactables

Les matériaux compactables sont ceux dont la structure granulométrique et les propriétés physiques permettent une réduction significative de la porosité sous l'effet d'une sollicitation mécanique. En génie civil, les sols fins, les sables, les graviers, ainsi que leurs mélanges sont les principales catégories de matériaux étudiées dans les essais de compactage en laboratoire. Leur comportement sous compactage dépend de plusieurs facteurs, notamment la nature minéralogique, la granulométrie, la teneur en eau et la plasticité.

1.2.2. Classification des matériaux selon leur aptitude au compactage

L'aptitude d'un sol au compactage est fortement liée à sa granulométrie. Les matériaux bien gradués (c'est-à-dire composés de particules de tailles variées qui remplissent les vides entre elles) présentent généralement une meilleure compacité finale que les matériaux uniformes.

Les sols sont habituellement classés selon le système USCS (Unified Soil Classification System), qui distingue :

- Les sols granulaires (sables, graviers) : ces matériaux sont relativement faciles à compacter, surtout lorsqu'ils sont peu humides. Leur comportement est essentiellement frictionnel, ce qui leur permet de bien réagir à des sollicitations dynamiques (vibrations, chocs).
- Les sols fins (limons, argiles) : leur compaction est plus complexe, car elle dépend fortement de la teneur en eau. Les argiles, notamment, nécessitent une teneur en eau optimale pour atteindre une densité maximale. De plus, leur sensibilité à l'eau et leur plasticité influencent leur réponse au compactage.
- Les mélanges (ex. sable-argile) : ces combinaisons peuvent présenter des performances intermédiaires, selon la proportion et les caractéristiques des composants.

Un tableau typique de classification des sols selon leur aptitude au compactage peut être consulté dans :

General Classification	General Materials (35% or less passing 0.075 mm)							Silt-clay materials (more than 35% passing 0.075 mm)			
	A-1		A-3	A-2				A-4	A-5	A-6	A-7
Group Classification	A-1-a	A-1-b		A-2-4	A-2-5	A-2-6	A-2-7				A-7-5
Sieve Analysis % passing 2.00 mm (No10) 0.425 mm (No40) 0.725 mm (No200)	50max 30max 15max	50max 25max	51min 10max	35max	35max	35max	35max	36min	36min	36min	36min
Characteristics of fraction passing Liquid limit Plastic Index	6max		N.P	40max 10max	41min 10max	40max 11min	41min 11min	40max 10max	41min 10max	40max 11min	40min 11min
Usual types of significant Constituent material	Stone fragment Gravel and sand		Fine Sand	Silty or clayey Gravel and sand				Silty soils		Clayey soils	
General rating	Excellent to Good							Fair to poor			

Figure 1.1 : Tableau de classification des sols AASHTO[1]

1.2.3. Paramètres influençant le comportement au compactage

- Granulométrie : les matériaux bien granulés se compactent mieux que ceux à granulométrie uniforme.
- Teneur en eau : la présence d'eau joue un rôle de lubrifiant entre les particules, facilitant leur réarrangement sous contrainte. Cependant, un excès d'eau entraîne une diminution de la densité sèche.
- Plasticité : les sols plastiques (hauts indices de plasticité) nécessitent un contrôle plus précis de la teneur en eau.
- Forme et rugosité des grains : les particules anguleuses s'emboîtent mieux que les particules arrondies, ce qui améliore la stabilité mais peut nécessiter plus d'énergie de compactage.
- Taux de fines : un excès de particules fines peut freiner le drainage de l'eau lors du compactage, réduisant ainsi l'efficacité du procédé.[2]

1.2.4. Comportement typique lors d'un essai Proctor

Lorsqu'un sol est soumis à un essai Proctor, il montre généralement une variation typique de la densité sèche en fonction de la teneur en eau, suivant une courbe en cloche.

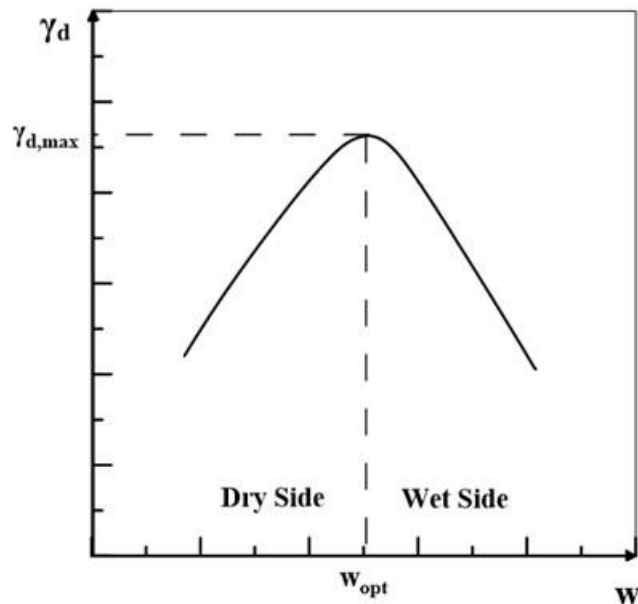


Figure 1.2 : Effet de la teneur en eau sur le poids volumique sec lors du compactage d'un sol [3]

Lorsqu'un sol est soumis à un essai Proctor, il montre généralement une variation typique de la densité sèche en fonction de la teneur en eau, suivant une courbe en cloche.[4]

1.2.5. Importance du choix du matériau dans cette étude

Dans le cadre de cette étude, portant sur l'influence du mode de compactage sur un matériau local, le choix du matériau à utiliser est essentiel. Il doit être représentatif des matériaux disponibles localement, et présenter des propriétés physiques permettant d'observer des variations sensibles sous différents régimes de compactage. Les mélanges sable-argile sont souvent privilégiés dans ce type d'analyse, car ils permettent d'étudier à la fois l'effet des grains grossiers (structure granulaire) et celui des fines (cohésion, plasticité). L'étude des performances mécaniques et hydriques de tels matériaux en fonction du compactage devient ainsi particulièrement pertinente pour les projets de construction locaux. [5]

Densité sèche du sol :

Cette formule permet de relier la densité sèche à la teneur en eau du sol, et elle est essentielle pour analyser les résultats d'un essai de compactage [6].

1.3. Méthode Proctor

La méthode Proctor constitue la référence en matière de compactage des sols en laboratoire. Mise au point dans les années 1930 par R.R. Proctor, cette méthode vise à déterminer, pour un sol donné, la relation entre la densité sèche atteinte après compactage et la teneur en eau. Elle permet d'identifier

la teneur en eau optimale à laquelle la densité sèche maximale est obtenue, deux paramètres clés pour les travaux de terrassement et la construction d'infrastructures.[7]

1.3.1. Principe général

La méthode repose sur l'idée que la densité d'un sol compacté dépend fortement de sa teneur en eau. Une humidité trop faible empêche les particules de s'agencer efficacement, tandis qu'un excès d'eau entraîne une saturation qui diminue la compacité. Entre ces deux extrêmes, il existe une valeur optimale de teneur en eau (w_{opt}) à laquelle le sol atteint une densité sèche maximale (γ_{dmax}).

Le sol est compacté dans un moule cylindrique en plusieurs couches (généralement trois), chacune étant soumise à un nombre donné de coups de massette, représentant une énergie de compactage déterminée.[8]

1.3.2. Procédures normalisées

Deux principales variantes de la méthode Proctor sont aujourd'hui standardisées :

- Proctor standard (norme NF P 94-093 ou ASTM D698)
 - Masse du pilon : 2.5 kg
 - Hauteur de chute : 30 cm
 - Nombre de couches : 3
 - Coups par couche : 25
 - Énergie de compactage : 0.59 MJ/m³
- Proctor modifié (norme ASTM D1557)
 - Masse du pilon : 4.54 kg
 - Hauteur de chute : 45.7 cm
 - Nombre de couches : 5
 - Coups par couche : 25
 - Énergie de compactage : 2.70 MJ/m³

La méthode modifiée est utilisée pour simuler les conditions de compactage plus sévères observées sur les chantiers industriels et aéroportuaires.[9]

Test	Standard Proctor	Modified Proctor
Hammer weight	2.7 kg	4.9 kg
Drop height	300 mm	450 mm
Energy imparted per blow	7.94 J	21.62 J
No. of soil layers	3	5
No. of blows per layer	25	25
Energy imparted per unit volume	596 kJ/m ³	2703 kJ/m ³

Figure 1.3 : Comparaison de l'énergie transmise pour les tests Proctor standard et modifié[10]

Équation utile : relation entre poids volumique humide et densité sèche

Comme rappelé précédemment, la relation fondamentale utilisée est :

1.3.3. Limites et considérations pratiques

Bien que largement utilisée, la méthode Proctor présente quelques limites :

- Elle ne reflète pas nécessairement les conditions de compactage in situ, surtout dans le cas de sols très fins ou très cohésifs.
- Les résultats peuvent être influencés par la méthode de préparation des échantillons (homogénéisation, malaxage, etc.)
- Pour certains matériaux, une énergie de compactage plus spécifique ou alternative (vibration, statique) peut s'avérer plus représentative.[11]

1.4. Méthode vibratoire

Le compactage par vibration est une méthode couramment utilisée, en particulier pour les sols granulaires tels que les sables et les graviers. Cette technique repose sur l'application d'une force vibratoire, qui provoque le réarrangement des particules solides du sol en réduisant la friction entre elles. Sous l'effet des vibrations, les grains s'organisent plus densément, ce qui permet de diminuer le volume des vides et d'augmenter la densité sèche atteinte. Cette méthode est particulièrement efficace pour les matériaux peu cohésifs, chez lesquels l'absence de forces interparticulaires importantes permet un réarrangement plus libre[12].

En laboratoire, l'essai de compactage par vibration est généralement réalisé à l'aide d'un moule cylindrique placé sur une table vibrante. Le matériau, préalablement humidifié à différentes teneurs

en eau, est introduit dans le moule, puis soumis à une vibration continue pendant une durée déterminée (souvent 3 à 5 minutes). L'intensité de la vibration, la fréquence, et la durée doivent être contrôlées précisément pour garantir la reproductibilité de l'essai. Une fois le compactage terminé, le volume et le poids du sol sont mesurés afin de déterminer la densité sèche.[13]



Figure 1.4 : Moule à proctor modifié [6]

Les résultats obtenus sont ensuite analysés de manière similaire à ceux de l'essai Proctor : on trace la variation de la densité sèche en fonction de la teneur en eau, ce qui permet d'identifier la teneur optimale et la densité sèche maximale pour cette méthode spécifique. Il est généralement observé que, pour un même matériau, le compactage vibratoire permet d'atteindre une densité supérieure à celle obtenue par l'essai Proctor standard, en particulier dans les sols non cohésifs[14].

Cependant, cette méthode présente certaines limites. Elle est peu adaptée aux sols fins, en particulier aux argiles plastiques, qui réagissent mal à la vibration et peuvent même voir leur structure dispersée sous excitation. De plus, l'interprétation des résultats peut être influencée par des facteurs externes comme la température, les caractéristiques de la machine vibrante, ou encore la présence de fines qui freinent le drainage de l'eau lors du processus[15].

1.5. Méthode par chocs

La méthode de compactage par chocs consiste à soumettre le sol à des impacts mécaniques répétés, dans le but de densifier sa structure en réduisant les vides. Cette technique est largement utilisée aussi bien en laboratoire qu'en pratique de terrain, notamment pour simuler des conditions dynamiques ou

pour compacter des sols difficiles. Le principe repose sur l'application d'une énergie ponctuelle concentrée, transmise par un poids tombant ou un marteau, qui génère une onde de choc comprimant les particules du sol[16].

En laboratoire, cette méthode peut être appliquée à travers des dispositifs semblables à ceux utilisés pour l'essai Proctor, mais en modifiant la cadence, l'intensité, ou le type d'impact. Une série de coups sont appliqués à une masse de sol répartie dans un moule, souvent en couches successives. Ce processus peut être contrôlé de manière manuelle (marteau libre), ou mécanique (dispositif automatisé à chocs). Les essais par chocs permettent d'évaluer la réponse dynamique du sol, utile notamment dans les études de stabilité ou de compactage en zones sismiques [17] .

