

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

République Algérienne Démocratique et Populaire

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة غرداية

Université de Ghardaïa



كلية العلوم والتكنولوجيا

Faculté des Sciences et de la Technologie

قسم الهندسة المدنية

Département Génie civil

Mémoire

Pour l'obtention du diplôme de Master

Domaine : Sciences et de la Technologie

Spécialité : Génie civil

Thème

Influence de la teneur en eau et l'énergie de compactage sur les performances mécanique d'un mélange sable de dune - Argile

Déposer le : 26/05/2026

Par :

- DAHEUR Amira

- BEN LAKHDIM Affaf

Devant le jury composé de :

PR. DAHEUR ELHADJ GUESMIA

Professeur

Encadreur

Univ. Ghardaïa

MME-AZOUZ FATIMA ZOHRA

-MAA

Président

Univ. Ghardaïa

DR-DAMDOUM ABDELLAH

-Docteur

Examineur

Univ. Ghardaïa

Année universitaire : 2025/2026



Remerciement :

Avant tout, nous remercions « ALLAH » de nous avoir donné le courage ainsi que la force nécessaire pour mener à bien ce modeste travail.

Nous adressons nos plus sincères et chaleureux remerciements à notre encadreur, Pr. DAHEUR GUESMIA, pour son accompagnement précieux, ses conseils avisés et son soutien constant tout au long de la réalisation de ce travail.

Nos remerciements s'adressent aussi au président et aux membres du jury pour l'honneur qu'ils nous ont fait en acceptant d'évaluer ce travail.

Nous exprimons également notre reconnaissance à l'ensemble de nos professeurs, ainsi qu'au personnel administratif et académique de l'Université de Ghardaïa pour leur contribution à notre formation.

Nous remercions chaleureusement notre famille pour son soutien moral et sa présence tout au long de notre parcours.

Enfin, nous exprimons notre gratitude aux travailleurs de la société Laboratoire des Travaux Publics du Sud – Algérie pour leur collaboration et leur disponibilité.

Merci à toutes et à tous.

Dédicace

a

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

*Je dédie ce modeste travail à mes très chers parents,
qui ont toujours été une source de soutien, d'amour et d'inspiration.*

À ma chère mère,
*pour sa tendresse infinie, sa patience, ses sacrifices et ses prières qui
m'ont accompagné tout au long de mon parcours. Aucun mot ne
saurait exprimer ma gratitude pour tout ce qu'elle a fait pour moi.*

À mon cher père,
*pour ses conseils précieux, sa confiance, son soutien constant et les
valeurs qu'il m'a transmises. Son courage et sa persévérance
resteront pour moi un exemple à suivre.*

À mes frères,
*pour leur affection, leurs encouragements et tous les moments de joie
partagés ensemble.*

À toute ma famille,
pour leur soutien moral, leur présence et leurs prières sincères.

À mes amis et à toutes les personnes
*qui m'ont aidé, soutenu et encouragé de près ou de loin durant la
réalisation de ce mémoire.*

*Enfin, je dédie ce travail à tous ceux qui croient en la valeur du savoir
et de la persévérance.*

Avec toute ma reconnaissance et mon profond respect.

AMIRA

Dédicace

a

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

Je dédie ce travail à ma famille bien-aimée, qui a toujours été mon refuge et ma source de motivation.

À ma mère,

Pour son amour inconditionnel, sa patience infinie et ses sacrifices silencieux qui ont fait de moi ce que je suis aujourd'hui.

À mon père,

Pour son soutien constant, sa confiance et les valeurs qu'il m'a inculquées, me permettant de surmonter les obstacles avec courage et détermination.

À mes chers frères et sœurs,

pour leur soutien, leur complicité et leur présence qui ont rendu ce parcours plus léger et plus agréable.

À tous les membres de ma famille, petits et grands, pour leur affection et leurs encouragements.

À toutes les personnes qui ont participé, de près ou de loin, à l'élaboration de ce travail, je tiens à exprimer ma sincère gratitude.

AFFAF

Résumé

Ce travail fait partie de l'exploitation des matériaux locaux de la région de dans le but de les Utiliser dans des projets d'ingénierie civile, en particulier pour les routes. Il est connu que la Région regorge d'une quantité considérable de sable de dune et d'argile, ce qui nous pousse à Chercher à les exploiter. Ensuite, une série d'essais préliminaires Sur les matériaux utilisés et un ensemble d'essais directeurs ont été effectués pour déterminer Les caractéristiques mécaniques du mélange sable-argile après leur mélange à 70 % de sable De dune et 30 % d'argile.

La formulation optimale retenue dans cette étude est celle composée de 70 % de sable de Dune et 30 % d'argile (70SD30AR), déterminée à partir des essais Proctor modifiés réalisés Par Ostada AZZOUZ et al. (2017). Ce mélange a été sélectionné en raison de ses Performances géotechniques satisfaisantes parmi les différentes formulations sable de Dune–argile étudiées.

L'objectif de ce travail est d'évaluer l'influence du déficit hydrique sur la portance et le Comportement mécanique du mélange 70SD30AR. Pour ce faire, des essais de portance CBR (Immédiat et après immersion) ainsi que des essais de compression simple ont été réalisés à Différentes teneurs en eau : à l'optimum Proctor modifié (OPM), à OPM–2 % et à OPM–4 %, Sous une énergie de compactage normalisée et une énergie majorée de 10 %.

Les résultats obtenus montrent que le mélange présente une bonne portance à l'état immédiat, Particulièrement à l'OPM. Toutefois, sa résistance diminue après immersion, révélant une Certaine sensibilité à l'eau. Un déficit hydrique modéré (OPM–2 %), combiné à une Augmentation de l'énergie de compactage, améliore les performances mécaniques du Matériau.

En revanche, un déficit plus important (OPM–4 %) entraîne une baisse significative De la portance et de la résistance mécanique. Les essais de compression simple confirment Également que les performances du mélange dépendent fortement de la teneur en eau et du Degré de compacité, les meilleures résistances étant obtenues au voisinage de l'OPM.

Cette étude met en évidence l'importance de l'optimisation des conditions de compactage et De contrôle de l'humidité pour valoriser les matériaux locaux dans la construction routière en Milieu saharien.

Mots-clés : sable de dune, argile, mélange optimum Proctor modifié, essai CBR, Compression simple, compactage, portance, matériaux locaux, construction routière, milieu Saharien.

ملخص

يندرج هذا العمل في إطار تامين واستغلال المواد المحلية لمنطقة [اسم المنطقة]، بهدف استخدامها في مشاريع الهندسة المدنية، ولا سيما في مجال المنشآت الطرقية. ومن المعروف أن المنطقة تزخر بكميات هائلة من رمل الكثبان والصلصال (الطين)، مما يدفعنا إلى البحث عن سبل استغلالها. وبناءً على ذلك، تم إجراء سلسلة من الاختبارات الأولية لتحديد خصائص المواد المستخدمة، تلتها مجموعة من الاختبارات التوجيهية لتحديد الخصائص الميكانيكية لخليط مكون من 70% من رمل الكثبان و30% من الصلصال.

إن الصياغة المثلى التي تم اعتمادها في هذه الدراسة هي تلك المكونة من 70% رمل كثبان و30% صلصال (70SD30AR)، والتي تم تحديدها بناءً على اختبارات "بروكتور المعدل (Modified Proctor)" التي أجراها أستاذة عزوز وآخرون (2017). وقد تم اختيار هذا الخليط نظراً لأدائه الجيوتقني المرضي مقارنة بمختلف تركيبات (رمل الكثبان-الصلصال) الأخرى التي شملتها الدراسة.

يهدف هذا العمل بشكل أساسي إلى تقييم تأثير العجز المائي (نقص المحتوى المائي) على قدرة التحمل والسلوك الميكانيكي للخليط (70SD30AR) ولتحقيق ذلك، تم إجراء اختبارات مؤشر التحمل كاليفورنيا CBR (الفوري وبعد الغمر في الماء)، بالإضافة إلى اختبارات الضغط البسيط (الغير محصور) عند محتويات مائية مختلفة؛ عند المحتوى المائي الأمثل لبروكتور المعدل (OPM)، وعند (2%-OPM)، وعند (4%-OPM)، وذلك تحت طاقة دك (رص) معيارية وأخرى مضاعفة بنسبة 10%.

تظهر النتائج التي تم الحصول عليها أن الخليط يتمتع بقدرة تحمل جيدة في الحالة الفورية، لاسيما عند المحتوى المائي الأمثل (OPM). ومع ذلك، تنخفض مقاومته بعد الغمر في الماء، مما يكشف عن حساسية معينة تجاه المياه. وبيّنت النتائج أن عجزاً مائياً معتدلاً (2%-OPM)، مصحوباً بزيادة في طاقة الدك، يؤدي إلى تحسين الأداء الميكانيكي للمادة. في المقابل، يؤدي العجز المائي الأكبر (4%-OPM) إلى انخفاض ملحوظ في قدرة التحمل والمقاومة الميكانيكية. كما تؤكد اختبارات الضغط البسيط أن أداء الخليط يعتمد بشكل كبير على المحتوى المائي ودرجة الرص، حيث يتم تسجيل أفضل قيم للمقاومة بالقرب من المحتوى المائي الأمثل (OPM). تؤكد هذه الدراسة على الأهمية البالغة لتحسين ظروف الدك والتحكم في الرطوبة من أجل تامين المواد المحلية بفعالية في تشييد الطرق بالبيئات الصحراوية.

الكلمات المفتاحية: رمل الكثبان، الصلصال (الطين)، الخليط الأمثل لبروكتور المعدل، اختبار CBR، الضغط البسيط، الدك (الرص)، قدرة التحمل، المواد المحلية، إنشاء الطرق، البيئة الصحراوية.

Abstract

This work contributes to the valorization of local materials from the region, aiming for their integration into civil engineering projects, particularly road construction. Given the considerable quantities of dune sand and clay abundant in this region, investigating their exploitation is of paramount interest. Consequently, a series of preliminary characterization tests on the raw materials, followed by a set of guiding laboratory tests, were conducted to determine the mechanical characteristics of a specific mixture consisting of 70% dune sand and 30% clay.

The optimal formulation selected for this study consists of 70% dune sand and 30% clay (70SD30AR), based on Modified Proctor tests previously established by Ostada AZZOUZ et al. (2017). This specific blend was chosen due to its satisfactory geotechnical performance compared to the other dune sand-clay formulations investigated.

The primary objective of this research is to evaluate the influence of hydric deficit (moisture deficiency) on the bearing capacity and mechanical behavior of the 70SD30AR mixture. To achieve this, California Bearing Ratio (CBR) tests (both immediate and soaked) along with unconfined compressive strength (UCS) tests were carried out at various moisture contents: at the Optimum Moisture Content of the Modified Proctor test (OMC), at OMC–2%, and at OMC–4%. These tests were performed under both standard compaction energy and a 10% increased compaction energy.

The experimental results demonstrate that the mixture exhibits a high bearing capacity in its immediate state, particularly at OMC. However, its strength significantly decreases after soaking, revealing a susceptibility to water sensitivity. A moderate hydric deficit (OMC–2%), combined with an increase in compaction energy, enhances the mechanical performance of the material. Conversely, a more severe deficit (OMC–4%) leads to a significant drop in both bearing capacity and mechanical strength. Furthermore, the unconfined compression tests confirm that the performance of the mixture is heavily dependent on moisture content and compaction degree, with the optimal strengths achieved around the OMC.

This study underscores the crucial importance of optimizing compaction conditions and strict moisture control to effectively valorize local materials for road construction in Saharan environments.

Keywords: dune sand, clay, Modified Proctor optimal mixture, CBR test, unconfined compression, compaction, bearing capacity, local materials, road construction, Saharan environment.

Matière	Page
Dédicace	/
Remerciement	/
Liste des figures	/
Liste des tableaux	/
Table des matières	/
Introduction	1
CHAPITRE I: GENERALITES	
1. INTRODUCTION	3
2 LES SABLES DE DUNE	3
2.1 Définition	3
2.2. Formation et localisation des sables de dune	3
2.3. Caractéristique des sables de dunes	4
2.3.1 Composition chimique et minéralogique	4
2.3.2 Granulométrie	6
2.3.3 Formes des grains	6
2.3.4 Propreté	7
2.3.5 Caractéristiques physiques	7
2.3.6 Caractéristiques mécanique et géotechnique	8
3. LES ARGILES	8
3.1. Définition	8
3.2. Formation des minéraux argileux et localisation	9
3.3. Caractéristique des Argiles	9
3.3.1 Composition chimique et minéralogique	9
3.3.2 Granulométrie	10
3.3.3 Formes des grains	11
4. DIFFERENTS ASPECTS DU CONTEXTE SAHARIEN	11
4.1 Contexte climatique	12
4.2 Le sol support	13
4.3 Le trafic	13
4.4 Mode de construction des routes au Sahara selon la technique routière	13

Saharienne (TRS)	
4.4.1 Terrassements	14
4.4.2 Couche de fondation	14
4.4.3 Couche de base	14
4.4.4 Couche de roulement	15
5. UTILISATION DU SABLE DE DUNES DANS LE DOMAINE ROUTIER	15
5.1 Utilisation du sable de dunes dans le domaine routier	16
5.2 Utilisation des argiles dans le domaine routier	17
5.3 Utilisation de sable de dunes–argile dans le domaine routier	18
6. CONCLUSION	19
CHAPITRE II : IDENTIFICATIONS GEOTECHNIQUES DES MATERIAUX DES BASES	
1. INTRODUCTION	22
2. PRÉSENTATION DU MATÉRIAU ÉTUDIÉ	22
2.1. Sable de dune	22
2.2. Argile	22
3. PRÉSENTATION DE SITE	23
3.1. Localisation des matériaux	23
3.1.1. Sable de dune	23
3.1.2. Argile	23
3.2. Présentation de la wilaya de Ghardaïa	24
3.3. Climatologie de Ghardaïa	24
3.4. Caractéristiques générales du climat	24
4. CARACTÉRISTIQUE GÉOTECHNIQUE DES MATÉRIAUX DE BASE	26
4.1. Analyses chimiques	26
4.1.1. Sable de dune	26
4.1.2 Argile	27
4.2 Analyse granulométrique	28
4.2.1 Analyse granulométrique par tamisage	28
4.2.2 Analyse granulométrique par sédimentométrie	28
4.3 Qualité des fines	31
4.4. Les limites d’Atterberg	31
4.5 Essai d’équivalent de sable	33

4.6. Essai au bleu de méthylène	34
5. ESSAI DE COMPACTAGE ET DE PORTANCE	36
5.1. Essai Proctor Modifié	36
5.2. Essai CBR	39
5.3. Essai de compression simple	40
5.4. Récapitulatif des essais d'identification	42
6. CLASSIFICATION	43
7. CONCLUSION	43
CHAPITRE III: INFLUENCE DE LA TENEUR EN EAU ET L'ENERGIE DE COMPACTAGE	
1. INTRODUCTION	46
2. RÉCAPITULATION DES CARACTÉRISTIQUES GÉOTECHNIQUES DE MÉLANGE 70SD30AR	46
3. INFLUENCE DE LA TENEUR EN EAU OPTIMALE ET L'ÉNERGIE DE COMPACTAGE SUR LES PERFORMANCES MÉCANIQUE	50
4. LA RÉSISTANCE À LA COMPRESSION	60
4.1. Préparation des échantillons :	62
5. CONCLUSION	66
CONCLUSION GENERALE	67
RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES	69
ANNEXES	72

Titre de figures	page
CHAPITRE I: GENERALITES	
Figure I-1 : Répartition des sables de dune dans le monde	04
Figure I-2 : Courbes granulométriques de deux sables de dunes	05
Figure I-3 : Vue générale (à grande échelle, MEB.) du sable de dune.	07
Figure I-4 : Morphologie des grains d'argile au MEB	11
Figure I-5 : Topographie du Maghreb	12
Figure I-6 : Coupe transversale type d'une chaussée saharienne (Morsli, 2007)	14
CHAPITRE II : IDENTIFICATIONS GEOTECHNIQUES DES MATERIAUX DES BASES	
Figure II-1 : sable de dune	22
Figure II-2 : Argile	23
Figure II. 3: Site d'extraction de l'argile et de sable de dune	24
Figure II-4 : Analyse granulométrique par tamisage	28
Figure II-5: Essai de granulométrie par sédimentométrie	29
Figure II-6 : Courbes granulométriques de sable de dune et d'Argile par rapport aux fuseaux : saharien (Fenzy, 1966), de tuf 1 (0/40) et de tuf 2 (0/20) (CTTP, 2001).	30
Figure II-7 : Détermination de la limite de liquidité	32
Figure II-8: Détermination de la limite de plasticité	32
Figure II-9 : Localisation de l'argile sur le diagramme de Casagrande.	33
Figure II-10 : Essai d'équivalent de sable	34
Figure II-11 : bleu de méthylène (VB)	35
Figure II-12 : Essai de Proctor modifié	37
Figure II-13 : Courbes Proctor modifié de sable de dune et de l'argile.	37
Figure II-14 : presse CBR	41
CHAPITRE III: INFLUENCE DE LA TENEUR EN EAU ET L'ENERGIE DE COMPACTAGE	
Figure III-1 : Courbes granulométrique de mélange 70SD30AR	47
Figure III-2 : Localisation de mélange 70SD30AR sur le diagramme de Casagrande.	48
Figure III-3 : Courbes Proctor modifié de mélange 70SD30AR	49
Figure III-4 : Essais CBR	51
Figure III-5 : Courbes d'effort de poinçonnement en fonction de l'enfoncement pour CBR Immédiat de mélange 70SD30AR compacté à l'OPM.	53
Figure III-6 : Courbes d'effort de poinçonnement en fonction de l'enfoncement pour CBR imbibé de mélange 70SD30AR compacté à l'OPM.	53
Figure III-7: Courbes d'effort de poinçonnement en fonction de l'enfoncement pour CBR Immédiat de mélange 70SD30AR compacté avec 55 coups par couche à l'OPM-2%.	54
Figure III-8 : Courbes d'effort de poinçonnement en fonction de l'enfoncement pour CBR Immédiat de mélange 70SD30AR compacté avec 60 coups par couche à l'OPM-2%.	54