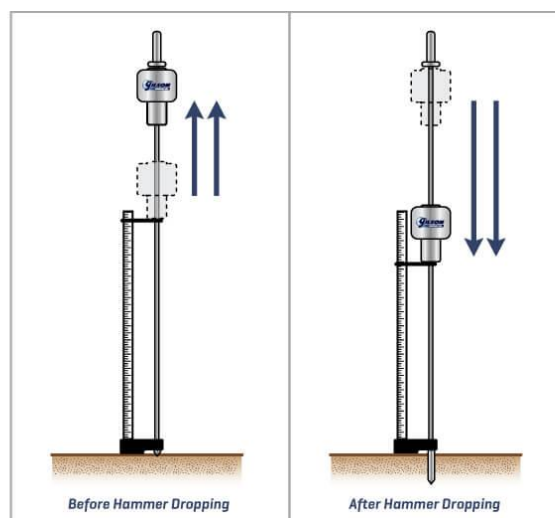


Figure 1.5 : Le pénétromètre à cône dynamique (DCP)[18]

L'efficacité de cette méthode dépend fortement de la nature du sol. Les sols granulaires, en particulier les graviers et sables bien gradués, réagissent bien aux impacts répétés, car les chocs favorisent le réarrangement granulaire. En revanche, les sols très fins ou organiques peuvent montrer des comportements non linéaires ou une dispersion sous l'effet des chocs[19].

Cette méthode présente un intérêt particulier dans les projets de grande envergure, où elle peut être utilisée à l'échelle réelle par compactage dynamique à l'aide de masses lourdes larguées depuis une certaine hauteur. En laboratoire, elle permet de reproduire des effets localisés de fortes énergies, et d'étudier des aspects particuliers du comportement du sol comme la compacité en profondeur, la dissipation de l'eau interstitielle ou les effets transitoires.

1.6. Méthode statique

Le compactage statique consiste à appliquer une pression continue et uniforme sur un sol, sans mouvements répétés ni vibrations. Contrairement aux méthodes dynamiques ou vibratoires, ici, le sol est simplement pressé par une plaque ou un piston à l'aide d'une presse mécanique ou hydraulique. Cette méthode permet d'étudier la réponse du sol à une charge monotone et lente, souvent dans des conditions proches de la consolidation, ce qui en fait une approche complémentaire aux méthodes plus énergétiques[20].

En laboratoire, le sol est placé dans un moule cylindrique ou un caisson rigide, puis soumis à une pression constante à l'aide d'une presse hydraulique ou d'un système mécanique manuel. La force est généralement appliquée pendant plusieurs minutes afin de permettre une redistribution des pressions interstitielles et un réarrangement progressif des particules. Ce type de compactage est particulièrement adapté à l'étude des sols argileux, qui réagissent lentement aux sollicitations et nécessitent un temps de consolidation pour atteindre une densité maximale[21].



Figure 1.6 : Équipement d'essai de charge statique du sol [22].

L'un des avantages de la méthode statique réside dans son contrôle précis de la charge appliquée, ce qui permet de mieux étudier la relation entre la contrainte imposée et la densification obtenue. Elle est particulièrement utilisée dans les études de comportement mécanique des sols à l'état saturé, ou lorsque l'on souhaite éviter les perturbations dynamiques. Cependant, cette méthode est moins représentative des conditions réelles de chantier, où les efforts sont généralement dynamiques, et elle est donc rarement utilisée comme méthode unique dans les projets d'ingénierie géotechnique[23].

1.7. Conclusion

Le compactage des sols constitue une étape essentielle en géotechnique, conditionnant la qualité et la durabilité des ouvrages. Ce chapitre a présenté les principales techniques utilisées en laboratoire, chacune adaptée à un type de sol précis.

La méthode Proctor, standard ou modifiée, demeure la référence pour évaluer la densité sèche maximale et la teneur en eau optimale des sols fins et cohésifs. La méthode vibratoire se distingue par son efficacité sur les matériaux granulaires, tandis que la méthode par chocs reproduit fidèlement les sollicitations de chantier. Enfin, la méthode statique convient davantage à l'étude du comportement des sols fins soumis à des contraintes lentes.

Ce panorama souligne l'importance du choix de la méthode de compactage, car les propriétés obtenues — densité, résistance, perméabilité — varient selon la technique appliquée. Cette observation justifie l'objectif de notre mémoire, qui est d'analyser l'influence de ces différentes méthodes sur les caractéristiques hydriques et mécaniques d'un matériau local.

Le chapitre suivant décrira le programme expérimental, le choix du matériau et les essais réalisés dans le cadre de cette étude comparative.

Chapitre 02

PROGRAMME EXPERIMENTAL

2.1. Introduction Générale

Le présent chapitre a pour objectif de détailler la démarche scientifique et technique mise en œuvre pour évaluer l'influence du mode de compactage sur les propriétés hydriques et mécaniques du matériau d'étude. Ce programme expérimental rigoureux est le point de convergence entre le cadre théorique et bibliographique établi précédemment et les observations concrètes de laboratoire.

La stratégie adoptée est comparative et analytique. Elle repose sur l'étude d'un mélange spécifique de matériaux locaux soumis à différentes méthodes de compactage (Proctor modifié, statique, etc.), dans le but d'identifier les conditions de mise en œuvre offrant la meilleure performance géotechnique pour les ouvrages en milieu saharien.

2.2. Matériaux Utilisés et Préparation du Mélange

2.2.1. Choix et Justification des Constituants

Le matériau étudié est un mélange optimal dont la composition massique est la suivante :

- 90 % de Sable de Dune (provenance : site de Sebseb).
- 10 % d'Argile Fine (provenance : région de Bouhrawa, wilaya de Ghardaïa)

Ce choix repose sur la grande disponibilité locale de ces ressources et leur pertinence pour les applications de génie civil saharien. Le sable de dune constitue l'ossature granulaire du mélange et assure la stabilité volumique, tandis que l'argile, riche en fines, agit comme un liant naturel. L'incorporation de 10% d'argile est justifiée par l'optimisation de la plasticité et de la cohésion, influençant directement la compacité maximale atteignable.

2.2.2. Caractérisation Amont du Mélange

Avant compactage, le mélange a été soumis à une série d'essais préliminaires visant à établir ses caractéristiques physiques et minéralogiques fondamentales :

- Analyse Granulométrique par Tamisage et Sédimentométrie : Détermination de la distribution des tailles de grains (courbe granulométrique) et des pourcentages de fines.
- Limites d'Atterberg : Mesure des limites de liquidité (W_L) et de plasticité (W_P), permettant de classer le sol et d'évaluer sa plasticité (Indice de Plasticité I_P).
- Essai au Bleu de Méthylène (VBS) : Évaluation de l'activité de la fraction argileuse et de sa capacité d'échange cationique, critère essentiel pour les sols fins.

2.3. Programme d'Essais sur le Matériau Compacté

Les essais suivants ont été retenus pour évaluer les propriétés hydriques et mécaniques du matériau compacté sous différentes énergies et modes de compactage.

2.3.1. Essai Proctor Modifié (Référence de Compactage)

L'essai Proctor modifié (norme ASTM D1557) est l'essai de référence pour l'étude de compactage [1].

Objectif : Déterminer la densité sèche maximale ($\gamma_{d, \text{max}}$) et la teneur en eau optimale (W_{opt}) du mélange. Ces paramètres servent de base pour la préparation de tous les échantillons.

Principe : L'énergie de compactage élevée du Proctor Modifié (énergie similaire à celle des compacteurs lourds) permet de simuler la densité maximale atteignable pour une granulométrie donnée.

2.3.2. Essai de Perméabilité

L'essai de perméabilité permet de quantifier la capacité du sol à laisser circuler l'eau.

- Objectif : Mesurer le coefficient de perméabilité (k) du matériau compacté, propriété hydrique essentielle pour évaluer le drainage et la réponse en milieu saturé.
- Méthode : Compte tenu de la présence d'argile et de la faible perméabilité attendue, l'essai sera réalisé à l'aide d'un perméamètre à charge variable (ou à charge constante si k est élevé).
- Calcul : Le coefficient de perméabilité est calculé selon la loi de Darcy [2]:

$$k = \frac{Q \cdot L}{A \cdot h \cdot t}$$

Où Q est le volume d'eau écoulé (m^3), L la longueur de l'échantillon (m), A la section transversale (m^2), h la charge hydraulique (m), et t le temps d'écoulement (s).

2.4. Synthèse et Articulation du Programme Expérimental

suprime ce tableau

Le Tableau 2.1 récapitule l'ensemble des essais, leurs objectifs principaux, et les paramètres mesurés. L'ensemble du protocole est conçu pour permettre une comparaison directe et quantitative de l'impact des différents modes de compactage sur la performance finale du mélange.

°	Type d'essai	Objectif principal	Paramètres mesurés	Appareillage / Méthode
1	Caractérisation (Granulométrie, Atterberg, VBS)	Classification du sol et propriétés initiales	Granulométrie (D10, D30, D60), W_L , W_P , I_P , Valeur au Bleu	Tamis/Sédimentomètre, Appareil Atterberg, VBS
2	Proctor Modifié	Déterminer l'optimum de compactage (référence)	Densité sèche maximale ($\gamma_{d, \text{max}}$), Teneur en eau optimale (W_{opt})	Moule et dame Proctor modifié (ASTM D1557)
3	Cisaillement Direct	Évaluer la résistance mécanique	Cohésion (c), angle de frottement (ϕ)	Boîte de cisaillement direct
4	CBR	Déterminer la portance du matériau	Indice CBR (%)	Pénétromètre CBR (ASTM D1883)
5	Œdomètre	Évaluer la compressibilité et le potentiel de gonflement	Indices de compression (C_c) et de gonflement (C_s), Déformation verticale	Œdomètre unidimensionnel
6	Perméabilité	Mesurer la réponse hydrique	Coefficient de perméabilité (k)	Perméamètre (Charge Constante ou Variable)

2.5. Conclusion **du Chapitre** conclusion

Ce deuxième chapitre a permis de solidifier la base opérationnelle de notre recherche. Nous avons défini un protocole expérimental complet et ciblé, centré sur l'analyse d'un mélange local pertinent pour les ouvrages sahariens. En couvrant les propriétés de référence (Proctor), la résistance mécanique (Cisaillement, CBR), et le comportement hydrique/volumique (Perméabilité, Œdomètre), cette démarche comparative est prête à fournir des données robustes.

Le chapitre suivant sera intégralement consacré à la présentation détaillée des résultats obtenus à partir de ces six grandes familles d'essais, et à une discussion critique de l'efficacité des différents modes de compactage testés.

Chapitre 03

INVESTIGATION EXPERIMENTALE

3.1. Introduction

Nous sommes intéressés dans ce chapitre à exploration des résultats des essais effectués sur le mélange sable-argile au sein du Laboratoire des Travaux Publics du Sud (LTPS) de Ghardaïa. La première partie est consacrée à l'exposition objective des données expérimentales, sans interprétation. La seconde partie propose une analyse critique de ces résultats, accompagnée de nos commentaires et observations fondés sur notre propre compréhension des phénomènes observés.

3.2. 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 (D.S.A, 2021).

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) (, ? 2023)
- modifier cette carte poue wlaya gharsaia google (non Menia)



Figure 3.1 : Situation géographique de la wilaya de Ghardaïa. [26]

Localisation des Sites de Prélèvement des Matériaux

3.2.1. 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.

3.2.2. 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 figure illustrant les différents sites de prélèvement sont présentées pour mieux visualiser les zones d'origine des matériaux utilisés.

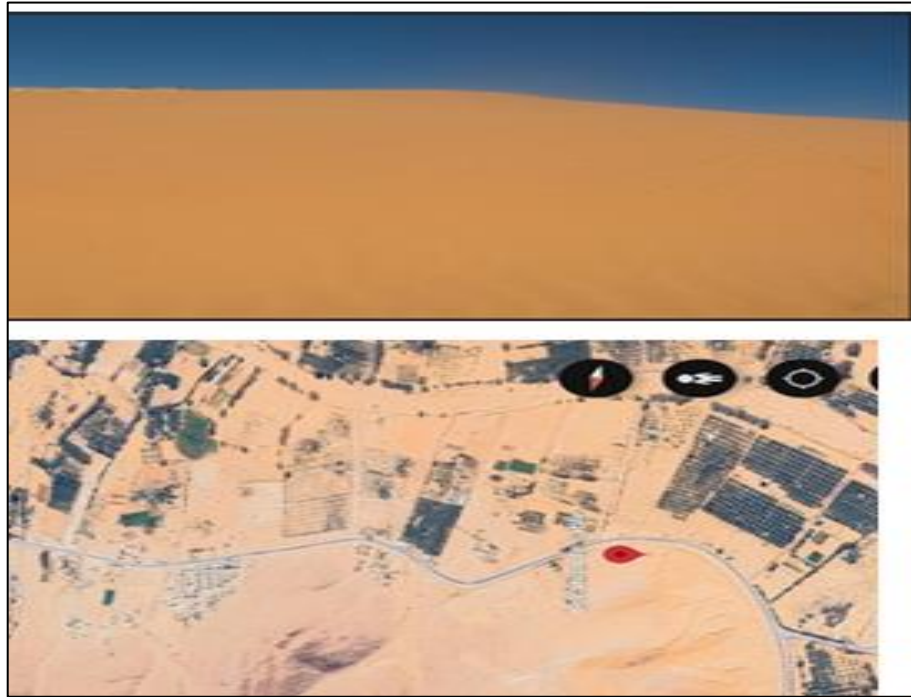


Figure 3.2 : Site d'extraction de sable



Figure 3.3 : Site d'extraction de argile

3.3. Essais d'identification des matériaux utilisés :

Le tableau 3.1 présente le programme des essais réalisés pour l'identification des matériaux utilisés. et pour l'intitulé du tableau :

Tableau 3.1 : Programme des essais d'identification des matériaux utilisés

Argile	Sable
<ul style="list-style-type: none"> • Analyse chimique • Analyse granulométrique. • Limites d'atteberg. • Teneur en Caco3. • Essai au bleu de méthylène. 	<ul style="list-style-type: none"> • Analyse chimique • Analyse granulométrique. • Équivalent de sable • Essai au bleu de méthylène

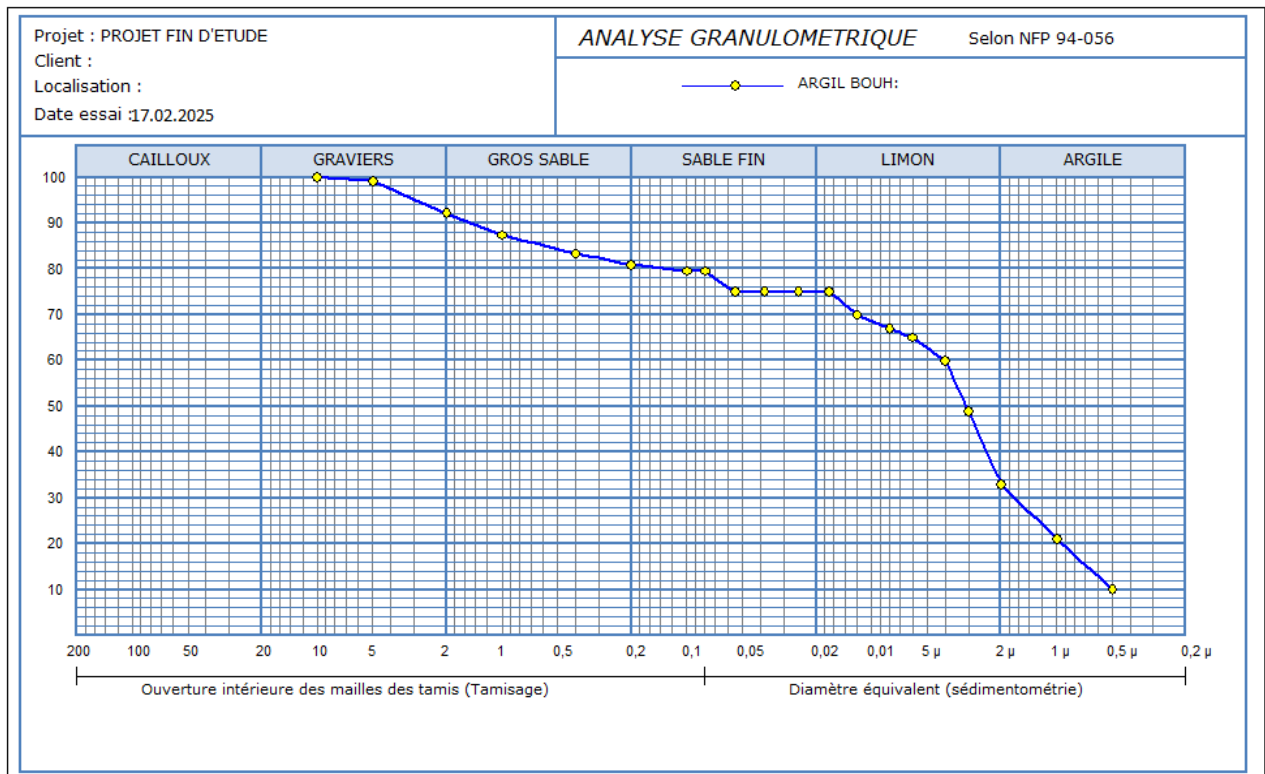
3.3.1. Les essais sur l'argile de Bouhraoua

3.3.1.1. Analyse chimique:

Tableau 3.2 : Analyse chimique d'argile Bouhraoua

Caractéristique	Symboles	Unité	Argile Bouhraoua
Résidu insoluble	SiO ₂ +Silice	%	22.4
Sulfates	SO ₃	%	2.85
Chlorures	Cl -	%	--
Carbonate de Calcium	CaCO ₃	%	55
Matières organiques	MO	%	--

3.3.1.2. Analyse granulométrique (NF P94 - 056)

**Figure 3.4 : Courbe granulométrique d'argile Bouhraoua****Tableau 3.3 : Résultats récapitulatif de l'analyse granulométrique D'Argile Bouhraoua**

	Argile Bouhraoua
Dmax (mm)	5
Argile (%)	10
Limon (%)	68

Sable fin (%)	12
Sable gros (%)	2
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. $Cc = (D30)^2/D60.D10$

3.3.1.3. Limite d'Atterberg (NFP 94-051)

Tableau 3.4 : les valeurs de laisse limite Atterberg

Limites D'Atterberg	Valeur(%)
Limite de liquidité (WL)	52.59
Limite de plasticité (Wp)	27.19
Indice de plasticité (IP)	25.40

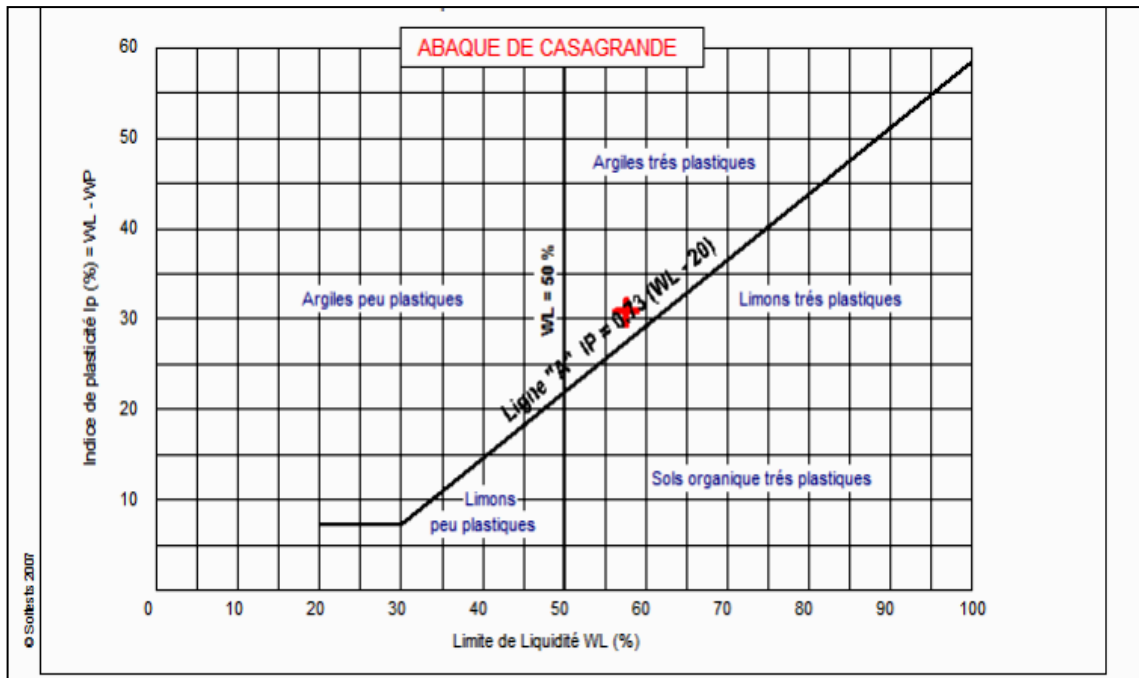


Figure 3.6: courbe granulométrique du Sable de Dune de Sebseb

3.3.1.4. Essai au Bleu de Méthylène (Norme NF 94-068)

Tableau 3.5 : 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

3.3.1.5. Teneur en carbonate de calcium de l'argile étudiée :

Tableau 3.6 : La classification par CaCO₃ de quelques sols[27]

CaCO ₃ (%)	Dénomination
0-10	Argile ou limon.
10-30	Argile calcaire.
30-70	Marne.
70-90	Calcaire argileuse.
90-100	Calcaire.

Tableau 3.7 – Récapitulatif des essais d'identification sur l'argile de Bouhrawa

3.3.2. les essais sur Sable de dune

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

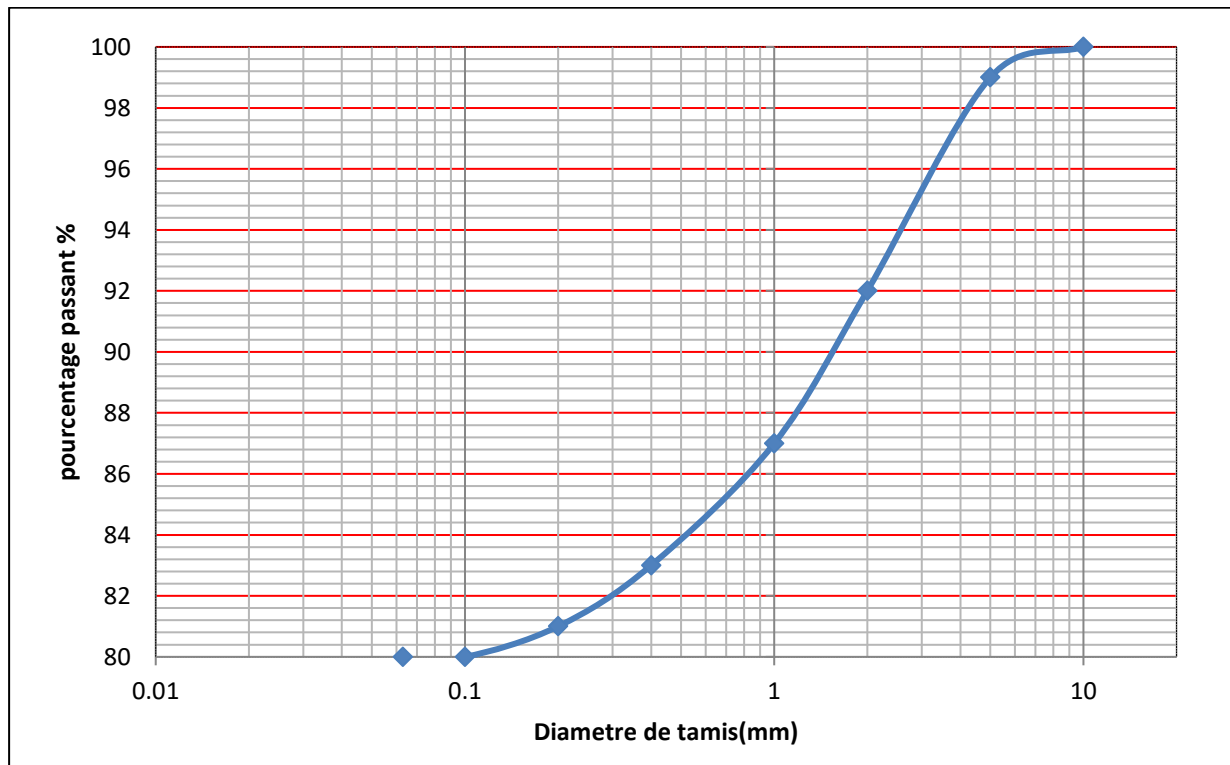


Figure 3.6: Courbe granulométrique sable de dune

3.3.2.2. Classification du sol

a. Classification du sol selon le GTR :