Liste de figures

Figure III-9 : Courbes d'effort de poinçonnement en fonction de l'enfoncement pour CBR Immédiat de mélange 70SD30AR compacté avec 55 coups par couche à l'OPM-4%.	55
Figure III-10: Courbes d'effort de poinçonnement en fonction de l'enfoncement pour CBR Immédiat de mélange 70SD30AR compacté avec 60 coups par couche à l'OPM-4%.	55
Figure III-11: Courbes d'effort de poinçonnement en fonction de l'enfoncement pour CBR imbibé de mélange 70SD30AR compacté avec 55 coups par couche à l'OPM-2%.	56
Figure III-12: Courbes d'effort de poinçonnement en fonction de l'enfoncement pour CBR imbibé de mélange 70SD30AR compacté avec 60 coups par couche à l'OPM-2%.	56
Figure III -13 : Courbes d'effort de poinçonnement en fonction de l'enfoncement pour CBR imbibé de mélange 70SD30AR compacté avec 55 coups par couche à l'OPM-4%.	57
Figure III-14: Courbes d'effort de poinçonnement en fonction de l'enfoncement pour CBR imbibé de mélange 70SD30AR compacté avec 60 coups par couche à l'OPM-4%.	57
Figure III-15: Simulation du durcissement dans une couche sous l'effet de la température ou de la dépression (Ben Dhia M.H. 1983).	62
La Figure III-16 présente la relation entre résistance à la compression (R_c) et la compacité (C).	64

Titre de photos	page
CHAPITRE I: GENERALITES	
Figure I-1 : Morphologie des grains d'argile au MEB	11
CHAPITRE II : IDENTIFICATIONS GEOTECHNIQUES DES MATERIAUX DES BASES	
Figure II-1 : sable de dune	22
Figure II-2 : Argile	23
Figure II-3 : Analyse granulométrique par tamisage	28
Figure II-4 : Essai de granulométrique par sédimentométrie	29
Figure II-5 : Détermination de la limite de liquidité	32
Figure II-6 : Détermination de la limite de plasticité	32
Figure II-7 : Essai d'équivalent de sable	34
Figure II-8 : bleu de méthylène (VB)	35
Figure II-9 : Essai de Proctor modifié	37
Figure II-10 : presse CBR	41
CHAPITRE III: INFLUENCE DE LA TENEUR EN EAU ET L'ENERGIE DE COMPACTAGE	
Figure III-1 : Essais CBR	51

Titre de tableaux	page
CHAPITRE I: GENERALITES	
Tableau I-1 : Analyse chimique des sables (Benna et al. 2004).	5
Tableau I-2 : Analyse minéralogique des sables (Benna et al. 2004).	5
Tableau I-3 : Caractéristiques physiques des différents sables (Benna et al.2004).	7
Tableau I-4 : Composition chimique et minéralogique de l'argile	10
CHAPITRE II : IDENTIFICATIONS GEOTECHNIQUES DES MATERIAUX DES BASES	
Tableau II-1 : Quelques valeurs des éléments climatologiques (Station métrologique de Ghardaïa2023).	25
Tableau II-2 : Les résultats de l'analyse chimique de sable de dune	27
Tableau II-3 : Analyse chimique de l'argile étudiée	27
Tableau II-4 : Résultats récapitulatif de l'analyse granulométrique	30
Tableau II-5- : Résultat des limites des Atterberg	32
Tableau II-6 : Classification des sols en fonction de l'indice de plasticité (SETRA-LCPC 1992).	33
Tableau II-7 : Valeurs de l'équivalent de sable ES.	34
Tableau II-8 : Valeur au bleu de méthylène VB.	35
Tableau II-9 : Qualités des fines des matériaux étudiés.	35
Tableau II-10 : Caractéristiques optimales de Proctor modifié.	38
Tableau II-11 : Caractéristiques de compactage pour quelques matériaux routiers (Gandil, 1988)	38
Tableau II-12 : Valeurs des indices CBR.	39
Tableau II-13 : Caractéristiques géotechniques et mécaniques de sable de dune de SEBSEB et Argile de BOUHRAOUA.	42
CHAPITRE III: INFLUENCE DE LA TENEUR EN EAU ET L'ENERGIE DE COMPACTAGE	
Tableau III-1 : Caractéristiques géotechniques et mécaniques de mélange 70SD30AR	49
Tableau III-2 : Résultats récapitulatifs des valeurs des indices CBR de mélange 70SD30AR.	58
Tableau III -3 : Degré de compactibilité et de traficabilité.	59

Introduction Générale :

Le développement des infrastructures routières en Algérie s'appuie sur la valorisation des ressources locales, dans le but de réduire les coûts de construction tout en garantissant la durabilité des ouvrages. Dans ce cadre, le compactage des sols constitue une étape fondamentale de la construction routière, dans la mesure où il améliore les propriétés géotechniques des matériaux en augmentant leur densité et leur résistance mécanique. Toutefois, son efficacité demeure conditionnée par plusieurs paramètres, notamment la nature du sol, la teneur en eau optimale et l'énergie de compactage.

Dans la wilaya de Ghardaïa, les formations superficielles sont dominées par les sables de dunes et les argiles. Plutôt que de les exploiter séparément, des travaux antérieurs, notamment ceux d'Azzouz et al. (2019) relatifs à l'effet de l'ajout d'argile sur les caractéristiques physico-mécaniques du sable de dune, ont servi de référence. Plusieurs formulations de mélanges sable de dune–argile (SD-AR) ont été étudiées, parmi lesquelles le mélange composé de 70 % de sable de dune et de 30 % d'argile (70SD30AR) a été retenu comme optimal en raison de ses meilleures performances géotechniques.

La problématique de cette étude s'énonce comme suit : le mélange 70SD30AR, compacté à des teneurs en eau inférieures à l'optimum Proctor (OPM-2% et OPM-4%) et sous une énergie de compactage plus élevée, peut-il présenter des performances mécaniques équivalentes ou supérieures ?

L'objectif principal est d'analyser l'influence d'un déficit en eau sur la portance et le comportement mécanique de ce mélange. Plus précisément, il s'agit d'évaluer l'effet de la diminution de la teneur en eau de compactage sur l'indice CBR immédiat, l'indice CBR après immersion ainsi que sur la résistance à la compression simple. Les essais sont réalisés à des teneurs en eau correspondant à l'optimum Proctor modifié diminué de 2 % et de 4 % (OPM-2% et OPM-4%), avec une énergie de compactage normalisée et une augmentation de 10 %. L'atteinte de ces objectifs permettra de proposer un matériau performant, adapté aux couches de base et de fondation des chaussées à trafic faible à moyen, tout en conciliant performance technique et optimisation économique.



Chapitre I

Généralité



1. INTRODUCTION

Les sables de dunes et les argiles sont des matériaux largement disponibles dans les régions arides et semi-arides à relief relativement plat, notamment dans la majorité des pays du bassin méditerranéen. En Algérie, les sables de dunes sont présents dans plusieurs zones désertiques, sous forme de formations dunaires occupant près de 60 % de la superficie totale.

L'abondance de ces ressources naturelles, combinée aux spécificités des milieux désertiques — notamment en termes de nature des sols, de conditions climatiques et de trafic — justifie leur valorisation potentielle en tant que matériaux routiers dans les zones sahariennes.

Dans ce chapitre, après une présentation générale des sables de dunes et des argiles, un aperçu de certains aspects du contexte saharien est proposé. Les principes de la technique routière en milieu saharien ainsi que ses spécificités sont ensuite exposés. Enfin, le chapitre se conclut par une analyse de l'utilisation de ces ressources naturelles en technique routière saharienne.

2 LES SABLES DE DUNE

2.1 Définition :

Les sables présents dans les dunes mobiles sont constitués de particules siliceuses de taille relativement uniforme et généralement fine. Ils se rencontrent dans diverses régions désertiques, où ils s'accumulent sous forme de dunes de hauteurs variables, couvrant de vastes étendues dans le sud de l'Algérie. La vitesse et l'intensité des vents constituent les principaux facteurs contrôlant le tri granulométrique de ces sables, ainsi que leur distance de transport et leurs modes d'accumulation (Oldache, 1988).

Du point de vue minéralogique, le sable est composé de divers constituants, notamment la silice, les silicates, les carbonates et les argiles. Les silicates représentent la famille minérale la plus abondante dans la nature, constituant environ 90 % de la masse de la croûte terrestre. Les sables de dunes sont majoritairement siliceux et présentent une grande pureté, avec des teneurs en carbonates et en argiles généralement limitées à des traces.

2.2. Formation et localisation des sables de dune :

Les dépôts de sables éoliens couvrent environ 6 % de la surface émergée du globe, dont près de 97 % sont localisés dans les grandes zones arides. En moyenne, ces sables recouvrent environ 20 % des régions arides à l'échelle mondiale. Cette proportion varie considérablement selon les continents, allant d'environ 2 % en Amérique du Nord à plus de

30 % en Australie, 25 % en Afrique et plus de 45 % en Asie centrale, comme l'illustre la Figure 1.2 (Pye, 2009, cité par Cherrak, 2015). En Algérie, les sables de dunes sont principalement présents dans les régions méridionales et couvrent près de 60 % du territoire (Kettab, 2007).

Selon plusieurs études menées dans les régions sahariennes, les sables de dunes proviennent principalement de la désagrégation des roches sous l'effet combiné des variations thermiques et de l'altération des sols constituant les lits d'oueds ou d'anciens cours d'eau (Vial, 1978). Il apparaît également que l'intensité et la direction des vents de sable jouent un rôle déterminant dans la localisation et l'extension des gisements, en interaction avec la topographie du terrain.

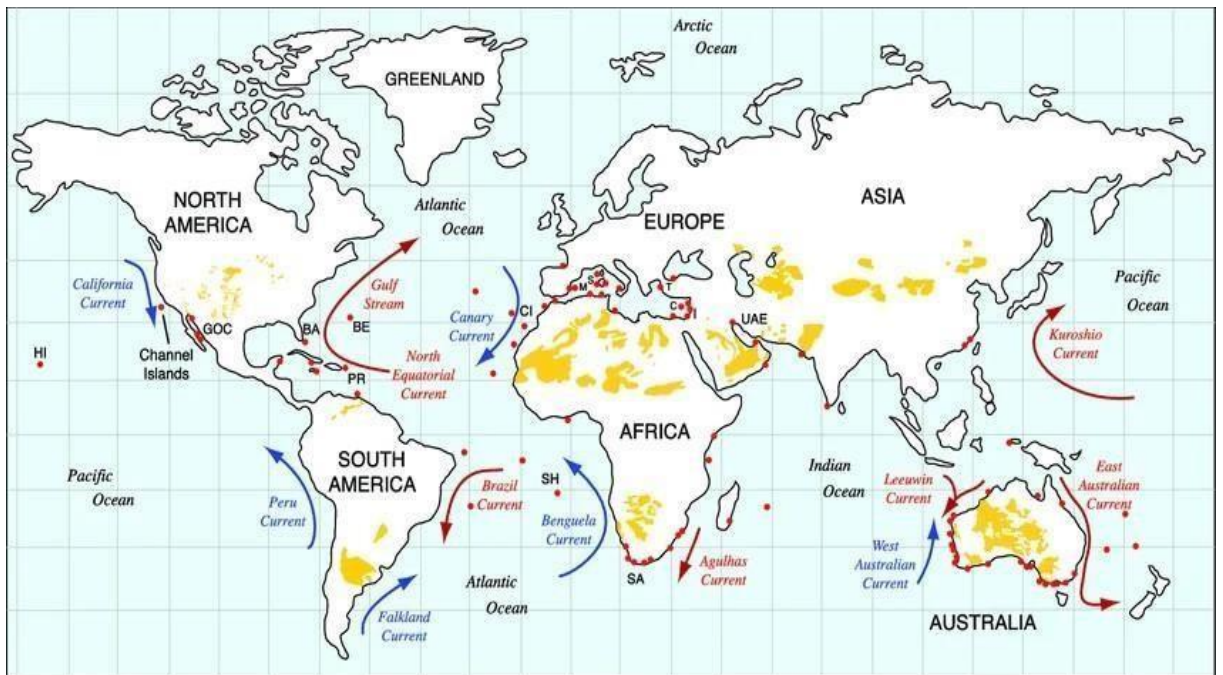


Figure I-1 : Répartition des sables de dune dans le monde

2.3. Caractéristique des sables de dunes :

2.3.1 Composition chimique et minéralogique :

Les sables de dunes du Sahara algérien sont principalement constitués de silice (plus de 95 %), avec des teneurs comprises entre 1 et 2 % de calcaire, ainsi que des traces de divers oxydes. Le Tableau I-1 présente les résultats des analyses chimiques de différents échantillons de sable prélevés dans plusieurs régions du sud de l'Algérie.

Tableau I-1 : Analyse chimique des sables (Benna et al. 2004).

Origine du sable	SiO₂ (%)	Al₂O₃ (%)	Fe₂O₃ (%)	CaO (%)	MgO (%)	SO₃ (%)	K₂O (%)	Na₂O (%)	P.F (%)
Boussaâda	94,14	0,89	0,27	2,03	0,01	0,01	0,3	0,01	2,09
Hassi bahbah	95,21	0,97	0,23	1,32	0,01	0,05	0,4	0,27	1,52
Oum zabed	94,21	1,37	0,39	1,24	0,25	0,13	0,62	0,25	1,17
Touggourt	96,17	0,73	0,21	1,06	0,01	0,05	0,25	0,01	1,48
Ouargla	96,18	1,14	0,36	0,68	0,01	0,10	0,42	0,01	0,79
Timarine	94,49	1,27	0,38	1,68	0,01	0,06	0,42	0,01	1,69
Hamria	93,70	2,11	0,71	0,9	0,19	0,01	0,78	0,01	1,46
Maaraf	79,18	1,19	0,52	7,1	0,62	7,18	0,52	0,21	3,26
Laghouat	88,64	0,92	0,33	5,23	0,01	0,07	0,41	0,37	4,03

L'analyse minéralogique, réalisée par diffractométrie des rayons X sur différents échantillons de sable, montre que ces matériaux sont majoritairement à dominante quartzique. Ils contiennent également, en faibles proportions, des minéraux d'origine sédimentaire (calcite, gypse), magmatique (feldspath) et issus de l'altération des feldspaths (argiles). Le Tableau I-2 présente les résultats de l'analyse minéralogique des différents échantillons.

Tableau I-2 : Analyse minéralogique des sables (Benna et al. 2004).

Origine du Sable	Quartz (%)	Calcite (%)	Feldspaths (%)	Argile (%)	Gypse (%)
Boussaâda	93	3,5	2	1,5	-
Hassi bahbah	93,5	2,5	1,5	2,5	-
Oum zabed	91	2	3,5	3,5	-
Touggourt	95	2	1,5	1,5	-
Ouargla	94	1	2,5	2,5	-
Timarine	91,5	3	2,5	3	
Hamria	89	1,5	4,5	3	
Maaraf	75	4	3	3	15
Laghouat	86,5	9,5	2,5	2,5	

2.3.2 Granulométrie :

Le diamètre maximal ($D_{\max}$) des sables de dunes est de l'ordre de 0,5 mm. Il est généralement plus élevé à proximité de la roche mère et diminue progressivement avec l'éloignement de celle-ci. Parallèlement, les particules deviennent de plus en plus arrondies. Le diamètre des éléments les plus fins est de l'ordre de 0,04 mm.

Le coefficient d'uniformité (Cu) est d'environ 1,8, tandis que le coefficient de courbure (Cc) est proche de 10, ce qui caractérise un sable très fin et mal gradué (Ben Dhia, 1998).

La Figure 1.4 présente les courbes granulométriques de sables de dunes prélevés dans différentes régions du Sahara algérien.

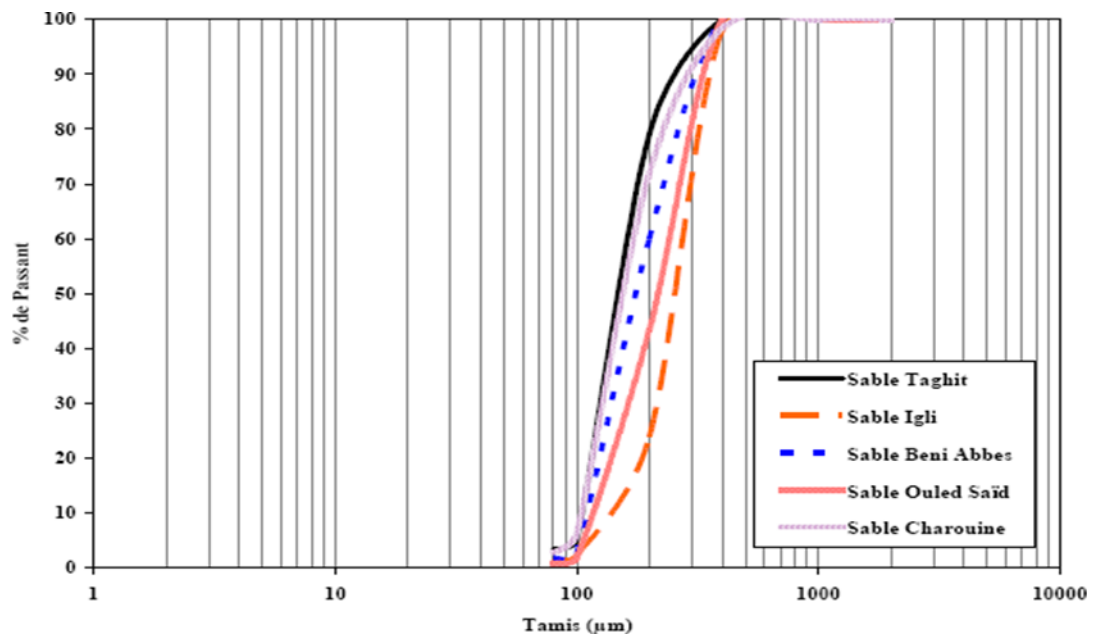


Figure I-2 : Courbes granulométriques de deux sables de dunes

2.3.3 Formes des grains :

L'analyse par microscopie électronique à balayage (MEB), réalisée par Gueddouda (2010) sur un sable de dune de la région de Laghouat, montre que ces matériaux présentent des grains de forme arrondie et à faible angularité (Figure I-3).



Figure I-3 : Vue générale (à grande échelle, MEB.) du sable de dune.

2.3.4 Propreté :

Les sables de dunes sont généralement propres. Leur limite de liquidité (w_L) est de l'ordre de 25, tandis que la limite de plasticité est non mesurable. Ils ne contiennent pratiquement pas de particules argileuses. L'équivalent de sable est supérieur à 60 %, alors que la valeur au bleu est de l'ordre de 0,1.