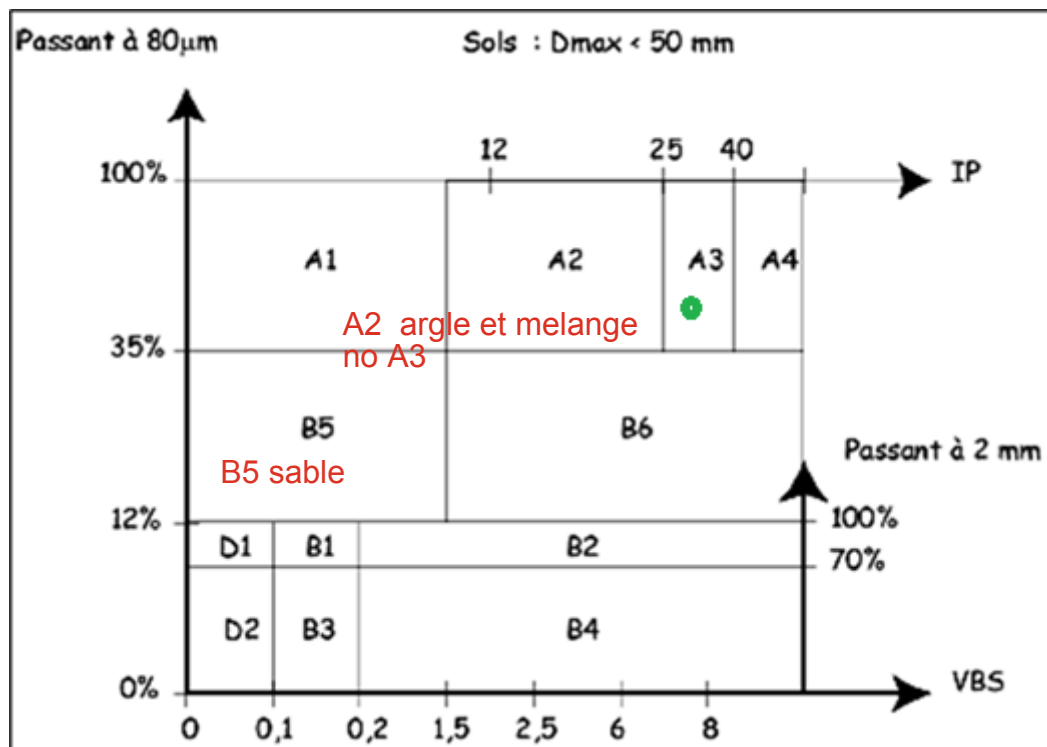


Figure 3.7 : Classification des sols fins selon GTR

3.4. Les essais de compactage

3.4.1. 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 90% de sable et 10% d'argile, soit l'équivalent de 3850 g de sable et 1650 g d'argile.



Figure 3.10: Préparation des échantillons

3.4.2. 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 3.11: Préparation de mélange d'échantillon

Les résultats obtenus à partir de l'essai Proctor sont présentés dans la (figure 3.7) est le (Tableau 3.8)

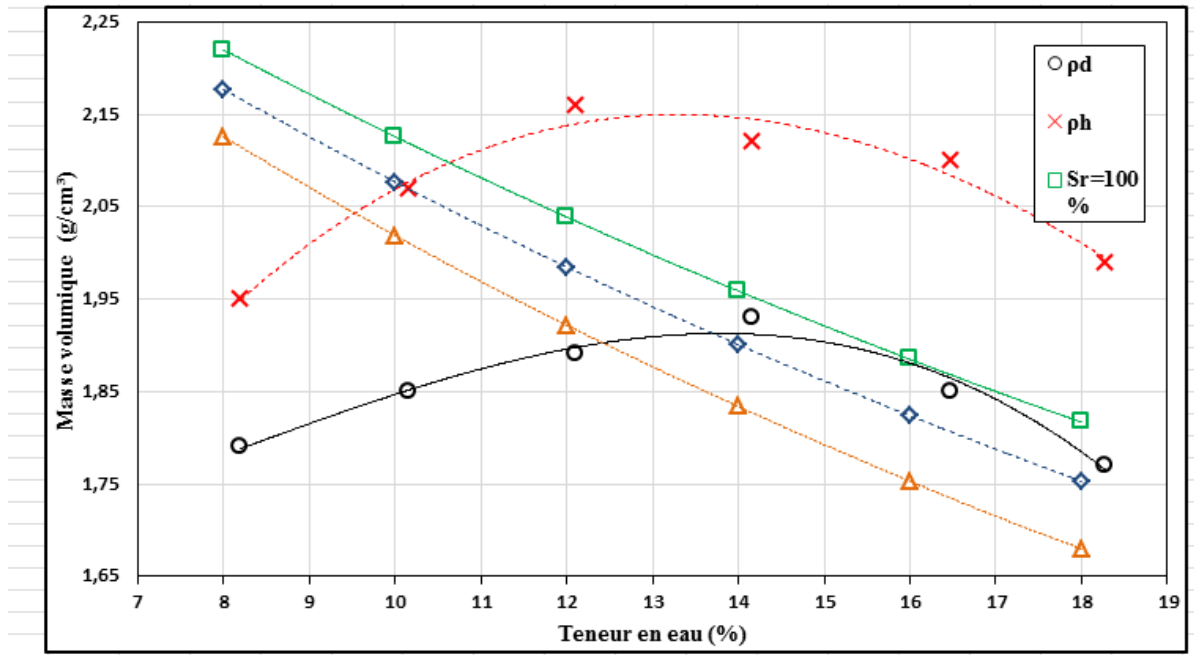


Figure 3.12 : Courbe de la masse volumique sèche et humide selon mode de Proctor du mélange (90% sable de dune et 10% argile)

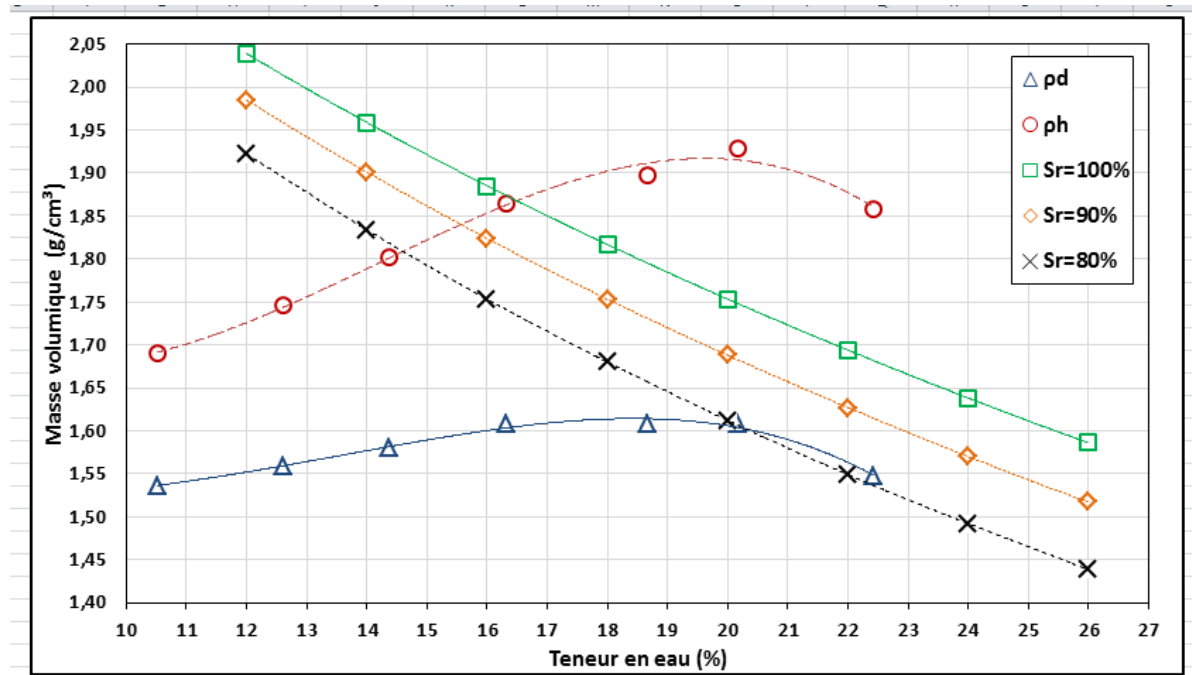


Figure 3.13 : Graphe : Courbe de la masse volumique sèche et humide selon mode de vibration du mélange (90% sable de dune et 10% argile)

Tableau 3.9 : Résultat obtenus d'essai de proctor

Teneur en eau proposée (%)	8	10	12	14	16	18
Masse volumique sèche (g/cm ³)	1.63	1.68	1.77	1.73	1.68	1.76
Teneur en eau mesurée (%)	8	10	12	14	16	18

3.4.3. Essai de perméabilité pour les données de Proctor :

Le tableau et la courbe montrent que la densité sèche maximale est atteinte pour une teneur en eau de 12 %, soit:

- $d_{max} = 1,77 \text{ g/cm}^3$
- $w_{opt} \sim 11,3 \%$

Ces valeurs confirment que le matériau étudié répond bien au compactage sous forte énergie, tout en conservant une humidité modérée.

a. Préparation de l'échantillon

L'essai de perméabilité à charge variable a été réalisé sur un sol fin, conformément aux normes de Laboratoire. La préparation de l'échantillon s'est déroulée selon les étapes suivantes :

1. Reconstitution des conditions du sol en place : Le sol a été homogénéisé puis introduit dans le perméamètre par couches minces. Chaque couche a été soigneusement compactée sous une pression uniforme dans le but d'atteindre une densité bien déterminée. L'échantillon a été préparé sous les conditions de compactage correspondant au Proctor (normal ou modifié).
2. Finition de l'éprouvette : Une fois le cylindre rempli, le surplus de matériau a été arasé à l'aide d'une lame métallique. Ensuite, un second disque perforé ainsi qu'une toile à maille de 0.08 mm ont été placés en tête de l'échantillon.

3.4.4. Essai de cisaillement direct

L'essai de cisaillement direct a pour objectif de déterminer les paramètres de résistance au cisaillement du matériau étudié dans deux conditions distinctes de compactage : compactage statique classique (type Proctor) et compactage par vibration. Trois niveaux de contrainte normale ont été appliqués dans chaque série d'essais : 106 kPa, 212 kPa, et 318 kPa.

3.4.4.1. Cisaillement après compactage (méthode statique)



Les résultats expérimentaux obtenus sont reportés dans le tableau ci-dessous :

Tableau 3.10 – Résultats de l'essai de cisaillement direct après compactage

Contrainte normale σ (kPa)	Contrainte de cisaillement τ (kPa)
106	75.33
212	122.72
318	204.07

Le tracé du nuage de points (τ en fonction de σ) permet d'ajuster une droite de rupture de la forme :

$$\tau = a \cdot \sigma + c$$

Par régression linéaire, nous avons obtenu :

$$\tau = 0,67 \cdot \sigma + 4,53$$

D'où :

- Cohésion apparente : $c = 4.53$ kpa
- Angle de frottement interne : $\phi = \arctan(0,67) \approx 33,99$

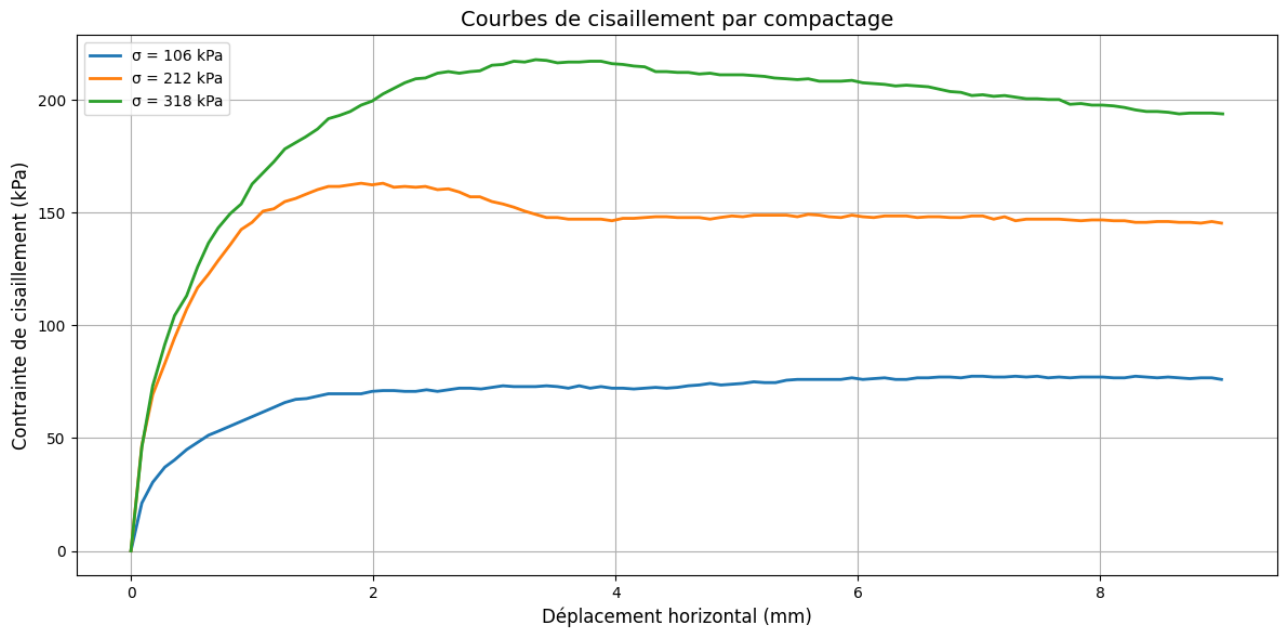


Figure 3.14 : Courbe de cisaillement par compactage

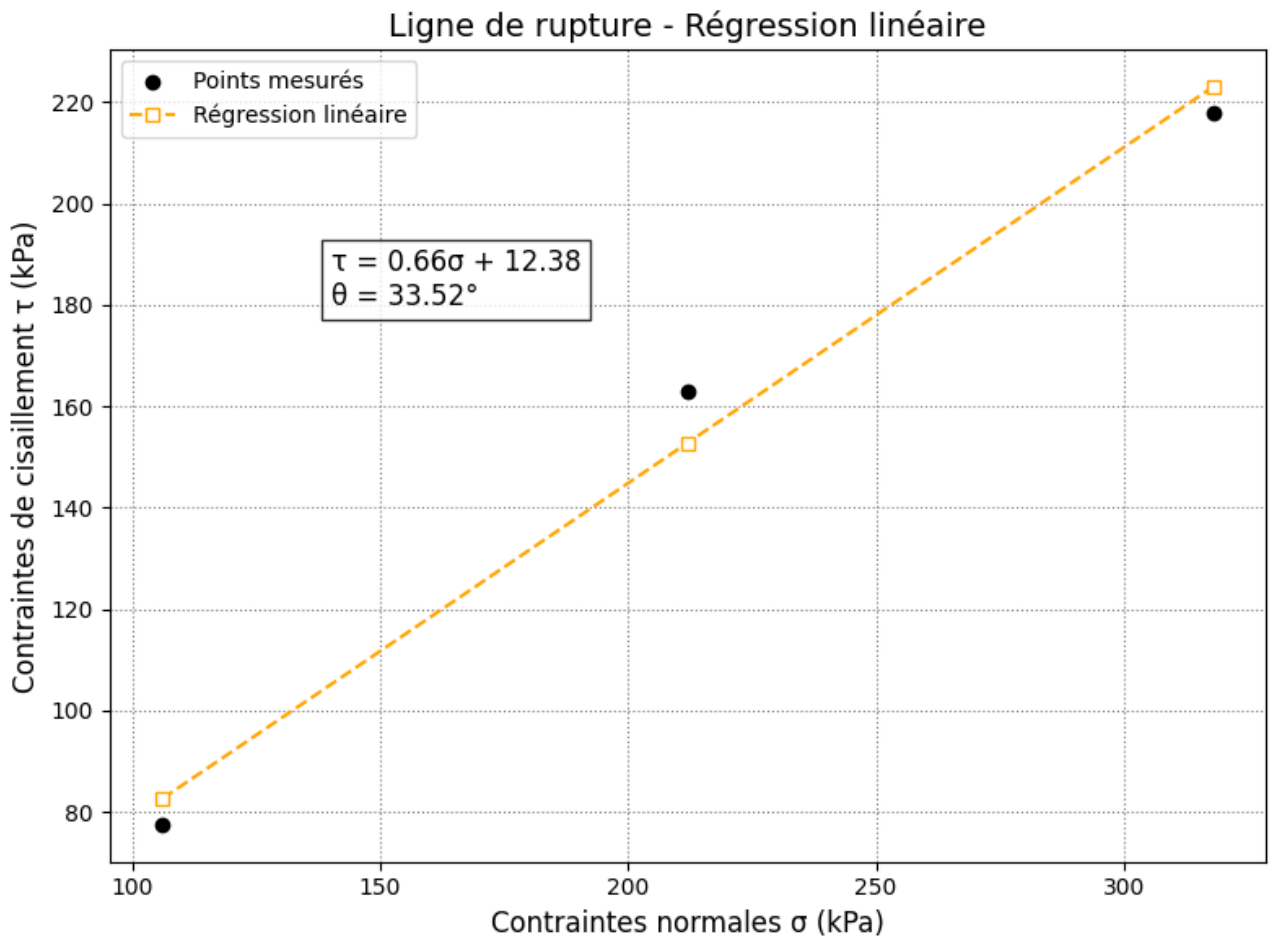


Figure 3.14 : Ligne de rupture

3.4.4.2. 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.



Figure 3.14: Essais Table de vibration

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

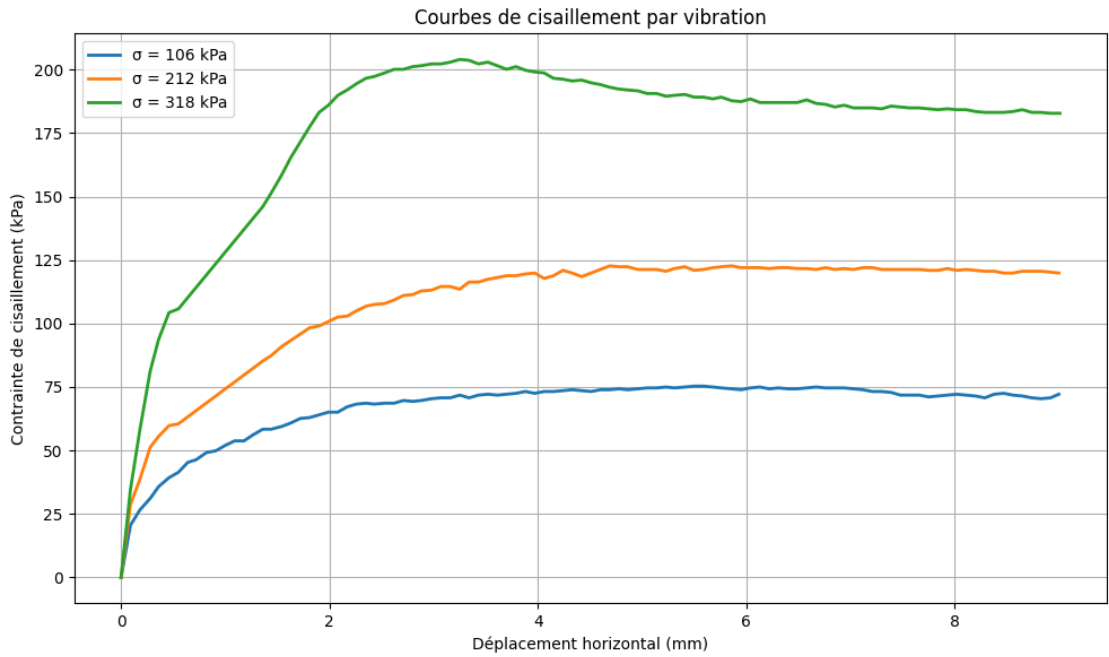


Figure 3.15 : Courbe du mélange 90% sable de dune et 10% argile

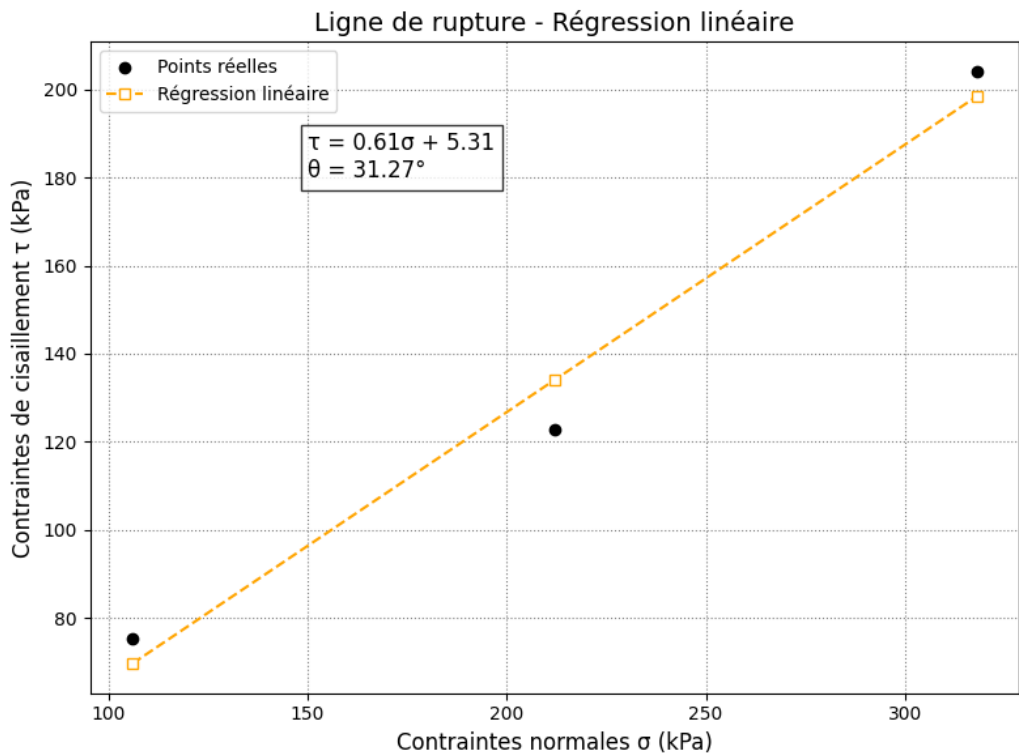


Figure 3.16 : Ligne de rupture – régression linéaire

Tableau 3.11 : Résultats d’essai de compactage du mélange 90% sable de dune et 10% argile

Contrainte normale σ (kPa)	Contrainte de cisaillement τ (kPa)
106	77.45
212	163.04
318	217.87

3.4.5. Comparaison entre l'essai Proctor et l'essai par vibration — Essai de perméabilité modifier le titre essai de proctor ou de vibraton ?

Dans le cadre de cette étude, deux approches de compactage ont été explorées afin d'évaluer leur influence sur la perméabilité du sol : d'une part, la méthode Proctor modifiée et, d'autre part, la méthode de compactage par vibration. L'objectif était d'observer les variations de la densité sèche et de la porosité, et leurs effets sur le coefficient de perméabilité.

Résultats obtenus :

Pour la méthode Proctor :

- Densité sèche maximale $\gamma_{dmax} = 1,77 \text{ g/cm}^3$
- Teneur en eau optimale $w_{opt} \approx 11,3 \%$
- Coefficient de perméabilité mesuré : $k \approx 1,23 \times 10^{-3} \text{ cm/s}$ (valeurs décroissantes en fonction du temps)

Pour la méthode par vibration :

- Densité sèche mesurée : $\gamma_d \approx 1,99 \text{ g/cm}^3$ (état sec)
- Perméabilité mesurée : k variant de $1,0 \times 10^{-2} \text{ cm/s}$ à $6,2 \times 10^{-4} \text{ cm/s}$ en fonction du temps de percolation.