2.3.5 Caractéristiques physiques :

Benna et al. (2004) ont étudié les sables de dunes provenant de différentes régions du sud algérien. Ils ont conclu que les caractéristiques physiques de ces sables sont pratiquement similaires. Le Tableau I-3 récapitule les caractéristiques physiques des différents sables étudiés.

Tableau I-3 : Caractéristiques physiques des différents sables (Benna et al.2004).

Origine du sable	Masse volumique apparente (kg/m^3)	Coefficient d'absorption d'eau (%)	Compacité (%)	Porosité (%)
Boussaâda	1436	0.44	58	42
Hassi bahbah	1407	0.46	57	43

Oum zabed	1464	0.32	58	42
Touggourt	1483	0.36	55	45
Ouargla	1454	0.30	58	42
Timarine	1455	0.36	58	42
Hamria	1280	0.41	55	45
Maaraf	1474	0.42	58	42
Laghouat	1411	0.36	57	43
El oued	1420	0.39	58	42

2.3.6 Caractéristiques mécanique et géotechnique

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

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

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

3 LES ARGILES :

3.1. Définition :

Les argiles sont des sols très sensibles à l'eau. Elles sont à l'origine de nombreux désordres dans les constructions. -Elles peuvent être classées en deux grandes catégories:

1. argiles plastiques : indurés et très déformables.
2. argiles raides : indurées et présentent un comportement plus fragile que de la limite d'élasticité. Ceci à cause de la présence des carbonates et du quart microscopique.

Les argiles sont formées par l'assemblage de particules de taille inférieure à 2 μm chargées négativement comme la Smectites, l'Illite et la Kaolinite. La présence de tels minéraux rend l'argile fortement sensible aux molécules polaires d'eau. Cette sensibilité se traduit par le

gonflement et/ou le retrait du sol. C'est la variation de la teneur en eau qui est le facteur déclenchant des variations de volume. Une augmentation de la teneur en eau entraîne le phénomène de gonflement tandis que sa diminution induit le phénomène de retrait. La variation du volume des argiles est fortement influencée par les facteurs microscopiques et macroscopiques. A l'échelle microscopique, ces facteurs sont complexes et dépendent principalement des propriétés minéralogiques des matériaux argileux et des propriétés chimiques du fluide hydratant. A l'échelle macroscopique, ils dépendent des liaisons électriques entre les particules.

3.2. Formation des minéraux argileux et localisation :

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).

Les argiles se localisent principalement dans les sols, où elles se forment par l'altération des roches et s'accumulent surtout dans les horizons profonds. On les trouve également en grande quantité dans les bassins sédimentaires, où elles sont transportées par l'eau puis déposées dans les mers, les lacs et les rivières. Leur présence est particulièrement importante dans les régions à climat chaud et humide, où l'altération chimique est intense et favorise la formation de minéraux argileux comme la kaolinite et les smectites. Elles se rencontrent aussi dans les zones mal drainées ou marécageuses, où l'eau stagnante permet l'accumulation d'argiles gonflantes. Enfin, certaines argiles restent sur place dans les roches altérées, formant des dépôts dits résiduels.

3.3. Caractéristique des Argiles :

3.3.1 Composition chimique et minéralogique :

L'argile est un sol largement étudié en génie civil en raison de son influence directe sur la stabilité et le comportement des ouvrages. Elle est principalement constituée de silicates d'aluminium hydratés et se distingue par des propriétés physico-chimiques variables en fonction de sa composition minéralogique (Grim, 1968 ; Mitchell & Soga, 2005).

Les principaux minéraux argileux, tels que la kaolinite, l'illite et la montmorillonite, présentent des comportements distincts, notamment en termes de gonflement, de plasticité et de capacité de rétention d'eau. Par conséquent, l'étude approfondie de l'argile est essentielle pour comprendre son comportement mécanique et optimiser son utilisation dans les projets d'ingénierie civile (Lambe & Whitman, 1969 ; Holtz et al., 2011). Le Tableau I-4 : Composition chimique et minéralogique de l'argile. Adapté de Grim (1968) ; Mitchell & Soga (2005) ; Lambe & Whitman (1969).

Tableau I-4 : Composition chimique et minéralogique de l'argile

<i>Aspect</i>	<i>Élément /Minéral</i>	<i>Formule / Type</i>	<i>Propriété</i>	<i>Impact en génie civil</i>
chimique	silice	Si O ₂	Structure de base	-
chimique	alumine	Al ₂ O ₃	Cohésion	-
chimique	Eau	H ₂ O	Liée dans la structure	-
minéralogique	kaolinite	stable	Non gonflant	Bon pour construction
minéralogique	illite	Intermédiaire	Gonflement modéré	Comportement moyen
minéralogique	montmorillonite	expansif	Fort gonflement	Risque fissuration

3.3.2 Granulométrie :

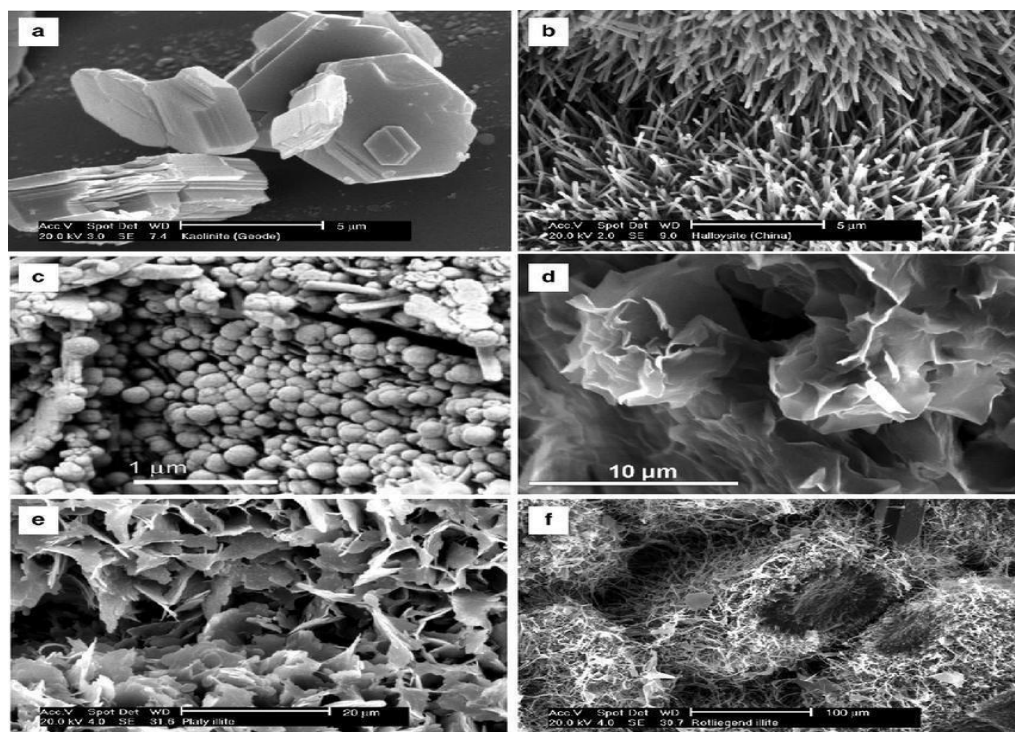
Selon Mitchell et Soga (2005), la granulométrie de l'argile se caractérise par des particules extrêmement fines, dont le diamètre est inférieur à 2 µm (0,002 mm). Cette finesse confère à l'argile une surface spécifique très élevée, ce qui influence directement ses propriétés physiques et mécaniques. En effet, les sols argileux présentent une forte capacité de rétention d'eau, une plasticité importante ainsi qu'une faible perméabilité. De plus, la granulométrie fine favorise des interactions physico-chimiques entre les particules, notamment liées aux forces électrostatiques, ce qui explique le comportement cohésif et le potentiel de gonflement de certains types d'argiles. Comme le soulignent Holtz et al. (2011), la granulométrie

constitue un paramètre essentiel pour la classification et l'étude du comportement des sols en génie civil.

3.3.3 Formes des grains :

L'analyse par microscopie électronique à balayage (MEB), réalisée par Mitchell et Soga (2005) sur des sols argileux, montre que ces matériaux présentent des particules de forme lamellaire, constituées de fines plaquettes superposées. Ces particules se caractérisent par une surface spécifique très élevée et une forte capacité d'interaction entre elles, ce qui influence directement les propriétés mécaniques et hydrauliques du sol. Contrairement aux sables, les grains d'argile ne sont pas arrondis, mais présentent une structure feuilletée responsable de leur cohésion et de leur comportement plastique (Figure I-4)

Figure I-4 : Morphologie des grains d'argile au MEB



4 DIFFERENTS ASPECTS DU CONTEXTE SAHARIEN :

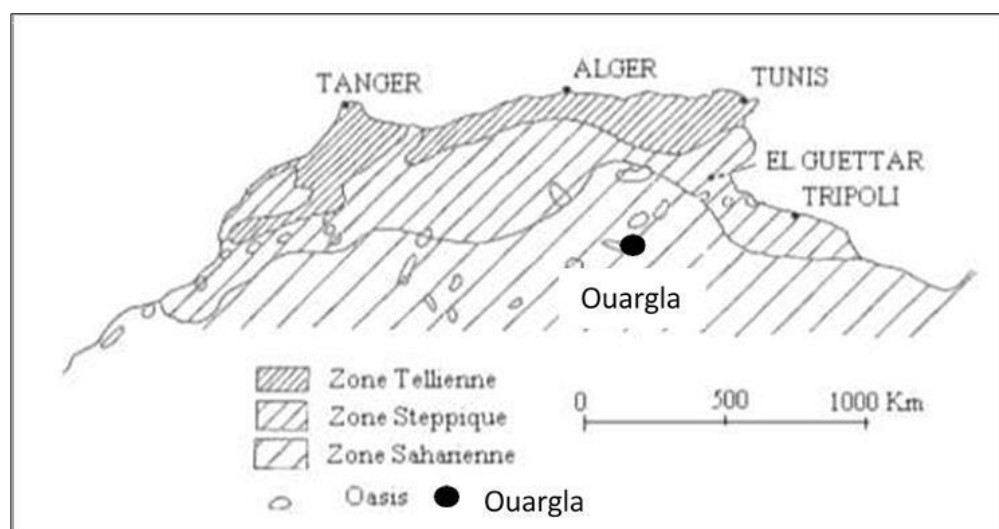
L'Algérie est subdivisée, sur la base de critères géologiques, lithologiques et topographiques, en trois grandes unités structurales : le Système tellien, les Hautes Plaines steppiques et le Sahara (Figure I-4).

Le Système Tellien : Il s'agit d'un ensemble constitué d'une succession de massifs montagneux côtiers et sublittoraux, associés à des plaines.

Les Hautes Plaines Steppiques : Situées entre l'Atlas tellien au nord et l'Atlas saharien au sud, à des altitudes comprises entre 900 et 1200 m, ces régions sont caractérisées par la présence de dépressions salées, telles que les chotts ou les sebkhas. Ces formations correspondent à des lacs continentaux, formés au Pléistocène sous l'effet de pluies torrentielles et d'un ruissellement important.

Le Sahara : Le Sahara constitue un vaste espace désertique, aride et faiblement peuplé, couvrant plus des trois quarts de la superficie du territoire algérien. Il forme une large plate-forme séparant le domaine méditerranéen au nord du domaine tropical au sud. Ce territoire est caractérisé par une grande diversité morphologique, comprenant des plateaux (hamadas et tassilis), des massifs anciens, dont le massif volcanique du Hoggar culminant à environ 3 000 m d'altitude, ainsi que des plaines (regs et ergs) et des dépressions (sebkhas et gueltas).

Figure I-5 : Topographie du Maghreb



4.1 Contexte climatique :

Le Sahara algérien est caractérisé par un climat globalement sec, aride et très chaud durant près de cinq mois par an, avec des températures estivales comprises entre 38 et 45 °C (Touati, 1994). Les précipitations y sont rares et irrégulières, avec une pluviométrie moyenne annuelle inférieure à 100 mm (Touati, 1994). Par ailleurs, les crues, bien que peu fréquentes, se manifestent de manière brutale et soudaine, tandis que les vents de sable sont très fréquents et affectent de vastes étendues du Sahara.

Ces conditions climatiques contribuent à la bonne tenue des chaussées et favorisent l'utilisation de matériaux locaux de diverses natures.

4.2 Le sol support :

La couverture de la zone saharienne est constituée, dans sa quasi-totalité, de matériaux quaternaires. Elle comprend principalement des roches, des éboulis, des sables, des limons et des argiles (Ben Dhia, 1998).

Les sols sahariens se prêtent difficilement aux classifications internationales, rendant délicate la caractérisation précise du comportement des sols de plate-forme à partir de systèmes descriptifs standardisés. À l'exception des sables de dunes, qui présentent un indice portant relativement faible (compris entre 7 et 15), la plupart des sols sahariens se distinguent par une portance satisfaisante, avec un indice CBR généralement voisin de 40. L'application de la méthode de dimensionnement des chaussées basée sur les abaques CBR conduirait ainsi à des structures minimales forfaitaires.

En dehors des zones submersibles, les teneurs en eau sous chaussée sont de l'ordre de 5 %, ce qui limite le développement des déformations plastiques.

4.3 Le trafic :

Le trafic des routes sahariennes est relativement faible comparé à celui des routes du nord. Toutefois, il se caractérise par une proportion élevée de poids lourds, généralement supérieure à 40 %. Pour les grands itinéraires, une durée de service comprise entre 15 et 20 ans est généralement retenue.

4.4 Mode de construction des routes au Sahara selon la technique routière Saharienne (TRS) :

Le principe d'une assise unique est généralement adopté, avec une épaisseur comprise entre 15 et 30 cm. Celle-ci est réalisée, lorsque cela est possible, à partir d'un matériau homogène répondant à des spécifications strictes issues de la TRS. En cas d'indisponibilité suffisante de matériaux performants, les 10 cm inférieurs, jouant le rôle de couche de fondation, sont alors constitués d'un matériau de caractéristiques mécaniques inférieures. La structure de chaussée correspond ainsi au schéma type présenté à la Figure I-5.

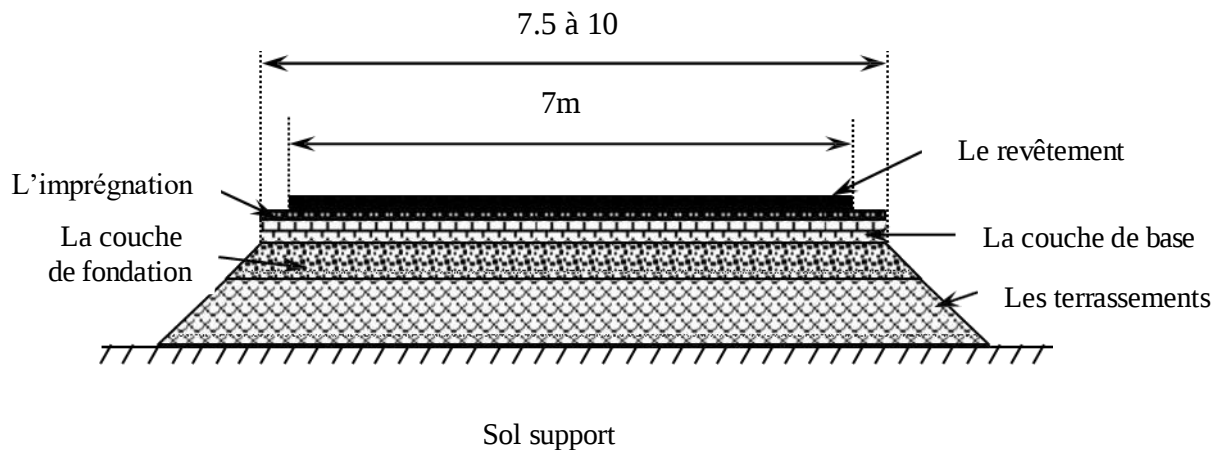


Figure I-6 : Coupe transversale type d'une chaussée saharienne (Morsli, 2007)

4.4.1 Terrassements :

Les routes en zones désertiques sont généralement réalisées en remblais de faible hauteur, une configuration qui facilite le drainage et contribue à une amélioration de la teneur en eau d'équilibre sous chaussée. À l'inverse, les déblais sont à éviter, car ils favorisent l'ensablement des infrastructures routières. Pour la construction des remblais, les matériaux disponibles à proximité du tracé sont le plus souvent utilisés, en excluant les matériaux pulvérulents ainsi que les sables de dunes. Toutefois, lorsque le sable de dunes constitue le seul matériau disponible, il peut être utilisé comme corps de remblai, bien que sa mise en œuvre pose des difficultés spécifiques, notamment sa faible portance, sa tendance à la fluidité et la difficulté d'épandage des couches de chaussée (Morsli et al., 2002 ; Abdelghani, 1980).

Les couches supérieures des terrassements sont généralement compactées à l'état sec afin d'atteindre des densités de l'ordre de 90 % de l'Optimum Proctor Modifié (OPM) (Ameraoui, 2002).

Un choix approprié des matériaux de remblai permet par ailleurs de réduire la structure de chaussée à une simple couche de base d'environ 15 cm (Boularak, 1989).

4.4.2 Couche de fondation :

Cette couche est mise en œuvre sur des terrassements achevés. Elle est exécutée sur toute la largeur de la plate-forme et compactée avec humidification.

4.4.3 Couche de base :

La couche de base est également mise en œuvre sur toute la largeur de la plate-forme et compactée avec humidification. Une fois réalisée, elle présente une largeur comprise entre 7,50 et 10,50 m selon les projets, avec des élargissements localisés dans certaines sections

(passages submersibles, remblais de grande hauteur, etc.) (Domec, 1980). Les matériaux utilisés en couche de base appartiennent soit à la famille I (matériaux à ossature), soit à la famille III (matériaux fins) (Morsli, 2002).

Pour les matériaux fins, il est exigé que la résistance à la compression simple soit au moins égale à 25 bars, sur des éprouvettes confectionnées dans les conditions suivantes :

- Compactage à la teneur en eau optimale Proctor Modifié ;
- Compacité comprise entre 97 % et 98 % de l'OPM ;
- Séchage à une température maximale de 60 °C jusqu'à obtention d'une teneur en eau voisine de zéro (généralement 48 h d'étuvage).

4.4.4 Couche de roulement :

➤ Imprégnation :

Préalablement à la mise en œuvre de la couche de roulement, les matériaux d'encroûtement doivent recevoir une couche d'imprégnation bitumineuse, dont le rôle est triple :

- assurer l'adhérence de la couche de roulement sur un support souvent très fermé en surface ;
- servir, le cas échéant, de couche de roulement provisoire ;
- protéger la couche de base contre les infiltrations d'eau liées aux précipitations.

➤ Revêtement :

Actuellement, le revêtement est réalisé sur une largeur de 7 m, avec des élargissements localisés sur certaines sections. Cette configuration a été adoptée suite aux dégradations prématurées observées sur d'anciennes routes revêtues sur des largeurs plus réduites, notamment au niveau des accotements, malgré un trafic relativement faible.

La couche de roulement est constituée, selon l'intensité du trafic, soit d'un enduit superficiel, soit d'un enrobé à froid, soit d'un enrobé à chaud. Toutefois, l'enrobé à froid est le plus couramment utilisé.

5 UTILISATION DU SABLE DE DUNES DANS LE DOMAINE ROUTIER :

Le Sahara présente certains aspects liés à la nature du sol, au climat et au trafic, ces caractéristiques ont poussés les ingénieurs et les techniciens routiers à innover en mettant à profit ces particularités pour ouvrir très largement l'éventail des matériaux utilisés en corps de

chaussées, tels que les sable de dune qui sont initialement inadéquates pour une utilisation routière selon les normes classiques.

5.1 Utilisation du sable de dunes dans le domaine routier :

L'utilisation des sables en technique routière n'est pas récente. À l'état naturel, les sables de dunes ne présentent pas des caractéristiques mécaniques satisfaisantes, tant pour les structures que pour la réalisation des différentes couches de chaussée, nécessaires pour reprendre les sollicitations liées au trafic. Ils sont difficilement compactables et présentent une très faible portance. Par conséquent, l'utilisation du sable de dunes seul ne peut être envisagée, malgré la facilité qu'il offre pour les opérations de reprofilage, en raison de la faible stabilité de sa surface, susceptible d'augmenter la résistance au roulement et de provoquer des phénomènes d'enlèvement (Ben Dhia, 1998).

Ould Sid et al. (1995), cités par Ben Dhia (1998), ont réalisé des essais de compactage et de cisaillement direct sur des sables de dunes. Les principaux résultats obtenus sont les suivants :

- L'effet de la teneur en eau sur le compactage est peu significatif pour des teneurs comprises entre 0 et 6 % ;
- La cohésion est très faible, de l'ordre de 5 kPa, voire négligeable ;
- L'angle de frottement interne varie entre 30° et 35°.

L'indice portant CBR de ces sables est de l'ordre de 10 %, ce qui a conduit les ingénieurs et les techniciens du domaine routier à écarter leur utilisation à l'état brut en corps de chaussée.

Ainsi, le traitement des sables de dunes s'avère indispensable dans la plupart des applications, afin d'améliorer leurs performances mécaniques et leur conférer des propriétés de stabilité suffisantes pour résister aux sollicitations en service.

De nombreuses études ont été consacrées à la valorisation des sables de dunes, notamment par traitement aux liants hydrocarbonés ou hydrauliques, ou par mélange avec d'autres matériaux granulaires (Ben Dhia, 1998 ; Kettab et al., 2002 ; Nadjari, 2003 ; Kettab, 2007 ; Morsli, 2007 ; Ghrieb et al., 2014 ; Cherrak et al., 2015 ; Akacem, 2017).

Dans cette optique, Ben Dhia (1998) a étudié l'incorporation de sables de dunes, à différents dosages, dans divers matériaux (grave naturelle, tuf calcaire, tuf gypseux et sol argileux). Les résultats ont montré que l'ajout de sable de dunes améliore la portance des mélanges,

augmente la masse volumique jusqu'à une teneur d'environ 30 % et réduit la plasticité, conduisant ainsi à une meilleure propriété des matériaux.

Compte tenu de l'abondance des sables de dunes et des tufs dans le Sahara algérien, plusieurs études ont été consacrées à l'association de ces deux matériaux (Ben Dhia, 1998 ; Cherrak et al., 2015 ; Morsli et al., 2005 ; Morsli, 2007 ; Morsli et al., 2007).

Les différents auteurs convergent vers les conclusions suivantes :

- L'incorporation de sable de dunes améliore significativement la portance des tufs ;
- La masse volumique augmente ou demeure quasi constante lorsque la teneur en sable croît jusqu'à une valeur optimale, puis diminue légèrement tout en restant supérieure à celle du tuf brut ;
- la plasticité diminue, au profit d'une amélioration notable de la propreté, généralement caractérisée par l'essai d'équivalent de sable.

5.2 Utilisation des argiles dans le domaine routier :

L'argile est un matériau naturel largement présent dans les sols, mais son utilisation dans le domaine routier nécessite des précautions en raison de ses propriétés géotechniques particulières. En effet, les sols argileux sont caractérisés par une forte plasticité, une sensibilité à l'eau et une capacité de gonflement et de retrait importante, ce qui peut entraîner des déformations de la chaussée et des fissures. Selon les recommandations du Guide des terrassements routiers (GTR), ces sols doivent être soigneusement étudiés avant toute utilisation en construction routière.

Dans le domaine routier, l'argile est principalement utilisée après amélioration ou stabilisation. La technique la plus courante consiste à traiter les sols argileux avec de la chaux ou du ciment. L'ajout de chaux permet de réduire la plasticité du sol et d'augmenter sa portance grâce à des réactions physico-chimiques comme la floculation, tandis que le traitement au ciment améliore la résistance mécanique et la durabilité. Ces procédés sont largement décrits dans les travaux du LCPC, qui soulignent leur efficacité pour recycler les sols en place dans les projets routiers.

Par ailleurs, les sols argileux peuvent être utilisés dans les remblais routiers ou comme couche de forme, à condition de bien contrôler l'humidité et d'assurer un compactage adéquat.

Toutefois, leur utilisation reste limitée dans les couches supérieures de la chaussée en raison de leur faible résistance sans traitement. Le SETRA recommande ainsi d'adapter les

techniques de mise en œuvre en fonction des caractéristiques géotechniques du sol afin de garantir la durabilité de l'ouvrage.

Enfin, une étude géotechnique approfondie est indispensable pour déterminer les propriétés de l'argile (indice de plasticité, teneur en eau, comportement mécanique) et choisir la méthode de traitement la plus appropriée, conformément aux normes et guides techniques en vigueur.

5.3 Utilisation de sable de dunes–argile dans le domaine routier :

Le mélange sable de dunes–argile constitue un matériau géotechnique très intéressant et largement utilisé en génie civil, en particulier dans les régions arides. Cette importance s'explique par la complémentarité des propriétés de ses deux composants : le sable de dune, caractérisé par une faible cohésion et une bonne perméabilité, et l'argile, connue pour sa plasticité et sa capacité de liaison. Lorsque ces deux matériaux sont combinés dans des proportions appropriées, ils permettent d'obtenir un sol amélioré présentant une meilleure stabilité, une résistance accrue et une réduction des déformations. (Karl Terzaghi, 1943 ; Braja M. Das).

Dans le domaine des techniques routières, ce mélange est couramment utilisé pour la réalisation des couches de forme et des couches de fondation. Il permet d'augmenter la portance du sol (CBR), de mieux répartir les charges et de limiter les tassements sous trafic. Cette solution est particulièrement adaptée aux zones désertiques comme le Sahara, où les matériaux granulaires de bonne qualité sont rares et coûteux à transporter. Les guides techniques tels que ceux du LCPC et du SETRA recommandent d'ailleurs l'utilisation de matériaux locaux améliorés pour optimiser les coûts et les performances. Ministère de l'Équipement du Maroc (2001)

Par ailleurs, le mélange sable–argile est largement utilisé dans la construction en terre, notamment pour la fabrication de briques en adobe ou de blocs de terre comprimée. Dans ce cas, l'argile agit comme un liant naturel assurant la cohésion des éléments, tandis que le sable limite les phénomènes de retrait et de fissuration lors du séchage. Ce type de matériau présente des avantages écologiques importants, notamment une faible consommation d'énergie et une bonne isolation thermique, comme le souligne le CRATerre. CRATerre. Traité de construction en terre. Éditions Parenthèses, 2012

En géotechnique, ce mélange est également utilisé pour l'amélioration des sols. L'ajout de sable dans un sol argileux permet de réduire sa plasticité et sa sensibilité à l'eau, tandis que l'ajout d'argile dans un sable améliore sa cohésion. Cette technique permet d'obtenir un

matériau plus stable et plus apte à supporter des charges, ce qui est essentiel pour les fondations superficielles et les plateformes industrielles. Ces principes sont bien décrits dans les travaux fondamentaux de Karl Terzaghi et de Braja M. Das.

En outre, ce mélange joue un rôle important dans la lutte contre l'érosion éolienne et la stabilisation des dunes. L'argile augmente la cohésion du sable et limite ainsi sa mobilité sous l'effet du vent, ce qui permet de protéger les routes, les habitations et les infrastructures contre l'ensablement. Cette application est particulièrement importante dans les zones sahariennes où les déplacements de sable représentent un risque majeur.

Enfin, le mélange sable de dunes–argile est utilisé dans les travaux hydrauliques, notamment pour la réalisation de remblais, de digues et de barrages en terre. Dans ces ouvrages, l'argile assure l'étanchéité en limitant les infiltrations d'eau, tandis que le sable contribue à la stabilité mécanique de la structure. Ce compromis entre résistance et imperméabilité en fait un matériau adapté pour ce type d'applications.

Ainsi, le mélange sable de dunes–argile représente une solution technique polyvalente, économique et durable. Son utilisation permet non seulement d'améliorer les propriétés des sols naturels, mais aussi de valoriser les ressources locales, ce qui est essentiel dans les régions désertiques.

6 -CONCLUSION

La rareté des ressources en granulats dans les régions méridionales a conduit, depuis plusieurs années, les ingénieurs à étudier les possibilités de valorisation des matériaux locaux, notamment les sables de dunes et les argiles, qui constituent les ressources les plus abondantes dans le Sahara algérien.

Le contexte saharien, en particulier les conditions climatiques, élargit considérablement le champ des matériaux susceptibles d'être utilisés en technique routière.

Lorsque les caractéristiques des sables de dunes ne satisfont pas aux exigences retenues, un traitement par liant hydraulique ou un mélange avec d'autres granulats est recommandé. Parmi les techniques d'amélioration les plus économiques, le mélange avec les argiles constitue une solution pertinente.

Des études expérimentales complémentaires, menées en laboratoire, sont toutefois nécessaires afin de mieux caractériser le comportement de ces matériaux à l'état brut et en mélange. La

réalisation de ces essais dans des laboratoires disposant d'équipements appropriés permettrait d'optimiser les conditions expérimentales et, par conséquent, de favoriser une utilisation rationnelle de ces ressources, contribuant ainsi à une économie significative en granulats nobles.



Chapitre II

**Identifications géotechniques
des matériaux des bases**



1. INTRODUCTION :

Après avoir présenté une synthèse bibliographique générale dans la partie précédente sur l'utilisation des sables de dune et l'argile en technique routière, ce chapitre vise à exposer l'étude réalisée afin d'identifier les deux matériaux, à travers des essais géotechniques conventionnels effectués en laboratoire.

2. PRESENTATION DU MATERIAU ETUDIE :

2.1. Sable de dune :

Le sable de dune est un matériau naturel provenant de l'altération des roches et transporté par le vent. Il est largement présent dans les régions désertiques comme le Sahara.



Figure II-1 : sable de dune

2.2. Argile :

L'argile est un sol très fin constitué de petites particules (moins de $2\text{ }\mu\text{m}$), qui devient plastique avec l'eau et dur quand il sèche.



Figure II-2 : Argile

3. PRESENTATION DE SITE :

3.1. Localisation des matériaux :

3.1.1. 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.

3.1.2. Argile :

Le prélèvement de l'argile a été réalisé en collaboration avec un géologue du Laboratoire des Travaux Publics du Sud (LTPS). Les 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''

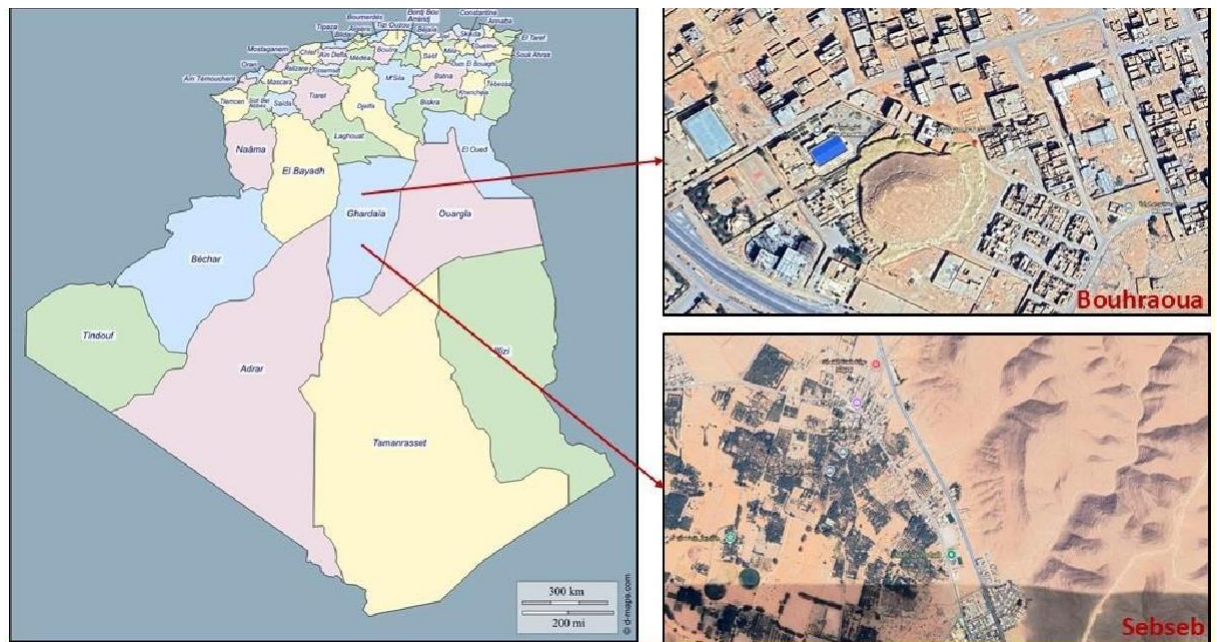


Figure II. 3: Site d'extraction de l'argile et de sable de dune

3.2. Présentation de la wilaya de Ghardaïa :

La wilaya de Ghardaïa est située au cœur du désert algérien. Elle s'étend sur une vaste superficie et est connue pour ses paysages sahariens uniques. La wilaya comprend plusieurs villes importantes, comme Ghardaïa, et elle est caractérisée par un climat chaud et aride.

3.3. Climatologie de Ghardaïa :

Le climat de Ghardaïa est de type saharien. Il se caractérise par des étés très chauds et des hivers généralement doux, surtout pendant la journée.

3.4. Caractéristiques générales du climat :

- Étés aux chaleurs torrides avec des températures très élevées
- Hivers doux le jour et frais la nuit
- Faibles précipitations tout au long de l'année
- Climat sec et aride

Amplitude thermique

Le climat de Ghardaïa est marqué par une grande différence entre les températures du jour et de la nuit :

- En été : journées très chaudes et nuits relativement fraîches
- En hiver : journées agréables mais nuits froides

- **Période chaude :**

La période de forte chaleur commence généralement au mois de mai et se prolonge jusqu'au mois de septembre. Durant cette période, les températures peuvent atteindre des niveaux très élevés.

Pour mieux comprendre la climatologie de Ghardaïa, on peut se baser sur les données de l'année 2023, qui permettent d'analyser :

- L'évolution des températures mensuelles
- Les précipitations enregistrées
- L'humidité de l'air
- La vitesse et la fréquence des vents

Ces éléments donnent une vision globale du climat saharien caractéristique de la région.

Tableau II-1 : Quelques valeurs des éléments climatologiques (Station métrologique de Ghardaïa 2023).

Mois	<u>Inso</u> (heures)	<u>Evap</u> (mm)	<u>°Tmin</u> (°C)	<u>°Tmax</u> (°C)	<u>Tmoy</u> (°C)	<u>HR</u> (%)	<u>Moy vnt</u> (m/s)	<u>pmm</u> (mm)
jan	285	92	7	16	12	57	4.1	0
fév	250	80	9	18	13	51	4.5	2
mars	300	130	14	27	21	39	4.7	0
avril	310	150	17	30	24	35	4.7	2
mai	330	170	20	33	26	40	4.7	3
juin	360	200	26	39	32	34	4.6	0
juill	375	220	31	45	38	19	3.9	1
aout	360	210	28	40	34	29	3.7	1
sept	300	180	26	36	31	36	3.8	0
oct	250	120	20	31	25	38	3.5	0
nov	230	95	15	25	20	43	3.9	1
déc	220	90	11	19	15	52	3.8	1

-Inso (heures): Sunshine duration (hours of sunlight per day), -Evap (mm): Evaporation (millimetres of water lost, often from a pan), -°Tmin (°C): Minimum temperature (°C)-°Tmax (°C): Maximum temperature (°C) -Tmoy (°C): Mean/average temperature (°C), -HR (%):

Relative humidity (%), -Moy vnt (m/s): Average wind speed (meters per second), -Pmm (mm): Precipitation (millimetres of rainfall)

4. CARACTERISTIQUE GEOTECHNIQUE DES MATERIAUX DE BASE :

Les essais de caractérisation visent à déterminer plusieurs paramètres et indices permettant de classer les matériaux et d'évaluer leur conformité aux spécifications et aux normes exigées pour leur utilisation en corps de chaussée.

Le programme expérimental consiste en la réalisation d'une série d'essais effectués conformément aux procédures définies par les normes françaises, avec toutefois quelques adaptations. Il comprend les analyses et essais suivants :

- Analyses chimiques
- Analyses granulométriques
- Détermination des limites d'Atterberg
- Mesure de l'équivalent de sable
- Essais au bleu de méthylène
- Essais Proctor Modifié
- Essais CBR
- Détermination de la résistance à la compression

4.1. Analyses chimiques :

4.1.1. Sable de dune :

Les résultats de l'analyse chimique de sable de dune sont présentés dans le tableau II-2. D'après les résultats présentés dans le tableau ci-dessus, l'analyse chimique des échantillons de sable de dune prélevés dans la région de Sebseb révèle un taux élevé de résidu insoluble, atteignant 88,91 %. En revanche, les teneurs en sulfates et en carbonate de calcium demeurent relativement importantes, avec des valeurs respectives de 3,09 % et 3 %. Par ailleurs, la teneur en chlorures est très faible, de l'ordre de 0,023 %. La forte proportion de silice, supérieure à 80 %, confirme le caractère essentiellement siliceux du sable de dune.