Interprétation :

L'analyse comparative des résultats met en évidence que :

- Le compactage par vibration génère une densité plus élevée, traduisant une structure plus dense et moins poreuse du matériau.
- Cette densification accrue est directement corrélée à une réduction plus rapide du coefficient de perméabilité, ce qui témoigne d'un meilleur comportement en termes d'imperméabilisation.

En résumé, la méthode de vibration semble plus performante pour des applications nécessitant une faible perméabilité (ex. : ouvrages hydrauliques ou remblais étanches), tandis que la méthode Proctor est plus adaptée aux configurations classiques de fondations ou de couches de forme.

3.4.6. Comparaison entre essai de Proctor et essai par vibration – Essai de

cisaillement **Comparaison entre l'essai Proctor et l'essai par vibration — Essai de cisaillement**

Afin d'évaluer l'influence de la méthode de compactage sur la résistance mécanique du sol, une comparaison directe a été établie entre les résultats des essais de cisaillement réalisés sur deux échantillons compactés selon deux approches différentes : compactage statique (Proctor) et compactage dynamique (vibration).

Résultats récapitulatifs :

Tableau 3.20 – Paramètres déduits des équations de rupture pour les deux méthodes de compactage

Méthode de compactage	Équation de la droite de rupture $\tau = a\sigma + c$	Angle de frottement interne φ (°)	Cohésion apparente c (kPa)
Proctor	$\tau = 0.67\sigma + 4.53$	$\varphi \approx 33.99^\circ$	$c \approx 4.53$
Vibration	$\tau = 0.73\sigma + 0.29$	$\varphi \approx 36.11^\circ$	$c \approx 0.29$

Analyse comparative :

- Le compactage par vibration génère une droite de rupture plus inclinée (pente plus élevée), ce qui se traduit par un angle de frottement interne supérieur. Ce phénomène est généralement associé à une meilleure interconnexion des grains, induite par l'agitation vibratoire qui favorise leur réarrangement optimal.
- En revanche, la méthode Proctor permet d'obtenir une cohésion apparente plus importante, traduisant une structure plus compacte et cohésive du sol, probablement due à une distribution homogène de l'humidité lors de la compaction par couches successives.

Implication géotechnique :

- Pour des ouvrages où la résistance au cisaillement est critique (ex. : remblais porteurs, plateformes soumises à des charges horizontales), la vibration constitue une méthode de compactage favorable.
- À l'inverse, lorsque la stabilité à long terme sous faible contrainte ou en présence d'humidité est recherchée, la méthode Proctor pourrait être plus avantageuse du fait de la cohésion résiduelle plus élevée.

3.4.7. Comparaison de la perméabilité selon le mode de compactage : Proctor

vs. Vibration essais de proctor ou vibration

L'évaluation de la perméabilité constitue un critère déterminant dans le choix de la méthode de compactage des sols pour les applications géotechniques, notamment dans les couches de fondation et les remblais routiers. Afin d'appréhender l'effet du mode de compactage sur la perméabilité, deux types de configurations ont été testés : un compactage selon la méthode Proctor modifié et un compactage par vibration. Les résultats obtenus permettent une comparaison directe de l'évolution du coefficient de perméabilité k .

Résultats expérimentaux :

- Compactage Proctor :
 - Densité sèche maximale : 1.77 g/cm^3
 - Teneur en eau optimale : $\approx 11.3 \%$
 - Coefficient de perméabilité final observé : $k \approx 0.00108 \text{ cm/s}$ à $t = 300 \text{ s}$
- Compactage par vibration :
 - Densité sèche mesurée : 1.63 g/cm^3
 - Masse volumique apparente plus faible
 - Coefficient de perméabilité final observé : $k \approx 0.00401 \text{ cm/s}$ à $t = 60 \text{ s}$

Analyse comparative :

Les courbes de perméabilité en fonction du temps montrent une nette différence entre les deux méthodes de compactage. Le matériau compacté selon Proctor présente une perméabilité significativement plus faible que celui compacté par vibration. Cette différence peut être attribuée à :

- Une densification plus efficace dans la méthode Proctor, qui réduit la porosité et les interstices facilitant le passage de l'eau.
- Le compactage par vibration laisse davantage de vides interconnectés, expliquant une plus grande perméabilité.
- Le compactage Proctor permet une meilleure homogénéité de la structure interne du sol, optimisant ainsi la répartition des grains fins et réduisant les canaux préférentiels d'écoulement.

Interprétation technique :

Du point de vue géotechnique, une faible perméabilité est souvent recherchée pour améliorer la stabilité des remblais et limiter les phénomènes de lessivage ou de liquéfaction. À ce titre, la méthode Proctor s'avère plus adaptée pour des projets nécessitant une faible transmissivité hydraulique.

3.4.8. Comparaison entre les résultats de cisaillement : méthode Proctor vs.

Vibration aussi essais de vibration ou proctor

Dans le cadre de cette étude, deux séries d'essais de cisaillement direct ont été menées sur des échantillons de sable-argile compactés selon deux méthodes distinctes : le compactage Proctor modifié et le compactage par vibration. L'objectif est d'évaluer l'effet de la méthode de compactage sur les paramètres de résistance au cisaillement du sol, notamment la cohésion apparente (c) et l'angle de frottement interne (φ).

Données expérimentales :

Tableau 3.21 – Résultats comparatifs des essais de cisaillement selon la méthode de compactage (Proctor vs. Vibration)

Méthode de compactage	σ (kPa)	τ (kPa)	Droite de rupture	φ (°)	c (kPa)
Proctor	106, 212, 318	75.33, 122.72, 204.07	$\tau = 0.67\sigma + 4.53$	≈ 33.99	≈ 4.53
Vibration	106, 212, 318	77.45, 163.04, 217.87	$\tau = 0.73\sigma + 0.29$	≈ 36.11	≈ 0.29

Analyse des résultats :

Compactage Proctor :

- Une droite de rupture de pente modérée ($a = 0.67$), traduisant une bonne résistance au cisaillement.
- Une cohésion apparente relativement élevée ($c \approx 4.53$ kPa), probablement due à une meilleure compacité des grains et à l'emboîtement des particules.
- Un angle de frottement interne estimé à $\varphi \approx 33.99^\circ$, indiquant une résistance au glissement intergranulaire modérée.

Compactage par vibration :

- Une pente plus forte ($a = 0.73$), traduisant un angle de frottement plus élevé $\varphi \approx 36.11^\circ$, ce qui suggère une mobilisation accrue des forces de frottement internes.

- Toutefois, une cohésion presque nulle ($c \approx 0.29$ kPa), conséquence probable d'une structure plus lâche avec moins de contact solide entre grains fins.

Interprétation technique :

- Le compactage Proctor améliore la cohésion du sol, rendant le matériau plus apte à résister à des forces de traction et à des déformations tangentielles.
- Le compactage par vibration, en revanche, favorise les contacts ponctuels et les réarrangements granulo-structuraux, augmentant ainsi l'angle de frottement, mais réduisant la cohésion apparente.
- En contexte de stabilité de pente ou de fondation, le choix entre cohésion et frottement interne dépendra de la nature des charges et de l'environnement hydrique.

3.5. Discussion et interprétation les résultats :

3.5.1. interprétation les résultats des essais d'identification :

3.5.1.1. Analyse chimique:

D'après les résultats (Tableau 3.1), nous remarquons que la CaCO_3 est l'élément prépondérant. On constate aussi que le taux du carbone très élevé pour l'argile, donc on a des argiles calcaire

3.5.1.2. Analyse granulométrique

La distribution granulométrique (Figure 3.4) pour l'argile obtenue nous montre que : pour Bouhraoua

- Une présence de particule gravier est de (78%), 2)
- La particule sableuse (gros et fin) est de (22%), 3)
- Le pourcentage de particules limoneuses est de (31%) 4)
- Le pourcentage de particule argileuse est de (10%)

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

3.5.1.3. Limite d'Atterberg

Selon le Diagramme de Casa grande (Figure III.5) le sol de Bouhraoua sont classe comme limons très plastique.

3.5.2. les résultats de compactage selon mode Proctor modifié :

a. interprétation la courbe de proctor

Figure III.10 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 vibration :

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 les résultats de perméabilité selon mode proctor

Pour l'échantillon compacté par vibration, la courbe CBR (Figure III.13) 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.

d. interprétation les résultats de perméabilité selon mode vibration :

L'essai de perméabilité réalisé sur un matériau compacté par vibration permet d'évaluer la capacité du sol à transmettre l'eau à travers sa structure, en conditions d'état saturé, quasi-saturé ou compacté. Les résultats montrent une évolution cohérente du coefficient de perméabilité (K) en fonction du temps et de l'état du matériau.

Observations principales :

- Le matériau testé est un mélange composé de 90 % de sable de dune de Sebseb et 10 % d'argile de Bouhrawa.
- Le coefficient de perméabilité (K) diminue progressivement avec l'augmentation du temps de percolation, indiquant une stabilisation progressive de l'écoulement à travers la matrice granulaire.
- Cette décroissance de K témoigne de l'influence du compactage par vibration qui provoque un réarrangement plus dense des particules, réduisant la taille et la continuité des vides interconnectés.

Interprétation technique :

- Le compactage par vibration favorise une meilleure homogénéisation du sol, ce qui entraîne une réduction de la perméabilité globale, tout en conservant une densité sèche élevée.
- Le faible pourcentage d'argile contribue à une occlusion partielle des vides, ce qui diminue la conductivité hydraulique tout en maintenant une certaine porosité utile.

Implication géotechnique :

Un sol compacté par vibration avec un K de l'ordre de 10^{-3} à 10^{-4} cm/s peut être considéré comme un matériau semi-perméable, adapté pour des couches de fondation filtrantes ou des ouvrages de retenue nécessitant une stabilité à l'écoulement contrôlé.

Le choix de cette méthode peut être privilégié pour les plateformes routières ou les remblais où la résistance mécanique et la maîtrise du drainage sont essentielles.

3.5.3. Comparaison entre essai de les résultats de perméabilité selon mode proctor et essai T.vibration

a. interprétation les résultats de cisaillement selon mode proctor

Pour l'échantillon compacté par vibration, la courbe CBR (Figure III.13) 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.

b. interprétation des résultats interprétation des résultats de cisaillement selon mode vibration :

L'analyse des résultats de l'essai de cisaillement direct réalisé sur l'échantillon compacté par vibration révèle une amélioration notable du comportement mécanique du matériau par rapport à la méthode classique de compactage Proctor.

En effet, la droite de rupture obtenue pour cet essai est caractérisée par une pente plus élevée ($\tau = 0,73\sigma + 0,29$), traduisant un angle de frottement interne plus important ($\varphi \approx 36,11^\circ$). Ce paramètre indique une meilleure mobilisation des forces de frottement entre les particules du sol. Cela peut être expliqué par une réorganisation plus dense et plus stable des grains sous l'effet de la vibration, favorisant un contact plus efficace entre les particules.

En revanche, la cohésion apparente ($c \approx 0,29$ kPa) est relativement faible, ce qui suggère que le comportement du sol est dominé par les frottements internes plutôt que par la cohésion intergranulaire. Cette observation est cohérente avec la nature majoritairement granulaire du matériau utilisé (90 % sable + 10 % argile), dans lequel la vibration facilite la compacité sans nécessairement induire de liaison cohésive forte.

Ainsi, le mode de compactage par vibration s'avère efficace pour améliorer la résistance au cisaillement du sol, particulièrement dans les conditions où une densité optimale et un comportement drainant sont recherchés. Il offre une alternative avantageuse au compactage statique, notamment dans les projets nécessitant une performance mécanique élevée sous sollicitation.

3.6. Conclusion

L'ensemble des investigations expérimentales menées dans ce chapitre a permis d'analyser en détail les caractéristiques mécaniques et physiques d'un sol composite formé majoritairement de sable de dune et d'argile de Bouhrawa. Les essais de compactage ont montré que la méthode Proctor modifiée permet d'atteindre une densité sèche maximale de $1,77 \text{ g/cm}^3$ pour une teneur en eau optimale d'environ 11,3 %. Toutefois, les essais de cisaillement ont révélé que le compactage par vibration procure une meilleure résistance au cisaillement, avec un angle de frottement interne plus élevé ($\varphi \approx 36,11^\circ$), comparé à la méthode statique ($\varphi \approx 33,99^\circ$), malgré une cohésion légèrement plus faible.