Tableau II-2 : Les résultats de l'analyse chimique de sable de dune. (AZZOUZ 2017)

Caractéristiques	Symboles	Unité	Sable de dune de Sebseb
Résidu insoluble	SiO_2 +Silice	%	88.91
Sulfates	SO_3	%	3.09
Chlorures	Cl-	%	0.023
Carbonate de Calcium	CaO_3	%	03
Matières organiques	MO	%	----

4.1.2 Argile

Les résultats de l'analyse chimique de l'argile étudiée sont présentés dans le Tableau II.3 suivant. L'analyse de ces résultats met en évidence la prédominance de la silice (SiO_2), qui représente l'élément principal de la composition chimique de l'échantillon. Par ailleurs, la teneur relativement élevée en gypse permet de qualifier cette argile de matériau à caractère gypseux. Cette composition minéralogique particulière est susceptible d'influencer plusieurs propriétés physico-mécaniques du matériau, notamment sa cohésion, sa plasticité ainsi que son comportement en présence d'eau.

Tableau II-3 : Analyse chimique de l'argile étudiée. (AZZOUZ 2017)

	Symboles	Unité	Argile de Bouhraoua
Résidu insoluble	SiO_2 +Silice	%	30.5
Sulfates	So_4^{2-}	%	5.28
Chlorates	Cl-	%	----
Carbonate de Calcium	$CaCO_3$	%	09
Matières organiques	MO	%	----

4.2 Analyse granulométrique :

4.2.1 Analyse granulométrique par tamisage :

Cet essai est réalisé conformément à la norme NF P 94-056. Il a pour objectif de déterminer les proportions des différents constituants du sol, à savoir : les graviers, les sables, les limons et les argiles.

Le principe de l'analyse consiste à séparer et classer les particules à l'aide d'une série de tamis, en fonction de leur diamètre.



Figure II-4 : Analyse granulométrique par tamisage

4.2.2 Analyse granulométrique par sédiment métrie :

La teneur en éléments fins (particules de diamètre inférieur à $80\text{ }\mu\text{m}$) n'a pas toujours un effet négatif sur les propriétés du matériau, notamment lorsqu'il s'agit de fines calcaires.

L'analyse granulométrique de cette fraction est réalisée par sédimentation, conformément à la norme NF P 94-057. Cette méthode est utilisée lorsque les particules sont trop fines pour être analysées par tamisage, et vient donc compléter l'analyse granulométrique par tamisage.

Le principe de cet essai repose sur la Loi de Stokes, qui décrit la vitesse de chute d'une particule sphérique dans un fluide visqueux, en fonction de son diamètre. Cette vitesse dépend également de la densité de la particule, de celle du fluide, ainsi que de sa viscosité. La relation est donnée par :

$$V = \frac{2gr^2(D_1 - D_2)}{9\mu}$$

V : Vitesse de chute (cm sec⁻¹)

g : Accélération due à la gravité (cm sec⁻²)

r : Rayon équivalent de la particule (cm)

D₁: Densité de la particule (g cm⁻³)

D₂: Densité du fluide (g cm⁻³)

μ : Viscosité du fluide (Pa. s)



Figure II-5: Essai de granulométrie par sédimentométrie

La figure II-2 illustre la position des courbes granulométriques des deux matériaux étudiés par rapport aux fuseaux discriminants de la TRS (Fenzy, 1966) et du Catalogue de Dimensionnement des Chaussées Neuves (CTTP, 2001). Les principaux paramètres issus de cette analyse, ainsi que les limites recommandées par les spécifications de la TRS, du CTTP et du Guide des Terrassements Routiers GTR (GTR, 1992), sont récapitulés dans le tableau II-3.

D'après ces résultats, il ressort que :

- Les courbes granulométriques des deux matériaux se situent au-dessus du fuseau saharien, appelé fuseau de Beni-Abbès. Ces matériaux appartiennent ainsi à la famille des matériaux fins (famille III). Les deux courbes se situent en dehors du fuseau des tufs à squelette de classe 1 (Tuf 1) et des tufs fins de classe 2 (Tuf 2).

- Le sol 1 est classé comme un sol **limono-argileux**, présente une granulométrie discontinue, caractérisée par une proportion de fines ($< 80 \mu\text{m}$) d'environ 77 %. Cette dernière valeur dépasse les seuils recommandés par les spécifications mentionnées dans le tableau II-4 (TRS, CTPP et GTR).
- Le sable de dune possède une courbe granulométrique uniforme et très resserrée ($1 < \text{Cu} < 2$), avec un taux de fines ($< 80 \mu\text{m}$) inférieur à 4 %.

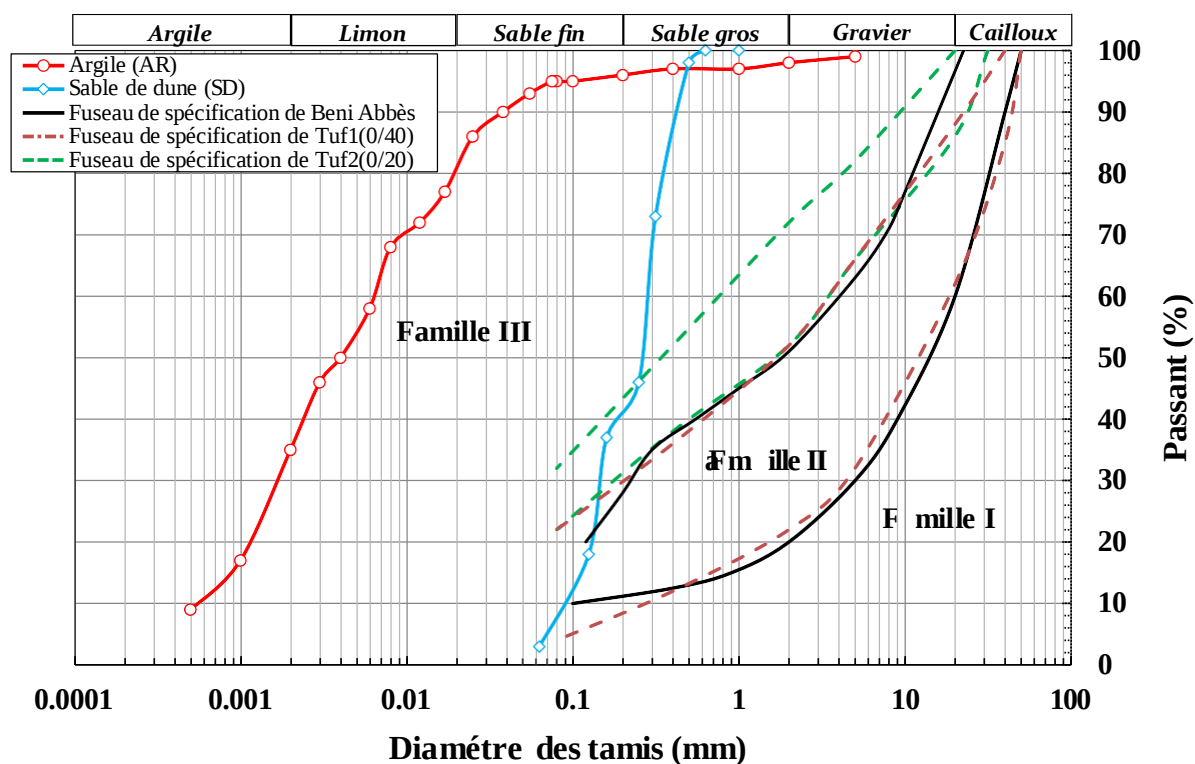


Figure II-6 : Courbes granulométriques de sable de dune et d'Argile par rapport aux fuseaux : saharien (Fenzy, 1966), de tuf 1 (0/40) et de tuf 2 (0/20) (CTTP, 2001).

Tableau II-4 : Résultats récapitulatif de l'analyse granulométrique.

	Matériaux		Spécifications		
	Sable de dune	Argile	TRS*	CTTP*	GTR*
$D_{\max}$ (mm)	0.4	10	-	20-40	<50
Argile (%)	-	35			
Limon (%)	-	45			
Sable fin (%)	45	15			
Sable gros (%)	55	3			
Gravier (%)	-	2			

Cailloux (%)	-	-			
% < 0.425 mm	100	99		36-52	
% < 80µm	3.35	77	< 30	22-32	≤ 35
D₁₀	0.12	0.0005			
D₃₀	0.18	0.0015			
D₆₀	0.23	0.008			
C_u	1.9	16			
C_c	1.2	0.56			

C_u : coefficient d'uniformité dit de Hazzen. $C_u = D_{60}/D_{10}$

C_c : coefficient de courbure. $C_c = (D_{30})^2/D_{60} \cdot D_{10}$

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

4.3 Qualité des fines :

Les fines argileuses constituent généralement les éléments les plus problématiques pour les ingénieurs. Leur caractérisation peut être réalisée à l'aide des essais de laboratoire suivants :

- Les limites d'Atterberg (NF P 94-051)
- L'équivalent de sable (NF P 18-598)
- Le bleu de méthylène (NF P 94-068)

4.4. Les limites d'Atterberg:

L'essai des limites d'Atterberg a été réalisé conformément à la norme NF P 94-051 sur la fraction de sol inférieure à 0,4 mm. La limite de liquidité a été déterminée à l'aide de la coupelle rugueuse. En revanche, la limite de plasticité n'a pas pu être obtenue pour sable du dune, les boudins se fragmentant avant d'atteindre le diamètre normalisé de 3 mm, ce qui traduit une faible plasticité du matériau.

Le tableau II-5 regroupe les résultats des essais des limites d'Atterberg. D'après ces résultats et selon la classification des sols basée sur l'indice de plasticité (SETRA-LCPC, 1992) (tableau II-6), l'argile est classée parmi les matériaux argileux.



Figure II-7 : Détermination de la limite de liquidité



Figure II-8: Détermination de la limite de plasticité

Tableau II-5- : Résultat des limites des Atterberg

Matériaux	$w_l(\%)$	$w_p(\%)$	$I_p(\%)$
Sable de dune	18.2	/	/
Argile	58.77	25.77	33.00

Tableau II-6 : Classification des sols en fonction de l'indice de plasticité (SETRA-LCPC 1992).

Indice de plasticité	Caractéristique
$IP \leq 12$	Faiblement argileux
$12 < IP \leq 25$	Moyennement argileux
$25 < IP \leq 40$	Argileux
$IP > 40$	Très argileux

Le positionnement de l'argile sur le diagramme de Casagrande (figure II-3) montre que ce matériau se situe au-dessus de la ligne A, correspondant à la zone des argiles. Il est ainsi classé comme une argile à très forte plasticité.

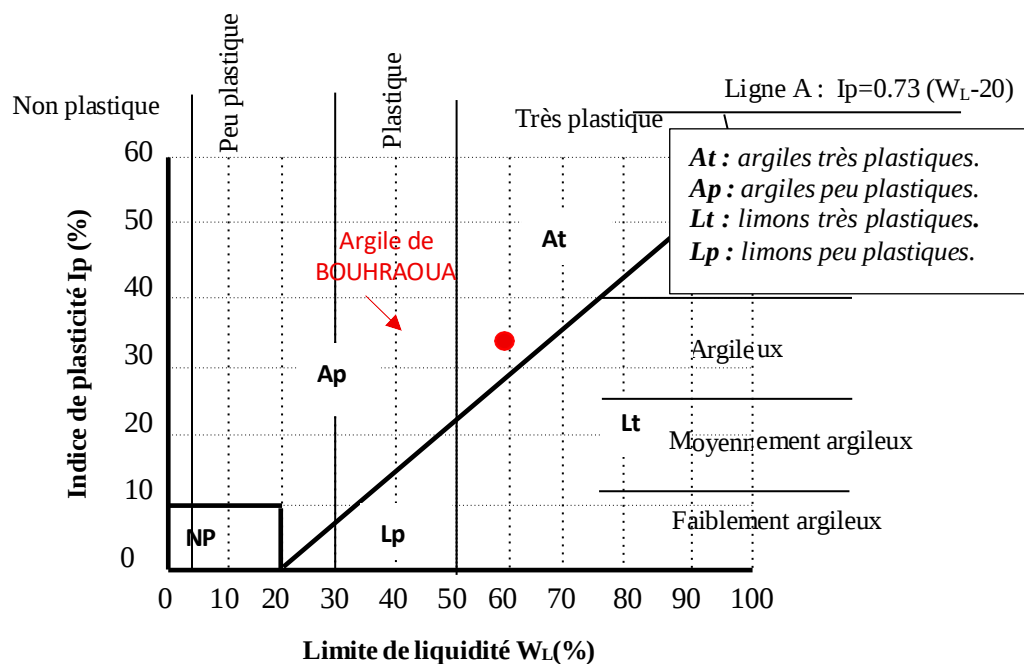


Figure II-9 : Localisation de l'argile sur le diagramme de Casagrande.

4.5 Essai d'équivalent de sable :

L'essai d'équivalent de sable a été réalisé conformément à la norme NF P 18-598. Il consiste à séparer, dans une éprouvette et à l'aide d'une solution lavante, les éléments grossiers qui sédimentent des éléments fins qui demeurent en suspension. L'essai a été effectué sur une prise d'essai de 120 g de sol et s'applique principalement aux sols faiblement plastiques pour lesquels l'indice de plasticité est inférieur à 7 ($IP < 7$).



Figure II-10 : Essai d'équivalent de sable

Les valeurs obtenues de l'équivalent de sable sont présentées dans le tableau II-7. La faible valeur de l'équivalent de sable (ES) obtenue pour l'argile met en évidence le caractère polluant de la fraction fine qu'il contient. Toutefois, cette interprétation doit être nuancée, car la faiblesse de la valeur de ES peut également être due à la présence de fines gypseuses et calcaires. Il est donc nécessaire de compléter cette analyse par un essai au bleu de méthylène afin de mieux caractériser la nature et la qualité des fines.

En revanche, la valeur de l'ES du sable de dune indique qu'il s'agit d'un matériau propre.

Tableau II-7 : Valeurs de l'équivalent de sable ES.

Matériaux	Es (%)
Argile	3
Sable de dune	75

4.6. Essai au bleu de méthylène :

L'essai est réalisé conformément à la norme NFP 94-068. Son principe repose sur le contrôle de l'absorption du bleu de méthylène introduit dans un bain aqueux contenant les fines de l'échantillon, en observant une goutte de suspension déposée sur un papier filtre.

La tache obtenue est constituée d'un dépôt central du matériau, de couleur bleu foncé, entouré d'une zone humide incolore. La saturation des fines en bleu de méthylène se manifeste par l'apparition d'une auréole bleu clair persistante autour du dépôt central (voir photo 8).

La valeur de bleu de méthylène (VB) est définie comme la quantité de bleu de méthylène, exprimée en grammes, absorbée par 100 g de fines.

$$V_b = \frac{\text{Quantité du bleu absorbé (cm}^2\text{)}}{\text{Poids sec de la prise}}$$

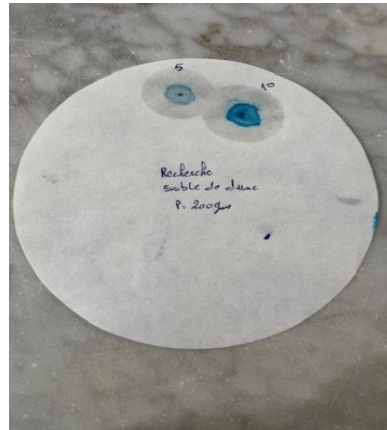


Figure II-11 : bleu de méthylène (VB)

Le tableau II-8 présente les valeurs au bleu de méthylènes obtenus pour nos échantillons. La faible valeur du bleu de méthylène (VB) obtenue pour l'argile indique que le sol contient une faible quantité d'argiles actives.

Tableau II-8 : Valeur au bleu de méthylène VB.

	Argile	Sable de dune
Valeur au bleu de méthylène VB	0.8	0.05

Les résultats des essais relatifs à la qualité des fines sont présentés dans le [tableau II.8](#). D'après ces résultats, la limite de liquidité ainsi que l'indice de plasticité de l'argile sont nettement supérieures aux seuils recommandés par les spécifications en vigueur. En revanche, les valeurs du bleu de méthylène obtenues pour nos échantillons demeurent inférieures au seuil préconisé par le GTR.

Tableau II-9 : Qualités des fines des matériaux étudiés.

	Matériaux		Spécifications		
	Argile	Sable de dune	TRS*	CTTP*	GTR*
w_l(%)	58.77	18.2	-	< 40	-

$w_p(\%)$	25.77	NM	-	-	-
$IP(\%)$	33	NM	< 13	< 15	≤ 12
$ES(\%)$	-	75	-	-	-
VB	0.8	0.05			< 1.5

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

Selon la classification USCS (Unified Soil Classification System) , les matériaux étudiés sont classés comme suit :

- L'argile : présente une faible activité argileuse, présence importante de limon inactif ou argiles peu gonflantes et sol non fortement actif. Donc la classification est « **CH** » (argile inorganique de haute plasticité).
- Le sable de dune est classé parmi les sables propres mal gradués, désignés par le symbole « Sm (SP) ».

5. ESSAI DE COMPACTAGE ET DE PORTANCE :

5.1. Essai Proctor Modifié :

L'essai Proctor modifié est réalisé afin de déterminer les caractéristiques optimales de compactage d'un sol, notamment la teneur en eau optimale et la densité sèche maximale. Conformément à la norme NF P 94-093, cet essai consiste à compacter un échantillon de sol dans un moule normalisé, en plusieurs couches, sous l'action d'une énergie de compactage élevée. Pour différentes teneurs en eau, on mesure la densité sèche obtenue, ce qui permet de tracer la courbe Proctor. Le sommet de cette courbe correspond à la densité sèche maximale, associée à la teneur en eau optimale. Ces paramètres sont essentiels pour la mise en œuvre des travaux de terrassement, car ils permettent d'assurer une bonne portance et une stabilité adéquate du sol compacté.



Figure II-12 : Essai de Proctor modifié

Les résultats de cet essai sont présentés dans la figure II-4, tandis que les caractéristiques optimales déduites de la courbe correspondante sont regroupées dans le tableau II-10.

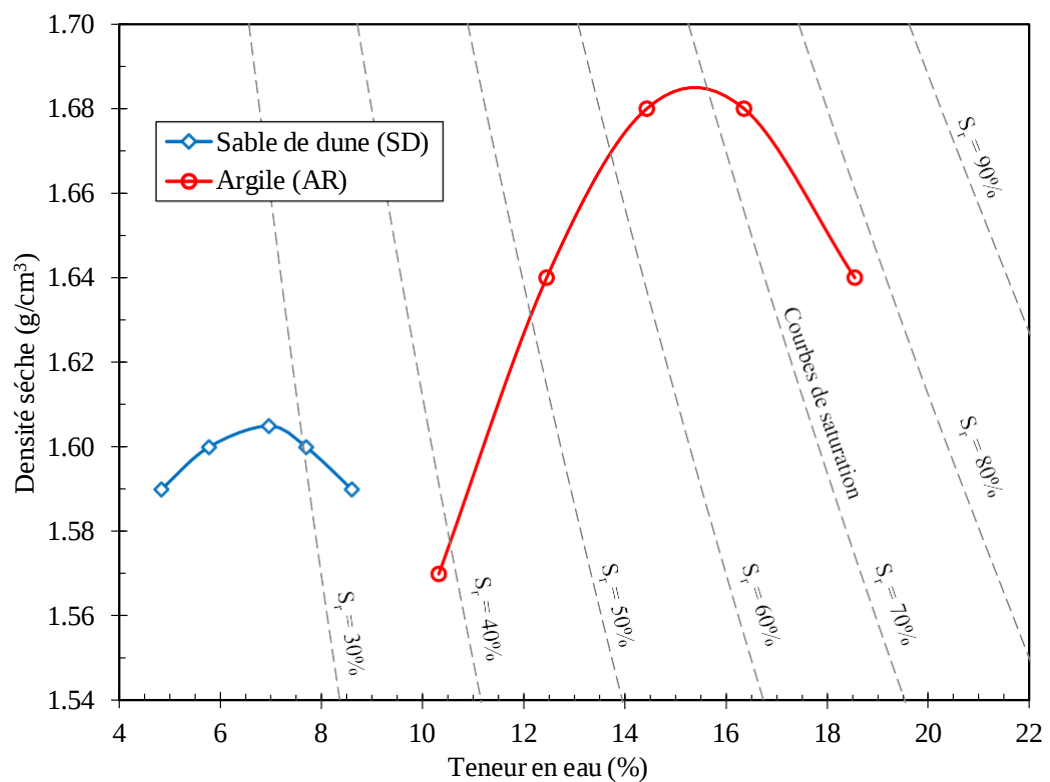


Figure II-13 : Courbes Proctor modifié de sable de dune et de l'argile.

Tableau II-10 : Caractéristiques optimales de Proctor modifié.

	<i>Argile</i>	<i>Sable de dune</i>	<i>TRS*</i>
Poids volumique sec maximal γ_{dmax} (g/cm ³)	1.68	1.61	< 1.7
Teneur en eau optimale $w_{opt}(\%)$	15.3	7	-

* Seuil poids volumique sèche préconisé par le TRS (Fenzy, 1966).

Tableau II-11 : Caractéristiques de compactage pour quelques matériaux routiers (Gandil, 1988)

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

D'après ces résultats, on observe que la courbe Proctor de l'argile présente une pente importante, ce qui traduit une forte sensibilité de la densité sèche de l'échantillon à la variation de la teneur en eau jusqu'à l'optimum Proctor. Cela met en évidence l'influence marquée de l'eau sur les fines présentes. Par ailleurs, la teneur en eau optimale est relativement élevée par rapport à celles des matériaux routiers usuels présentés dans le tableau II-11.

En revanche, la courbe Proctor du sable de dune est relativement aplatie, ce qui indique que la densité sèche est peu sensible aux variations de la teneur en eau jusqu'à l'optimum Proctor. Cela traduit une faible sensibilité des fines à l'eau. De plus, la densité sèche maximale de deux matériaux sont inférieures à la limite minimale exigée par la TRS. Ainsi, d'après le tableau II-11, les deux matériaux apparaissent comme des matériaux légers par rapport aux matériaux routiers conventionnels.

5.2. Essai CBR :

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

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

L'essai consiste à poinçonner, dans le moule CBR, des éprouvettes confectionnées à une teneur en eau égale à l'optimum Proctor modifié, en appliquant l'énergie de Proctor modifié.

Dans un premier temps, on trace les courbes représentant la pression du piston en fonction de son enfoncement. Ensuite, on détermine l'indice CBR selon la relation suivante : $CBR = \text{Sup} \{P(2,5)/0,68 ; P(5)/1,02\}$.

Le tableau II-12 présente les valeurs de portance obtenues pour nos échantillons.

Tableau II-12 : Valeurs des indices CBR.

	<i>Argile</i>	<i>Sable de dune</i>	<i>TRS*</i>
CBR Immédiat	65	6	> 40
CBR Imbibé (Après 4 h d'immersion)	37	5	-

* Seuil de résistance à la compression simple préconisé par le TRS (Fenzy, 1966).

D'après ces résultats, on observe que l'indice CBR immédiat de l'argile est supérieur au seuil recommandé par la TRS. En revanche, les valeurs obtenues pour le sable de dune sont très faibles.

Par ailleurs, les indices de portance après 4 heures d'immersion sont inférieurs aux valeurs immédiates. En effet, on note une diminution d'environ 43 % pour l'argile et de 15 % pour le sable de dune.

5.3. Essai de compression simple :

Cet essai empirique, introduit pour la première fois pour les matériaux locaux par FENZY (1957), est appliqué à l'ensemble des matériaux sahariens sur la fraction inférieure à 5 mm. Il permet d'évaluer la cohésion du matériau.

Dans notre cas, cet essai a été réalisé sur l'argile, sur une série d'éprouvettes cylindriques de dimensions ($\varnothing = 5$ cm, $H = 10$ cm), confectionnées à la teneur en eau optimale du Proctor modifié et à compacités théoriques égale à 98 %.

Pour le sable de dune, il n'a pas été possible de réaliser cet essai, les échantillons s'étant désagrégés immédiatement après le démoulage. Par conséquent, la résistance à la compression du sable de dune est considérée comme nulle.

Le compactage est effectué conformément à la norme NFP 98-230-2, sur la fraction 0/5, à l'aide d'une presse hydraulique et de moules à double piston. Le matériau est compacté en une seule opération dans le moule.

Les principales étapes de préparation des échantillons sont (photos 1-6) :

1. Après séchage à l'air libre des échantillons, l'argile a été tamisé à 5 mm afin d'éliminer les éléments grossiers ;
2. Une quantité d'eau correspondant à l'optimum Proctor modifié (OPM) a ensuite été ajoutée, puis le mélange a été soigneusement homogénéisé manuellement ;
3. Le matériau a été conservé dans un sac plastique hermétiquement fermé pendant au moins 24 heures afin d'assurer une répartition uniforme de l'humidité ;

Le séchage des éprouvettes démoulées est réalisé à l'étuve à 55 °C pendant 48 heures. Une fois la durée de conservation atteinte, les éprouvettes sont soumises à un effort de compression appliqué parallèlement à l'axe du cylindre, à l'aide d'une presse CBR, à une vitesse constante de 1,27 mm/min jusqu'à la rupture, puis les mesures sont relevées.

Les résultats obtenus pour chaque essai correspondent à la moyenne de trois valeurs.

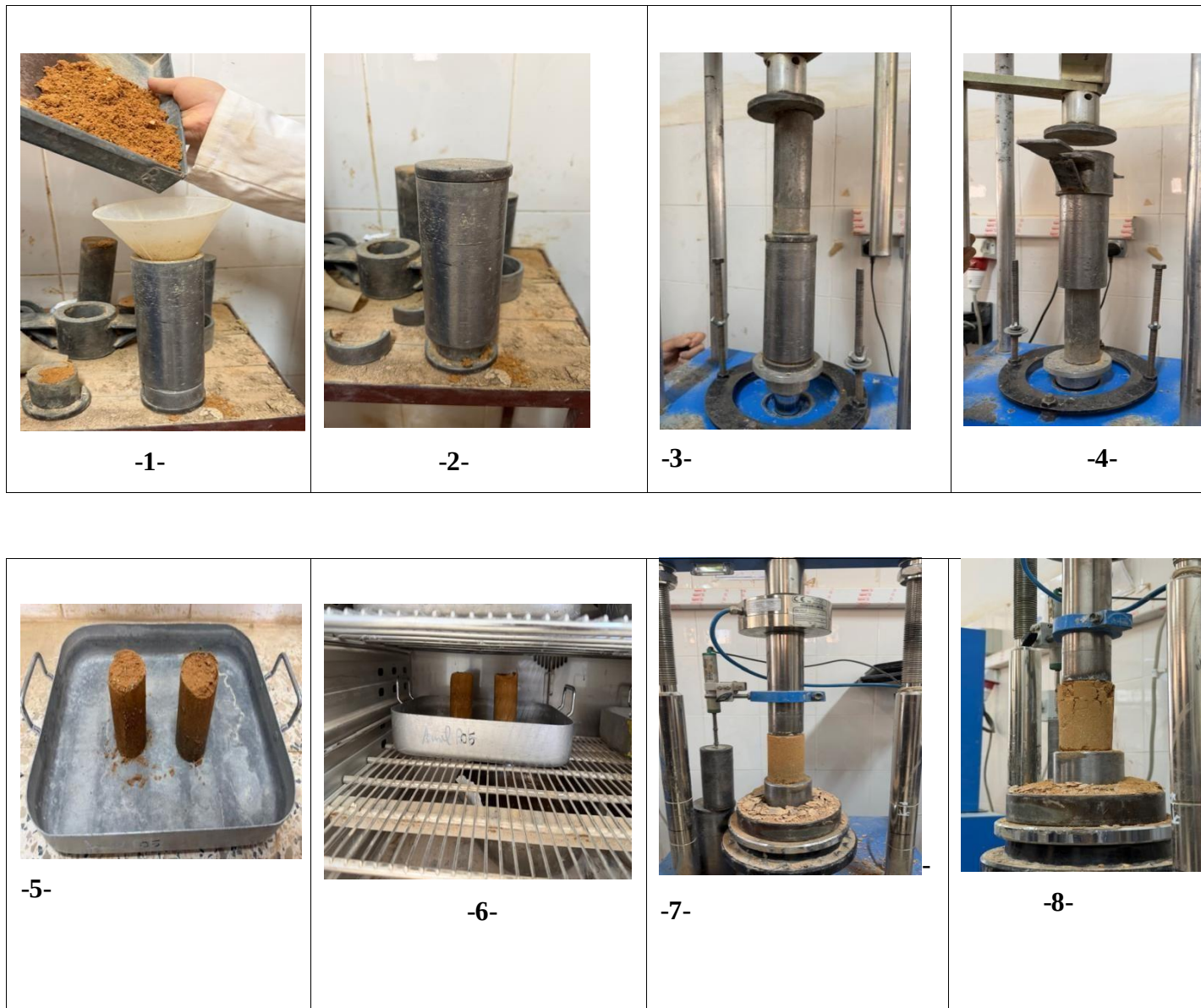


Figure II-14 : presse CBR

La valeur de R_c trouvée est de l'ordre de 0.39 MPa. Nous remarquons que la valeur de R_c est supérieure à celle qui est exigée par le TRS et les spécifications de Alloul et Struillou (Annexe5) pour une couche de fondation en zone IV à faible trafic ($R_c = 0.39 \text{ MPa} > 0.15 \text{ MPa}$).

5.4. Récapitulatif des essais d'identification :

Tableau II-13 : Caractéristiques géotechniques et mécaniques de sable de dune de SEBSEB et Argile de BOUHRAOUA.

	Matériaux		Spécifications		
	Sable de dune	Argile	TRS	CTTP	GTR
Analyse granulométrique					
D_{max} (mm)	0.4	10	-	20-40	< 50
% < 0.425 mm	100	99	-	36-52	-
% < 80 μ m	3.35	77	< 30	22-32	$\leq$ 35
C_u	1.9	16	-	-	-
C_c	1.2	0.56	-	-	-
Les limites d'Atterberg					
w_L (%)			-	< 40	-
w_p (%)	18.2	58.77	-	-	-
I_P (%)	-	25.77	< 13	< 15	$\leq$ 12
	-	33			
Equivalent de sable E_s (%)	75	-	-	-	-
Valeur de bleu VB	0.05	0.8	-	-	< 1.5
Compactage					
γ_{dmax} (t/m ³)	1.61	1.68	> 1.7	-	-
ω_{opt} (%)	7	15.3	-	-	-
Portance					
I CBR Immédiat (%)	6	65	> 40	-	-
I CBR Imbibé (4h) (%)	5	37	-	-	-
Essai de compression simple à 98% γ_{dmax} (MPa)	00	0.39	> 0.15	-	-
Analyse chimique					
SiO₂ (%)	88.9	30.5	-	-	-
SO₃(%)	3.1	5.3	-	$\geq$ 45	-
CaCO₃ (%)	03	09	-	-	-

6. CLASSIFICATION

Nos matériaux sont classés comme suit :

Sable de dune

- Selon la technique routière saharienne **TRS** : famille des matériaux fins (Famille III).
- Selon le guide technique routière **GTR**, Classe « **D1** » (Sables alluvionnaires propres, sables de dune) sachant que la classe **D** englobe les sols insensibles à l'eau.
- Selon la classification **USCS**, sables propres mal gradués « **Sm (SP)** ».

Argile

- Selon la technique routière saharienne **TRS** : famille des matériaux fins (Famille III).
- Selon le guide technique routière **GTR**, classe **A3** (argiles et limons très plastiques).
- Selon la classification **USCS**, notre matériau est classé comme « **CH** » (argile inorganique de haute plasticité).

7. CONCLUSION

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

Les essais réalisés nous ont permis de constater que :

Le sable de dune, a une courbe granulométrique uniforme, ne contenant pas des fines ($< 80\mu\text{m}$) de l'ordre de 3.35%. Ce matériau est propre et ne présente aucune plasticité. Le sable de dune est un matériau léger sa densité sèche égale à $1,67 \text{ t/m}^3$, elle est insensible à la teneur en eau ainsi que sa portance CBR.

L'argile est un matériau qui se compose essentiellement de silice ($\text{SiO}_2 = 30\%$), il a une courbe granulométrique très étalée, La fraction $0/80\mu\text{m}$ est de l'ordre de 77%, ces particules sont des fines gypseuses et calcaires plus ou moins argileuses. La courbe granulométrique montre que ce matériau appartient à la famille III qui englobe les matériaux fins dont la résistance est obtenue principalement par cohésion.

Les essais de qualité des fines montrent que notre matériau est légèrement pollué.

Dans les essais de compactage et de portance nous avons vu que l'argile est un matériau léger, sa densité sèche optimale au Proctor modifié est $\gamma_d = 1,68 \text{ t/m}^3$. Celle-ci est sensible à la teneur en eau ainsi que sa portance.

Nous constatons que certaines caractéristiques géotechniques de nos échantillons à l'état brute (granulométrie, pourcentage de fines, qualité des fines, friabilité et résistance à la compression) sont médiocres par rapport aux matériaux routiers habituels et ne répondent pas aux exigences de la technique routière saharienne TRS (Fenzy, 1966), catalogue de dimensionnement des chaussées neuves (CTTP, 2001) et le guide technique routière GTR (GTR, 1992).

Dans ce qui suit on va essayer de faire la correction de ces caractéristiques par le mélange des deux matériaux avec des pourcentages bien précis qui confèrent des caractéristiques meilleures par rapport aux matériaux de base.



Chapitre III

**Influence de la teneur en eau
et l'énergie de compactage**



1. Introduction :

Dans le chapitre précédent, une caractérisation géotechnique et minéralogique de sable de dune et de l'argile a été réalisée afin de les classer et d'évaluer leur potentiel d'utilisation dans la construction des chaussées. Dans cette perspective, et dans le but d'optimiser la valorisation de ces deux matériaux naturels, les travaux antérieurs menés par Azzouz et al. (2019) portant sur l'effet de l'ajout d'argile sur les caractéristiques physico-mécaniques du sable de dune ont été pris comme référence. Plusieurs formulations de mélanges sable de dune–argile (SD–AR) ont ainsi été étudiées : 100 %SD + 0 %AR, 90 %SD + 10 %AR, 80 %SD + 20 %AR, 70 %SD + 30 %AR, 60 %SD + 40 %AR, 50 %SD + 50 %AR et 0 %SD + 100 %AR. Parmi ces formulations, le mélange composé de 70 % de sable de dune et de 30 % d'argile nommé (70SD30AR) a été retenu comme mélange optimal, en raison de ses performances géotechniques les plus satisfaisantes.

L'objectif du présent chapitre est d'étudier l'influence du déficit en eau sur la portance et les performances mécaniques de ce mélange. Plus précisément, il s'agit d'évaluer l'effet de la réduction de la teneur en eau de compactage sur l'indice CBR immédiat, l'indice CBR après immersion ainsi que sur la résistance à la compression simple. Les teneurs en eau considérées dans cette étude correspondent à l'optimum Proctor modifié diminué de 2 % et de 4 % (OPM – 2 % et OPM – 4 %). Les essais sont réalisés avec l'énergie de compactage normalisée et avec une augmentation de 10%.

Cette recherche s'inscrit dans une démarche visant à promouvoir l'utilisation des matériaux locaux et à élargir la gamme des sols susceptibles d'être utilisés dans la construction routière en milieu saharien. Une telle approche présente plusieurs avantages, notamment la préservation des ressources naturelles, la réduction des coûts de transport ainsi que la limitation de l'empreinte environnementale.

2. Récapitulation des caractéristiques géotechniques de mélange 70SD30AR :

Dans cette première partie, on va présenter les caractéristiques géotechniques de mélange 70SD30AR. Les résultats de l'analyse granulométrique sont présentés sur la (Figure III-1). On observe que la courbe est en dehors du fuseau de Beni Abbès mais reste en grande partie incluse dans les domaines de référence des matériaux sahariens. Cela confirme que le matériau appartient à une famille intermédiaire de sols fins à sablo-fins, classée principalement en Famille III. Sa position par rapport aux fuseaux normatifs montre qu'il est plus proche des

matériaux fins de type Tuf 2, ce qui confirme son potentiel pour les applications routières après optimisation de la teneur en eau et du compactage.