Par ailleurs, l'essai de perméabilité sur échantillon compacté par vibration indique une réduction progressive du coefficient de perméabilité en fonction du temps, témoignant d'une fermeture progressive des vides sous saturation. Les essais d'identification ont également permis de situer

l'argile de Bouhrawa dans la catégorie des matériaux plastiques à cohésion modérée, ce qui justifie son comportement observé en cisaillement.

En somme, la combinaison d'un sable propre et d'une argile modérément plastique, soumise à un compactage efficace (notamment par vibration), permet d'obtenir un matériau présentant une bonne stabilité mécanique et un comportement drainant adapté aux besoins des infrastructures routières ou de remblais techniques.

Chapitre 04

COMORTEMENT MEQUANIQUE ET HYDRIQUE DU MELANGE SABLE - ARGILE

4.1. Introduction

Le comportement des sols traités ou mélangés, notamment les mélanges sable–argile, dépend largement de leurs propriétés hydriques et mécaniques. Ce chapitre vise à rassembler et à comparer les principaux résultats expérimentaux obtenus lors des essais de compactage (Proctor modifié et vibration), de perméabilité et de cisaillement direct, afin de mieux comprendre l'influence de la méthode de mise en œuvre sur la performance globale du matériau étudié.

4.2. Comparaison des résultats de compactage (Proctor modifié vs vibration)

Le tableau comparatif ci-dessous synthétise les résultats clés issus des deux méthodes de compactage :

Tableau 4.1 – Comparaison des paramètres de compactage

Méthode de compactage	Densité sèche maximale γ_{dmax} (g/cm ³)	Teneur en eau optimale w_{opt} (%)
Proctor modifié	1.77	11.3
Vibration	1.76	13.7

Interprétation :

- La méthode Proctor modifié donne une densité légèrement plus élevée à une teneur en eau plus faible, ce qui indique une meilleure compacité sous une énergie de compactage bien contrôlée.
- Le compactage par vibration nécessite plus d'eau, traduisant une efficacité énergétique moins bonne, avec des vides résiduels plus importants.

4.3. Comparaison des résultats de perméabilité

Les essais de perméabilité ont été réalisés à partir des échantillons compactés par vibration.

Tableau 4.2 – Résultats des coefficients de perméabilité en fonction du temps

Temps (s)	Coefficient de perméabilité k (cm/s)
30	0.01786
60	0.00825
90	0.00508
120	0.00353
150	0.00267
180	0.00215
210	0.00169
252	0.00135
270	0.00123
300	0.00108
330	0.00096
360	0.00085
390	0.00076
420	0.00069
450	0.00062

Interprétation :

- On observe une décroissance continue du coefficient de perméabilité k avec le temps, ce qui peut s'expliquer par une fermeture progressive des vides et un réarrangement des grains du mélange.
- Le comportement global reflète une perméabilité modérée à faible, compatible avec une structure de sol semi-compactée, ce qui pourrait convenir à des ouvrages de type filtre ou fondation drainante avec contrôle d'humidité.

4.4. Comparaison des résultats de cisaillement

Tableau 4.3 – Paramètres de résistance au cisaillement selon la méthode de compactage

Méthode de compactage	Cohésion c (kPa)	Angle de frottement ϕ (°)
Compactage Proctor	4.53	33.99
Vibration	0.29	36.11

Interprétation :

Le compactage Proctor offre une meilleure cohésion initiale, ce qui traduit une bonne liaison entre les particules fines et grossières.

- Cependant, la méthode de vibration induit un angle de frottement plus élevé, signe d'une meilleure mobilisation des résistances internes en phase post-rupture.

4.5. Limites de l'étude

Bien que cette étude expérimentale ait permis de dégager des tendances et des conclusions utiles concernant le comportement du mélange sable-argile compacté, certaines limites doivent être reconnues :

a. Contraintes logistiques et temporelles

Certaines expériences n'ont pas pu être menées à terme en raison de l'indisponibilité temporaire du personnel du laboratoire, notamment les essais de perméabilité à charge variable et les mesures plus poussées de la persistance. Cela a restreint la possibilité de comparer certains résultats ou de les confirmer par des méthodes complémentaires.

b. Nombre d'échantillons

L'analyse a été menée sur un nombre limité d'échantillons pour chaque type de sol (Bouhrawa). Cela restreint la généralisation des résultats à d'autres types de sols ou d'argiles potentiellement utilisés dans d'autres contextes géographiques.

c. Conditions expérimentales en laboratoire

Les essais ont été réalisés dans un environnement contrôlé, ce qui ne reproduit pas toujours les conditions réelles de terrain (présence de surcharge, drainage naturel, cycles de séchage et d'humidité, etc.). Ainsi, certaines propriétés telles que la portance ou la résistance au cisaillement pourraient différer in situ.

d. Limitation du protocole de vibration

Le protocole de compactage par vibration n'a pas été optimisé pour différentes fréquences ou amplitudes. Les résultats obtenus reflètent donc uniquement un scénario de vibration donné, sans étude comparative sur d'autres régimes de compactage dynamique.

4.6. Recommandations pratiques

Au vu des résultats obtenus et des limites observées, plusieurs recommandations peuvent être formulées afin d'optimiser l'utilisation du mélange sable-argile dans des projets de remblai ou de plateforme :

a. Choix de la méthode de compactage

Il est conseillé de privilégier la méthode de compactage Proctor modifiée pour les mélanges sable-argile, en particulier lorsque la portance et la densité maximale sont des exigences prioritaires. Cette méthode a démontré une efficacité supérieure, tant sur le plan de la densité sèche atteinte que sur celui de la résistance au cisaillement.

b. Contrôle de la teneur en eau

Le taux d'humidité optimal étant autour de 11 à 12 % pour notre mélange étudié, il est impératif de bien maîtriser la teneur en eau avant et pendant le compactage pour atteindre les performances maximales. Un excès d'eau peut entraîner une diminution de la densité sèche et favoriser la génération de vides.

c. Vérification de la composition des sols

La présence de carbonate de calcium, révélée par les essais sur l'argile de Bouhrawa, influence la cohésion et la stabilité mécanique du sol. Il est donc recommandé de procéder à une identification complète (Atterberg, CaCO_3 , bleu de méthylène) avant tout projet de remblai, afin d'adapter le traitement ou les additifs éventuels.

d. Validation sur site

Avant une généralisation sur un chantier réel, un essai à grande échelle (essai de plaque, essai CBR in situ, etc.) est fortement recommandé afin de confirmer les performances observées en laboratoire et d'ajuster les paramètres de compactage selon les contraintes locales.

e. Amélioration de la méthode par vibration

Si l'on souhaite utiliser la méthode de vibration (pour des raisons logistiques ou d'accessibilité de matériel), il serait judicieux d'étudier l'influence de la fréquence, de la durée et de l'intensité de la vibration sur la compacité finale. Une optimisation expérimentale de ces paramètres pourrait améliorer significativement les résultats obtenus.

4.7. Perspectives de recherche

Au terme de cette étude expérimentale, plusieurs axes de recherche peuvent être envisagés afin d'approfondir la compréhension du comportement des mélanges sable-argile et d'optimiser leur mise en œuvre :

a. Étude à long terme du comportement mécanique

Il serait pertinent de suivre l'évolution des propriétés mécaniques du sol compacté (portance, cohésion, perméabilité) sur le long terme, en particulier sous l'effet du trafic, des cycles humides-secs ou des variations de température. Cela permettrait de mieux évaluer la durabilité réelle du matériau dans un contexte d'infrastructure.

b. Extension à d'autres types de sols

Les résultats obtenus avec l'argile de Bouhrawa et le sable de Digne Sebseb sont encourageants, mais il serait intéressant de reproduire les mêmes essais avec d'autres sources de sable ou d'argile afin d'identifier les variables les plus influentes et de construire un modèle généralisable.

c. Utilisation de liants ou stabilisants

L'ajout de stabilisants (chaux, ciment, cendres volantes...) pourrait être étudié comme piste d'amélioration, notamment pour renforcer la portance ou réduire la sensibilité à l'eau des mélanges. Une comparaison des performances mécaniques entre sols naturels et sols stabilisés permettrait de proposer des formulations optimisées.

d. Simulation numérique du compactage et du cisaillement

Le recours à des logiciels de simulation (éléments finis, DEM) permettrait de mieux prédire le comportement du sol selon différents scénarios de chargement et de compactage, réduisant ainsi les besoins en essais physiques coûteux et chronophages.

e. Analyse économique et environnementale

Enfin, une étude du coût global des méthodes de compactage (main-d'œuvre, énergie, matériel) ainsi qu'une analyse de leur impact environnemental (consommation d'eau, émissions, transport) apporterait un éclairage précieux pour les projets d'aménagement durable, en particulier dans les zones sahariennes où les ressources sont limitées.

4.8. Synthèse finale discussion finale

À l'issue de cette étude expérimentale, l'objectif principal a été atteint : évaluer le comportement mécanique et hydraulique d'un mélange sable-argile issu de matériaux locaux (sable de Digne Sebseb et argile de Bouhrawa), soumis à différentes méthodes de compactage (Proctor modifié et vibration),

en vue d'une utilisation potentielle dans des travaux de terrassement ou d'infrastructure en milieu saharien.

Les résultats des essais de caractérisation (granulométrie, limites d'Atterberg, essais Proctor, perméabilité, cisaillement) ont permis de mieux cerner les propriétés physiques et mécaniques de ce matériau mixte. Il ressort que :

- Le mélange présente une bonne aptitude au compactage sous énergie modifiée, avec une densité sèche maximale atteinte à une teneur en eau relativement modérée ($w_{opt} \approx 11,3 \%$; $\rho_{dmax} \approx 1,77 \text{ g/cm}^3$).
- L'essai de perméabilité a montré que le matériau possède une faible conductivité hydraulique (k décroissant exponentiellement avec le temps), ce qui est favorable à la stabilité des remblais.
- L'essai de cisaillement direct a révélé un comportement cohérent avec la nature cohésive-frictionnelle du sol, la méthode de vibration mobilisant davantage les frottements internes ($\phi \approx 36,1^\circ$) tandis que le compactage classique présente une meilleure cohésion initiale ($c \approx 4,5 \text{ kPa}$).
- L'analyse comparative entre les deux modes de compactage a mis en évidence la supériorité de la méthode Proctor en termes de portance, mais également l'intérêt du compactage dynamique pour améliorer la résistance au cisaillement.

Enfin, cette étude confirme l'intérêt d'exploiter les matériaux locaux pour des applications géotechniques, à condition de bien maîtriser leurs caractéristiques et d'adapter les méthodes de mise en œuvre. Elle ouvre aussi la voie à de futures recherches, notamment en stabilisation, simulation numérique ou analyse environnementale, pour une valorisation durable des ressources régionales.

CONCLUSION GENERALE DE L'ETUDE

Dans les régions sahariennes, le recours à des matériaux locaux pour les travaux de terrassement et de remblai est une solution économiquement et logistiquement avantageuse. Cependant, l'utilisation de mélanges sable-argile pose des défis en matière de comportement mécanique, de compacité, et de durabilité, d'où l'intérêt de cette étude expérimentale visant à évaluer les performances d'un mélange composé à 90 % de sable de dune et 10 % d'argile de Bouhrawa, compacté selon deux méthodes : Proctor modifié et vibration.

L'étude a permis de tirer plusieurs conclusions importantes :

- Le mélange présente une **bonne aptitude au compactage** avec une densité sèche maximale de $1,77 \text{ g/cm}^3$ pour une teneur en eau optimale de 11,3 %, en méthode Proctor modifiée.
- Le **comportement hydraulique** montre une faible perméabilité, favorable à la stabilité des remblais.
- En **cisaillement direct**, le compactage par vibration mobilise davantage les frottements internes ($\varphi \approx 36,1^\circ$), tandis que le Proctor offre une meilleure cohésion initiale ($c \approx 4,5 \text{ kPa}$).
- L'analyse comparative des deux méthodes a montré que le **Proctor modifié est préférable** pour maximiser la portance, tandis que la **vibration améliore la résistance au cisaillement**.