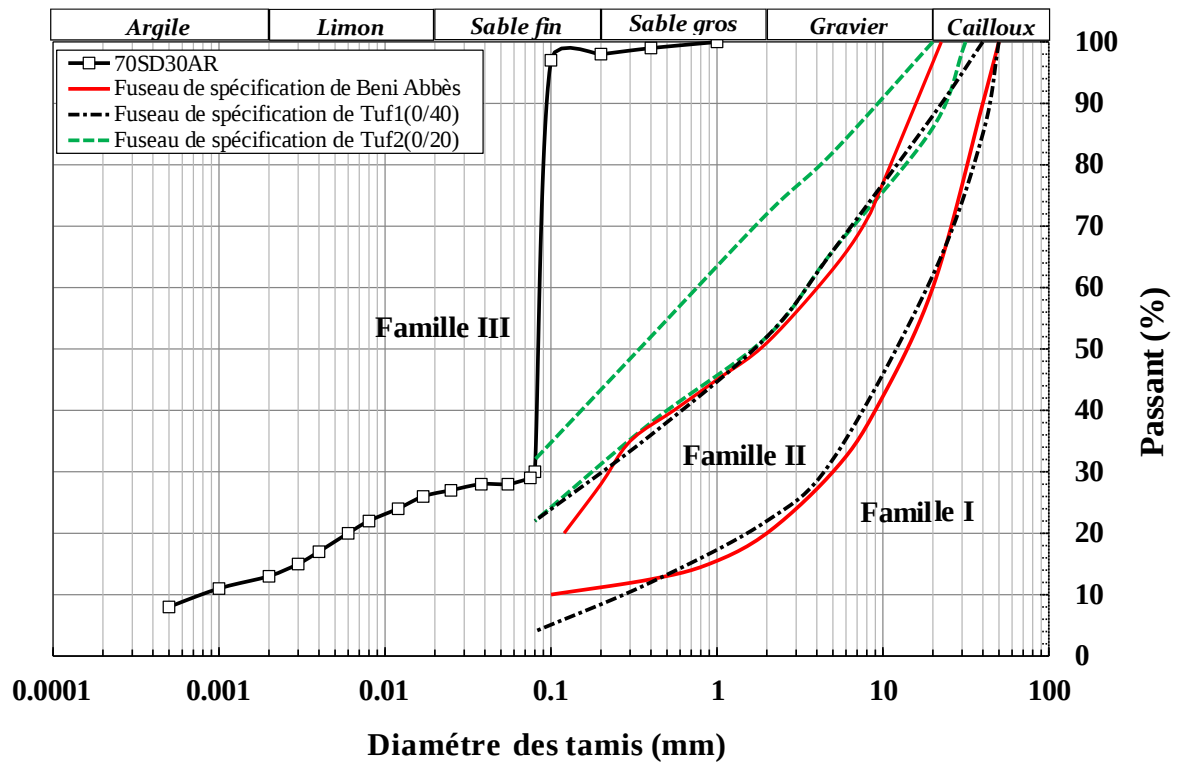


Figure III-1 : Courbes granulométrique de mélange 70SD30AR

La (Figure III-2) présente la localisation de mélange 70SD30AR sur le diagramme de Casagrande. La positionnement de mélange 70SD30AR par rapport au diagramme de Casagrande montre que notre matériau est positionné au-dessus de la ligne A (zone d'argile), donc le matériau est de nature argileuse, se classe comme Argile à faible plasticité, Symbole USCS : « CL »

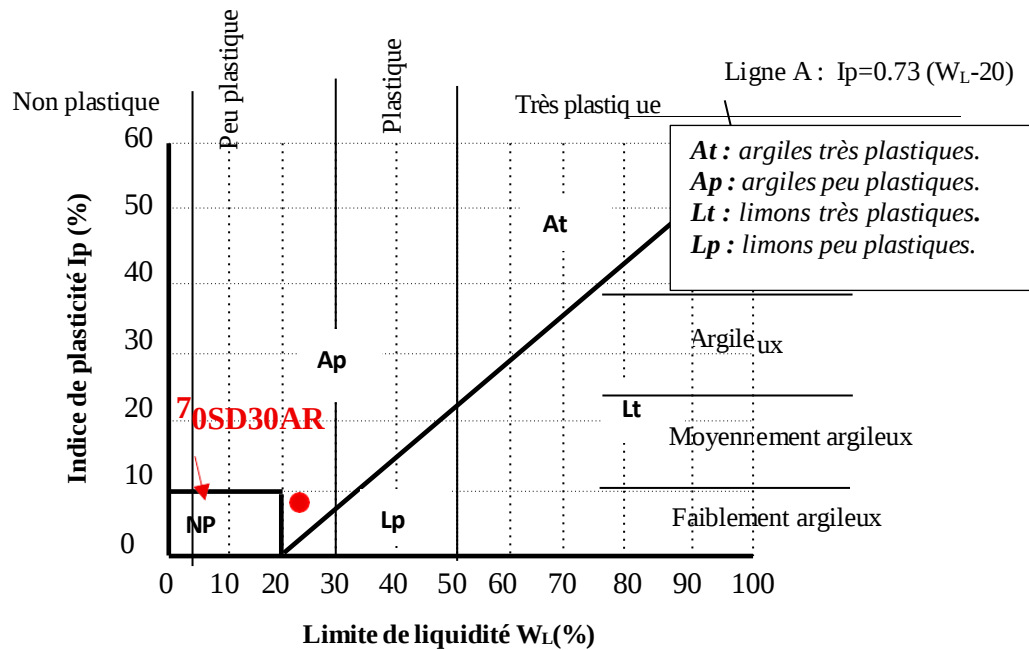


Figure III-2 : Localisation de mélange 70SD30AR sur le diagramme de Casagrande.

Les résultats de l'essai Proctor modifié sont représentés dans la figure III-3, d'après ces résultats on remarque que la courbe représente une pente légèrement grande, ceci explique la sensibilité de la densité sèche de notre échantillon à la teneur en eau lorsque celle-ci varie jusqu'à l'optimum de Proctor. Ce qui explique bien l'influence de l'eau sur les fines existantes. La teneur en eau optimale est de l'ordre de 8.8%, tandis que la densité sèche maximale égale à 2.08 t/m^3 . Ces valeurs montrent que de la densité sèche maximale est nettement supérieure à la limite minimale exigée par la TRS, la teneur en eau optimale est assez élevée par rapport à celle des matériaux routiers habituels.

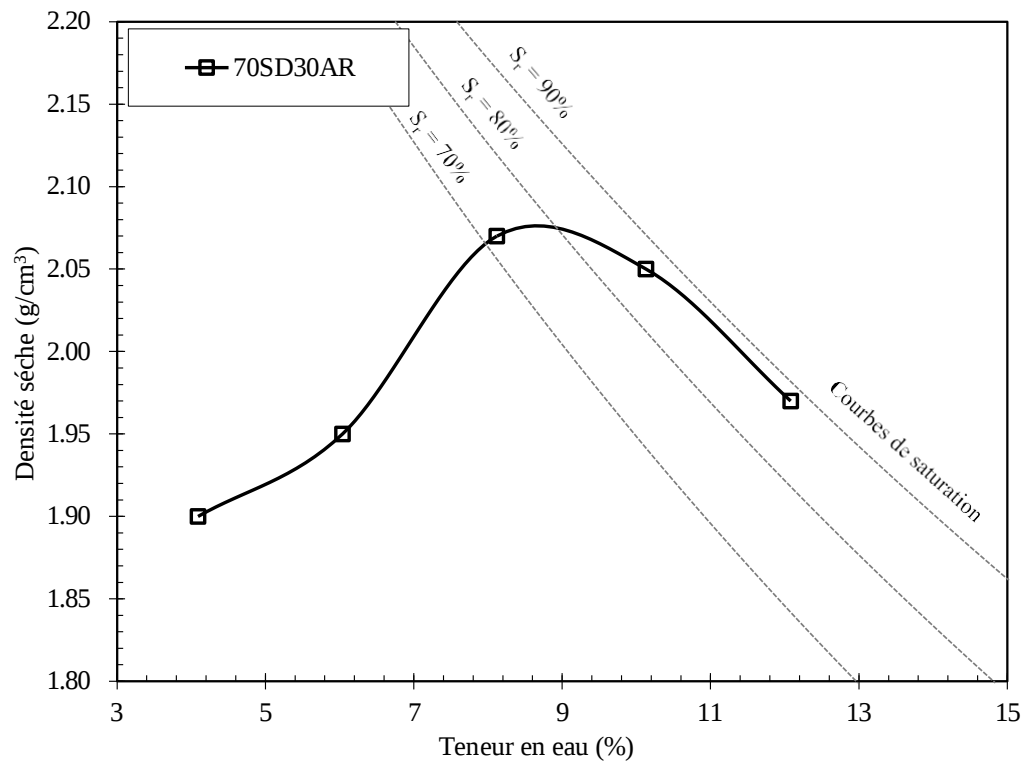


Figure III-3 : Courbes Proctor modifié de mélange 70SD30AR

Les caractéristiques géotechniques des mélanges de mélange 70SD30AR sont représentées dans le Tableau III-1. D'après ces résultats on remarque que l'indice CBR immédiat est supérieur au seuil préconisé par la TRS. Par contre, l'indice CBR après 4 heures d'immersion est plus faible au seuil.

La valeur de la résistance à la compression correspond à 98% de compacité est supérieure à celle qui est exigée par les spécifications de la TRS ($R_c = 0.39 \text{ MPa} > 0.15 \text{ MPa}$).

Tableau III-1 : Caractéristiques géotechniques et mécaniques de mélange 70SD30AR

	Matériaux	Spécifications		
	70SD30AR	TRS	CTTP	GTR
Analyse granulométrique				
$D_{max} \text{ (mm)}$	5	-	20-40	< 50
$\% < 0.425 \text{ mm}$	45	-	36-52	-
$\% < 80 \mu\text{m}$	30	< 30	22-32	≤ 35

C_u	128.6	-	-	-
C_c	101.6	-	-	-
Les limites d'Atterberg				
w_L (%)	23.32	-	< 40	-
w_p (%)	15.48	-	-	-
I_P (%)	7.84	< 13	< 15	≤ 12
Compactage				
γ_{dmax} (t/m ³)	2.08	> 1.7	-	-
ω_{opm} (%)	8.8	-	-	-
Portance				
I CBR Immédiat (%)	75	> 40	-	-
I CBR Imbibé (4h) (%)	17.5	-	-	-
Essai de compression simple à 98% γ_{dmax} (MPa)	0.39	> 0.15	-	-

3. Influence de la teneur en eau optimale et l'énergie de compactage sur les performances mécanique :

1. La portance

C'est un essai dont le but est d'apprécier la portance routière des matériaux. L'essai CBR est réalisé selon la norme NFP 94-078, immédiatement après compactage et après 4 heures d'immersion sur le mélange 70SD30AR (photos 22). Les teneurs en eau de compactage sont : OPM, OPM-2% et OPM-4%. Les Figure III-16 représentent la variation de l'effort de poinçonnement en fonction de l'enfoncement pour les différent. Le Tableau III-2représente les valeurs des indices CBR immédiat et imbibé.

L'énergie de compactage de l'essai Proctor modifié

$$E = \frac{N \times n \times P \times h}{V}$$

E : énergie de compactage (kN\cdot m/m³ ou MJ/m³);

N: nombre de coups par couche ;

n: nombre de couches ;

P: poids du mouton (marteau) ;

h: hauteur de chute ;

V: volume du moule.

Pour l'essai Proctor modifié normalisé :

Masse du marteau = 4,54 kg ;

Hauteur de chute = 0,457 m ;

Nombre de couches = 5 ;

Nombre de coups par couche = 56 ;

Volume du moule Proctor = $944 \text{ cm}^3 = 9,44 \times 10^{-4} \text{ m}^3$.

L'énergie devient alors :

$$E = \frac{56 \times 5 \times (4.54 \times 9.81) \times 0.457}{9.44 \times 10^{-4}} \approx 2.7 \text{ MJ/m}^3$$

Avec une augmentation de 10%, l'énergie devient : 2.97 MJ/m^3 , soit une augmentation des coups par couche à 62.

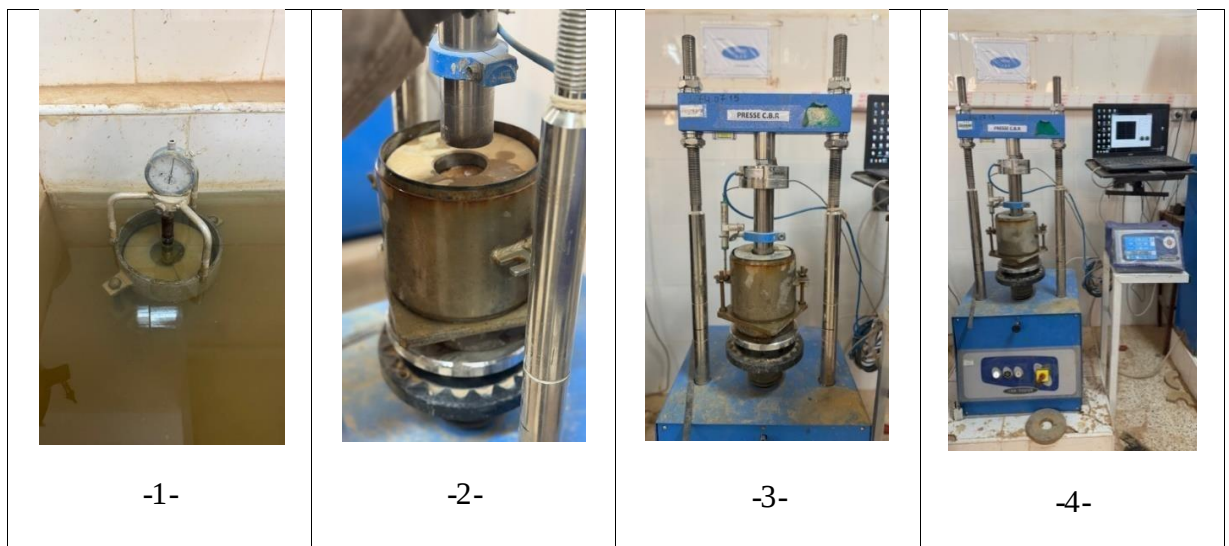


Figure III-4 : Essais CBR

Les Photos III-1 présentent l'effort de poinçonnement en fonction de l'enfoncement pour CBR Immédiat et imbibé de mélange 70SD30AR compacté à différents teneurs en eau et différentes énergies de compactage. Les résultats récapitulatifs des valeurs des indices CBR sont représentés dans le Tableau III-2

L'analyse des résultats du Tableau III-2 met en évidence l'influence de la teneur en eau de compactage ainsi que de l'énergie de compactage sur la portance du mélange 70SD30AR.

À l'optimum Proctor modifié (OPM), le mélange présente un indice CBR immédiat élevé de 75.3, traduisant une bonne portance à l'état non immergé. En revanche, l'indice CBR imbibé chute à 17.6, ce qui révèle une sensibilité importante du matériau à l'eau après immersion. Pour une teneur en eau réduite de 2 % par rapport à l'OPM (OPM-2 %), on observe une légère diminution de l'indice CBR immédiat, qui passe à 69.1 pour un compactage de 55 coups par couche et à 71.8 pour 60 coups par couche. Toutefois, l'indice CBR imbibé augmente sensiblement, atteignant respectivement 19.25 et 23.8. Cette amélioration indique qu'une légère réduction de la teneur en eau permet d'améliorer le comportement du matériau après immersion, particulièrement lorsque l'énergie de compactage est augmentée. En revanche, pour une réduction plus importante de la teneur en eau (OPM-4 %), les indices CBR immédiats diminuent davantage, avec des valeurs de 63.2 et 64.6 respectivement pour 55 et 60 coups par couche. Les indices CBR imbibés deviennent également plus faibles (13.5 et 15.1), ce qui traduit une dégradation des performances portantes due à un déficit hydrique excessif. Par ailleurs, l'augmentation du nombre de coups de compactage de 55 à 60 améliore systématiquement les indices CBR immédiats et imbibés. Cela montre que l'accroissement de l'énergie de compactage favorise une meilleure densification du matériau et améliore sa résistance mécanique.

Globalement, les résultats montrent qu'une légère diminution de la teneur en eau par rapport à l'OPM, combinée à une énergie de compactage plus élevée, permet d'obtenir un comportement porteur plus satisfaisant, notamment après immersion. En revanche, une réduction excessive de la teneur en eau affecte négativement les performances mécaniques du mélange.

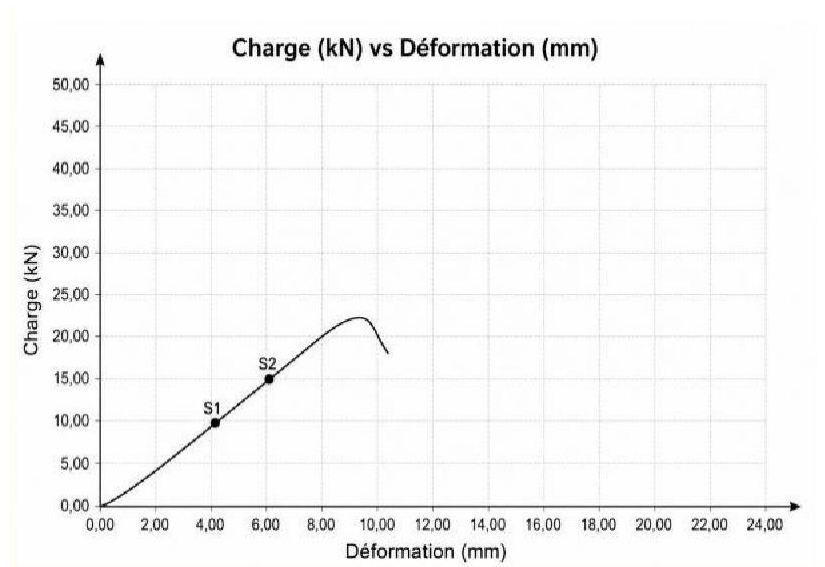


Figure III-5 : Courbes d'effort de poinçonnement en fonction de l'enfoncement pour CBR
Immédiat de mélange 70SD30AR compacté à l'OPM.