Malgré la richesse des résultats, plusieurs limites ont été identifiées :

- Le **nombre restreint d'échantillons** limite la généralisation des conclusions à d'autres sols ou contextes.
- Certaines **expériences complémentaires n'ont pas pu être réalisées**, notamment la perméabilité à charge variable.
- Les essais ont été conduits **en conditions de laboratoire**, sans prise en compte des effets réels du terrain (charges, drainage, cycles climatiques).
- Le **protocole de compactage par vibration n'a pas été optimisé** selon différents paramètres (fréquence, amplitude), ce qui restreint l'analyse.
- **Privilégier la méthode Proctor modifiée** dans les projets où la densité maximale et la portance sont prioritaires.

- **Contrôler rigoureusement la teneur en eau** avant et pendant le compactage (autour de 11–12 %) pour optimiser les performances.
- **Vérifier systématiquement la composition des sols**, notamment la teneur en carbonate de calcium, qui influence la cohésion.
- **Effectuer des validations sur site** (CBR, essai de plaque) avant généralisation à grande échelle.
- En cas d'usage de la méthode vibratoire, **étudier l'impact des paramètres de vibration** pour améliorer la compacité et la résistance.

Perspectives de recherche

Pour prolonger ce travail, plusieurs axes sont à envisager :

- Suivre **l'évolution à long terme des propriétés mécaniques** sous conditions réelles (trafic, humidité).
- Tester **d'autres types de sols et mélanges** pour développer un modèle généralisable.
- Explorer **l'utilisation de stabilisants** (chaux, ciment, etc.) pour améliorer la portance et la durabilité.
- Intégrer des **modélisations numériques** pour simuler les comportements du sol selon différents scénarios.
- Réaliser une **analyse économique et environnementale** des méthodes de compactage afin de favoriser une approche durable et adaptée aux contraintes des régions sahariennes.

Références Bibliographiques

1. A. Ardjani, "Comportement des argiles gonflantes en milieu aride," *Archives des Sciences du Sol*, vol. 12, no. 3, pp. 155–172, 1945.
2. ASTM D1883-14, Standard Test Method for CBR (California Bearing Ratio) of Laboratory-Compacted Soils. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2014.
3. A. F. Bensalem, "Étude des propriétés géotechniques de l'argile de Saïda et son amélioration par ajout de la chaux," *ResearchGate*, 2016. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/figure/Courbe-de-lessai-Proctor-modifie-Argile-de-Saïda-ArS_fig1_304490043. [Accessed: 02-Jun-2025].
4. M. Budhu, *Soil Mechanics and Foundations*, 3rd ed. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 2010.
5. M. Budhu, *Soil Mechanics and Foundations*, 3rd ed. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 2010, sec. 5.5, p. 155.
6. H. R. Cedergren, *Seepage, Drainage, and Flow Nets*. Hoboken, NJ: Wiley-Interscience, 1989, p. 88.
7. D. P. Coduto, *Foundation Design: Principles and Practices*, 2nd ed. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall, 2001, ch. 4, p. 94.
8. "Compaction Test," *Geoengineer.org*. [Online]. Available: <https://www.geoengineer.org/education/laboratory-testing/compaction-test>. [Accessed: Jun. 1, 2025].
9. R. F. Craig, *Craig's Soil Mechanics*, 7th ed. London: Spon Press, 2004, sec. 4.3.2, p. 89.
10. Y. Daheur, "Caractérisation des matériaux sahariens à base de sable," *Revue Maghrébine des Matériaux et de l'Environnement*, vol. 5, no. 2, pp. 49–58, 2019.
11. B. M. Das, *Principles of Foundation Engineering*, 8th ed. Boston, MA: Cengage Learning, 2015, sec. 3.6, p. 108.
12. B. M. Das, *Principles of Foundation Engineering*, 8th ed. Boston, MA: Cengage Learning, 2015, p. 126.
13. "Direct Shear Test," *Geoengineer.org*. [Online]. Available: <https://www.geoengineer.org/education/laboratory-testing/direct-shear-test>. [Accessed: Jun. 1, 2025].
14. GDS Instruments, "1000kN (1MN) & 2000kN (2MN) Static Compression-Only Loadframe," [Online]. Available: <https://www.google.com/search?q=http://www.gdsinstruments.com/gds-products/gds-products/1000kn-1mn-2000kn-2mn-static-compression-only-loadframe>. [Accessed: 02-Jun-2025].

15. M. Gueddouda, "Étude géotechnique des mélanges sable-bentonite," Centre de Recherches en Génie Civil Saharien (CRGCS), Université de Ouargla, 2011.
16. H. Guessoum and F. Hebal, op. cit., p. 37.
17. Hafsa 2023
18. K. H. Head, Manual of Soil Laboratory Testing, Volume 1: Soil Classification and Compaction Tests. London: Pentech Press, 1980, sec. 5.3.
19. K. H. Head, Manual of Soil Laboratory Testing, Volume 3: Effective Stress Tests. London: Pentech Press, 1986, ch. 2.
20. R. D. Holtz and W. D. Kovacs, An Introduction to Geotechnical Engineering. Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall, 1981, sec. 6.4, p. 202.
21. Humboldt, "Moule à Proctor modifié (2 pièces) 5.15," Geneq, [Online]. Available: <https://geneq.com/materials-testing/fr/produit/humboldt/moule-a-proctor-modifie-2-pieces-515>. [Accessed: 02-Jun-2025].
22. KBL Pakistan, "Dynamic Cone Penetrometer – Application & Equipment". [Online]. Available: <https://kblpk.com/dynamic-cone-penetrometer-application-equipment/>. [Accessed: Jun. 1, 2025].
23. S. M. Nwankwo, M. A. Tijjani, and A. A. Suleiman, "Assessment of the Geotechnical Properties of Lateritic Soils in Minna, North Central Nigeria for Road Design and Construction," International Journal of Scientific & Engineering Research, vol. 6, no. 1, Jan. 2015.
24. B. Scott, M. Jaksan, and Y. L. Kuo, "Use of Proctor Compaction Testing for Deep Fill Construction Using Impact Rollers". [Online]. [Accessed: Jun. 1, 2025].
25. K. Terzaghi, R. B. Peck, and G. Mesri, Soil Mechanics in Engineering Practice, 3rd ed. Hoboken, NJ: Wiley-Interscience, 1996, ch. 6, p. 231.
26. K. Terzaghi, R. B. Peck, and G. Mesri, Soil Mechanics in Engineering Practice, 3rd ed. Hoboken, NJ: Wiley-Interscience, 1996, ch. 8, p. 28

Annexe A.

A.1. Résultats complets de l'essai Proctor modifié

Teneur en eau ajoutée (%)	Masse sèche (g)	Volume du moule (cm ³)	Densité sèche γ_d (g/cm ³)
8	3430.6	2104	1.63
10	3544.2	2104	1.68
12	3733.9	2104	1.77
14	3660.2	2104	1.73
16	3590.5	2104	1.68
18	3710.0	2104	1.76

A.2. Résultats bruts de l'essai de perméabilité

Tableau A.2.1 – Coefficients de perméabilité mesurés en fonction du temps

Temps (s)	Niveau d'eau (cm)	Coefficient k (cm/s)
30	2.5	1.786×10^{-2}
60	3.4	8.250×10^{-3}
90	4.5	5.080×10^{-3}
120	5.8	3.530×10^{-3}
150	6.9	2.670×10^{-3}
180	7.6	2.150×10^{-3}
210	9.8	1.690×10^{-3}
252	10.9	1.350×10^{-3}
270	11.5	1.230×10^{-3}
300	12.3	1.080×10^{-3}
330	13.0	9.600×10^{-4}
360	13.7	8.500×10^{-4}
390	14.3	7.600×10^{-4}
420	14.9	6.900×10^{-4}
450	15.5	6.200×10^{-4}

Tableau A.2.2 – Paramètres physiques de l'échantillon selon son état

État de l'échantillon	Hauteur (cm)	Δh (cm)	Surface (cm ²)	Volume (cm ³)
Moule vide	15.5	0	153.86	2384.83
Compacté (Proctor vibration)	14.9	0.6	153.86	2292.51
Matériau sec	13.7	1.8	153.86	2107.88
Matériau saturé	14.5	1.0	153.86	2230.97

Tableau A.2.3 – Calculs des masses et densités pour les différentes conditions

Condition	Masse (g)	Masse de l'échantillon seule (g)	Densité humide γ_h (g/cm³)	Densité sèche γ_d (g/cm³)
Proctor compacté	13550	4168.5	1.818	1.632
Matériau sec	13578	4196.5	1.991	1.991
Matériau saturé	14897.2	5515.7	2.472	2.043

B.1. Fiches techniques des matériaux

B.1.1. Sable de dune de Sebseb

Le sable utilisé provient des zones désertiques de Sebseb (Wilaya de Ghardaïa). Il se caractérise par:

- Une texture très fine à grains subarrondis ;
- Une couleur beige clair uniforme ;
- Une très faible teneur en matières fines (SST = 0.84 m²/g) ;
- Un équivalent de sable de 76 %, classé « propre » selon la norme EN 933-8 ;
- Une classification LCPC : SB (sable brut) ;
- Un poids volumique solide $\gamma_s \approx 1.55 \text{ g/cm}^3$;
- Un coefficient de courbure $C_c \approx 1.04$ et un coefficient d'uniformité $C_u \approx 1.5$, indiquant une faible gradation ;
- Absence de matière organique.

Utilisation : convenable comme matériau de base pour les travaux routiers en zones arides, après correction granulométrique ou traitement.

B.1.2. Argile de Bouhrawa

L'argile est extraite de la région de Bouhrawa (Wilaya de Ghardaïa). Ses caractéristiques principales sont :

- Limite de liquidité (WL) : 57.60 % ;
- Limite de plasticité (WP) : 26.83 % ;
- Indice de plasticité (IP) : 30.77 % \Rightarrow forte plasticité ;
- Valeur de bleu de méthylène (VBS) : 2.75 \Rightarrow présence marquée d'argiles actives ;
- Teneur en carbonate de calcium (CaCO₃) : 9 % ;
- Activité argileuse (AC) : 1.59 \Rightarrow argile modérément active ;
- Sol cohésif, à gonflement modéré, sensible à l'eau.

Utilisation : utilisé pour stabiliser ou former des mélanges avec des sols granuleux (comme le sable de dune) dans des travaux de fondation ou de couche de forme.

B.2. Protocoles normalisés utilisés

Les essais réalisés dans le cadre de ce travail de recherche ont été menés conformément aux normes françaises AFNOR :

B.2.1. NF P94-093 – Essai Proctor (Proctor normal et Proctor modifié)

- **Objet** : Détermination des caractéristiques de compactage (densité sèche maximale γ_{d_max} et teneur en eau optimale w_{opt}).
- **Principe** : compactage de sol par couches dans un moule cylindrique, avec mesure du poids et du volume pour déduire la densité.
- **Utilisation** : évaluation du comportement d'un matériau sous compactage pour des couches de fondation.

B.2.2. NF P94-068 – Essai au bleu de méthylène

- **Objet** : Évaluation de la teneur en particules argileuses actives.
- **Principe** : dosage de la capacité d'adsorption de colorant par les particules fines d'un sol.
- **Utilisation** : classification des sols fins et identification des argiles gonflantes.

B.2.3. NF P94-056 – Analyse granulométrique (par tamisage à sec)

- **Objet** : Détermination de la distribution des tailles des grains dans un sol.
- **Principe** : tamisage du sol à travers une série de tamis normalisés, puis pesée des refus.
- **Utilisation** : classification granulométrique, calcul de C_u et C_c , orientation du traitement ou de l'usage du sol.

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 فتاشة علي عبد رحمان و عمير عيد نور الدين

الشعبة: هندسة مدنية

التخصص: هياكل

نحن الأساتذة:

الإمضاء	الصفة	الرتبة والجامعة الأصلية أو المؤسسة	الإسم واللقب
	رئيس	أستاذ مساعد أ (جامعة غرداية)	صايتي عصام
	ممتحن	أستاذ مساعد أ (جامعة غرداية)	نسيل عبد الحميد
	مؤطر	أستاذ مساعد أ (جامعة غرداية)	عزوز فاطمة الزهران

نرخص بإيداع النسخة النهائية لمذكرة الماستر بعنوان:

Influence du mode de compactage sur les propriétés hydriques et mécaniques d'un matériau local

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

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

امضاء المسؤول عن التصحيح



محمد الكبير إبراهيم

رئيس قسم الري والهندسة المدنية

كلية العلوم و التكنولوجيا

AZOUZA Fatma Zahra
Enseignante