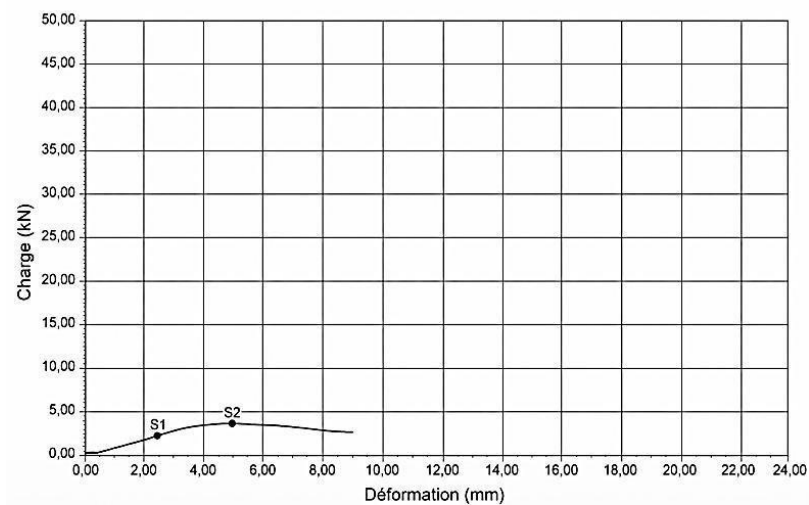


Figure III-6 : Courbes d'effort de poinçonnement en fonction de l'enfoncement pour CBR
imbibé de mélange 70SD30AR compacté à l'OPM.

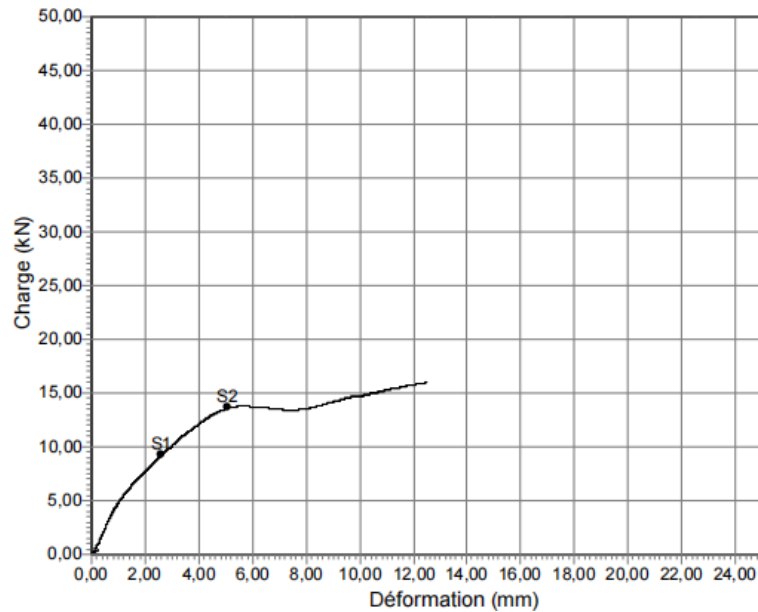


Figure III-7: Courbes d'effort de poinçonnement en fonction de l'enfoncement pour CBR Immédiate de mélange 70SD30AR compacté avec 55 coups par couche à l'OPM-2%.

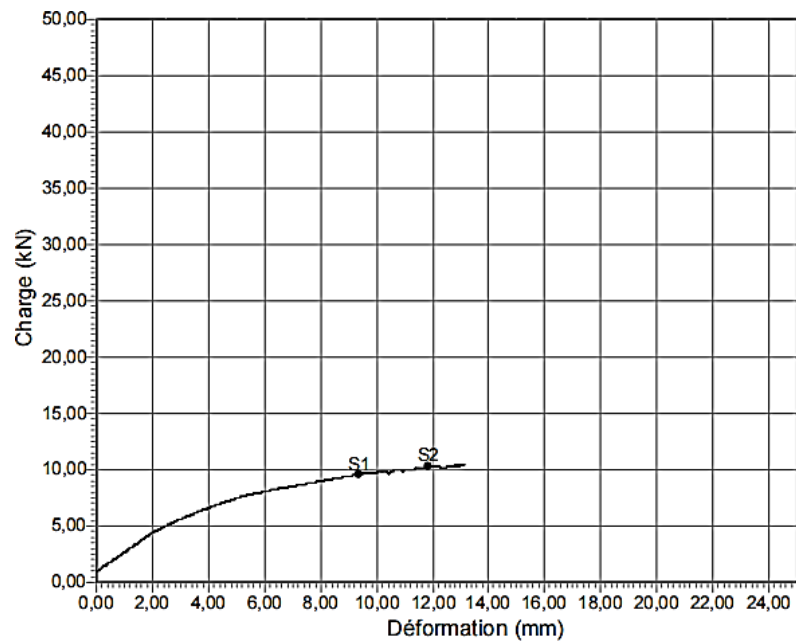


Figure III-8 : Courbes d'effort de poinçonnement en fonction de l'enfoncement pour CBR Immédiate de mélange 70SD30AR compacté avec 60 coups par couche à l'OPM-2%.

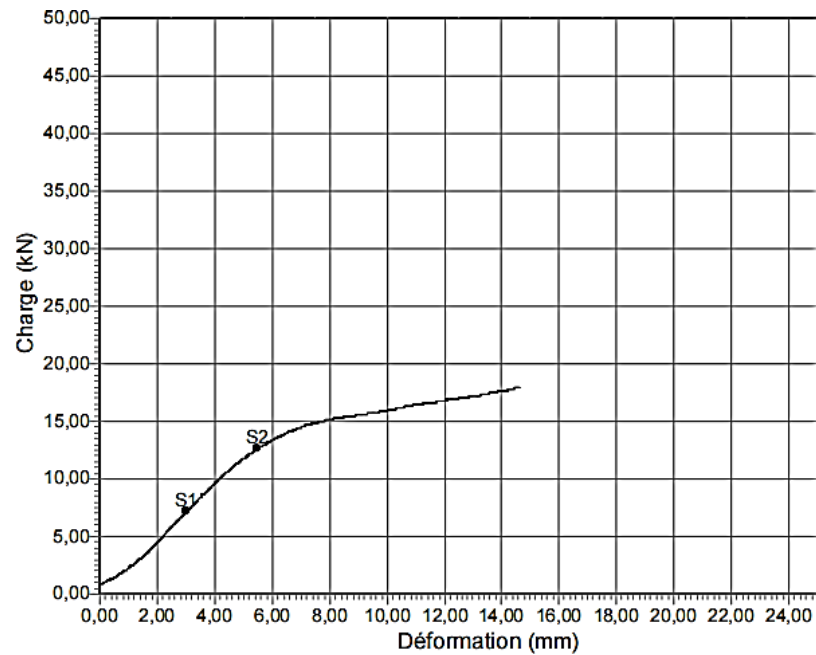


Figure III-9 : Courbes d'effort de poinçonnement en fonction de l'enfoncement pour CBR Immédiate de mélange 70SD30AR compacté avec 55 coups par couche à l'OPM-4%.

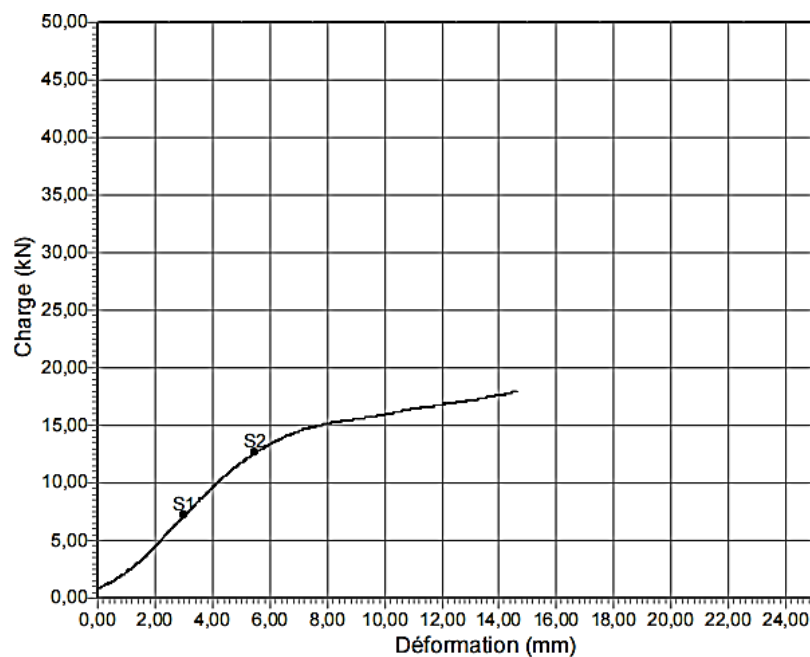


Figure III-10: Courbes d'effort de poinçonnement en fonction de l'enfoncement pour CBR Immédiate de mélange 70SD30AR compacté avec 60 coups par couche à l'OPM-4%.

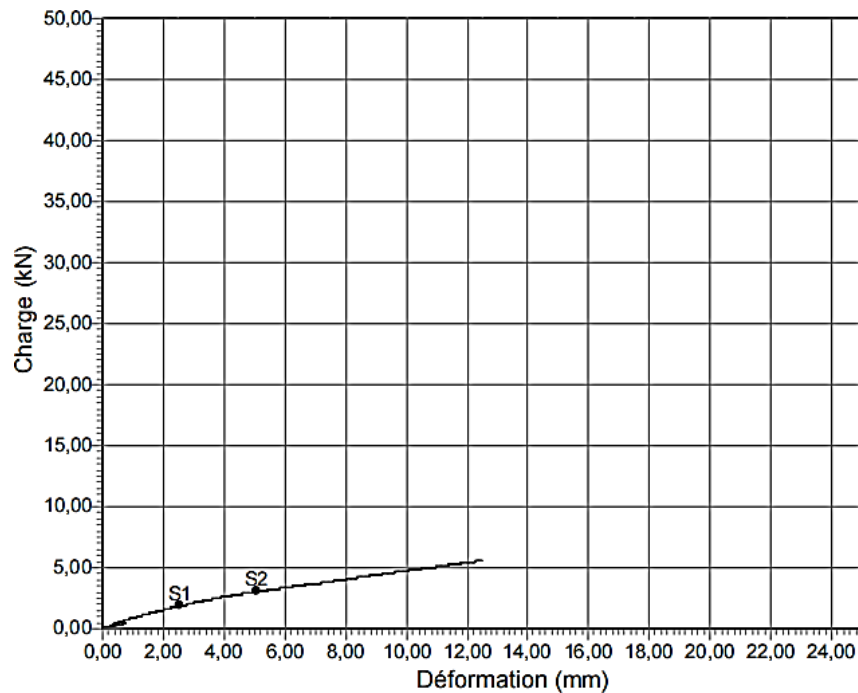


Figure III-11: Courbes d'effort de poinçonnement en fonction de l'enfoncement pour CBR imbibé de mélange 70SD30AR compacté avec 55 coups par couche à l'OPM-2%.

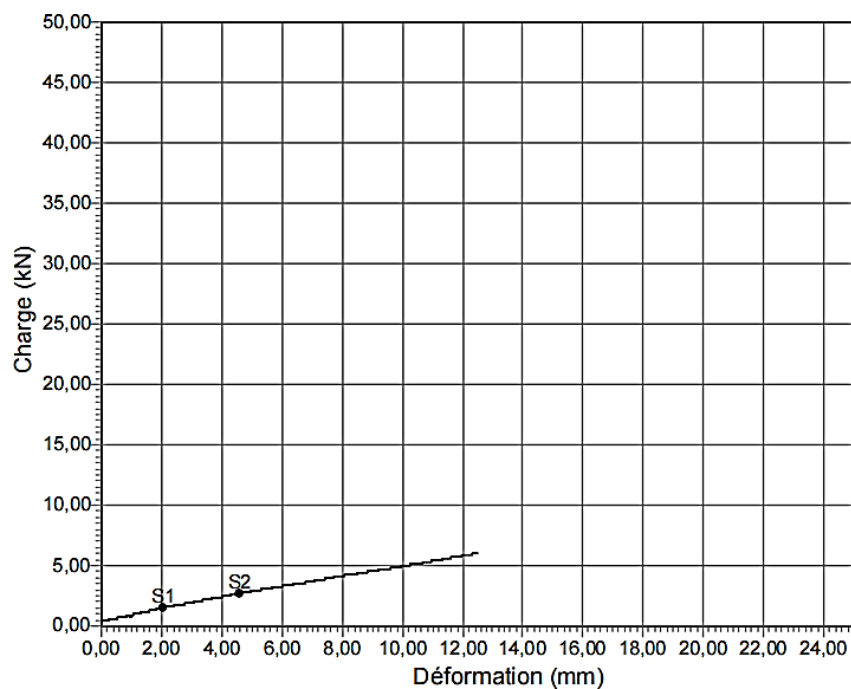


Figure III-12: Courbes d'effort de poinçonnement en fonction de l'enfoncement pour CBR imbibé de mélange 70SD30AR compacté avec 60 coups par couche à l'OPM-2%.

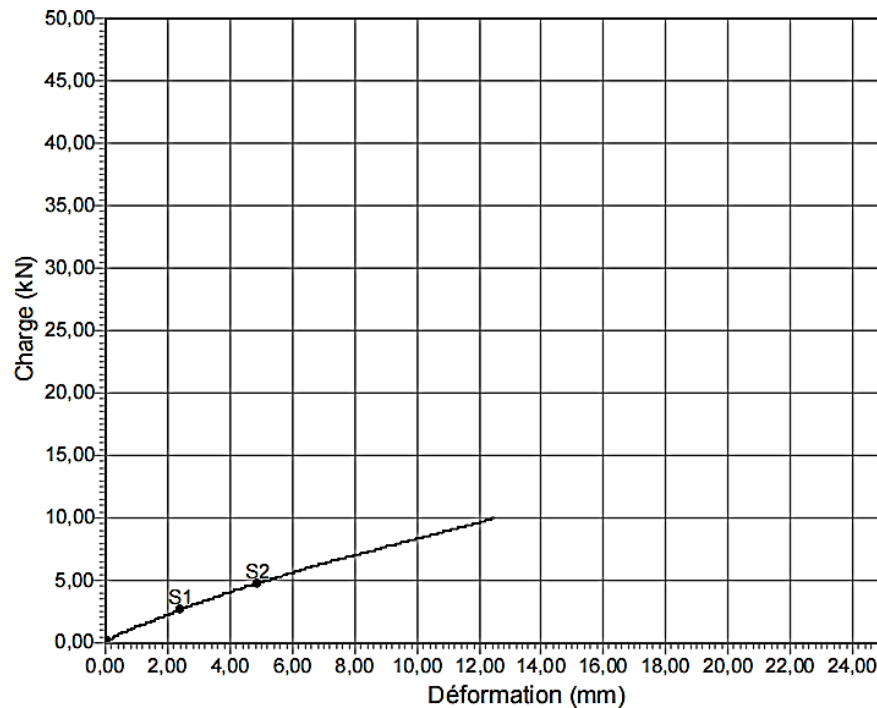


Figure III -13 : Courbes d'effort de poinçonnement en fonction de l'enfoncement pour CBR imbibé de mélange 70SD30AR compacté avec 55 coups par couche à l'OPM-4%.

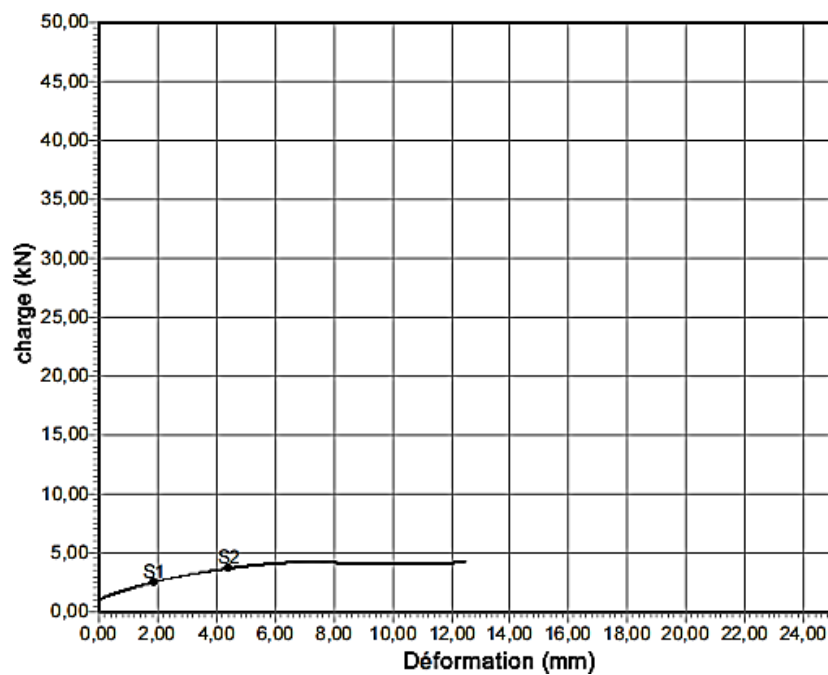


Figure III-14: Courbes d'effort de poinçonnement en fonction de l'enfoncement pour CBR imbibé de mélange 70SD30AR compacté avec 60 coups par couche à l'OPM-4%.

Tableau III-2 : Résultats récapitulatifs des valeurs des indices CBR de mélange 70SD30AR.

	I CBR immédiat	I CBR imbibé
70SD30AR à l'OPM	75.3	17.6
70SD30AR à l'OPM-2% (55 coups par couche)	69.1	19.25
70SD30AR à l'OPM-2% (60 coups par couche)	71.8	23.8
70SD30AR à l'OPM-4% (55 coups par couche)	63.2	13.5
70SD30AR à l'OPM-4% (60 coups par couche)	64.6	15.1

La comparaison des résultats des indices CBR du mélange 70SD30AR avec les critères de compactibilité et de traficabilité présentés dans le Tableau III-2 permet de mettre en évidence le comportement du matériau dans différentes conditions hydriques et de compactage. Les valeurs de CBR immédiat obtenues pour l'ensemble des formulations étudiées sont comprises entre 63.2 et 75.3. Ces valeurs sont toutes supérieures à 60, ce qui correspond, selon le Tableau III-2, à une compactibilité élevée et à une bonne traficabilité. Ainsi, le mélange 70SD30AR présente un comportement favorable au compactage et permet une circulation satisfaisante des engins dans les conditions immédiates après mise en œuvre.

Le mélange compacté à l'OPM présente le meilleur indice CBR immédiat (75.3), traduisant une excellente aptitude au compactage et une très bonne portance. Lorsque la teneur en eau est réduite de 2 % (OPM-2 %), les valeurs de CBR immédiat restent supérieures à 60, notamment avec 71.8 pour 60 coups par couche. Cela indique que le matériau conserve une

bonne compactibilité malgré une légère réduction de l'humidité, particulièrement lorsque l'énergie de compactage augmente.

En revanche, les indices CBR imbibés sont nettement plus faibles, avec des valeurs comprises entre 13.5 et 23.8. Selon le Tableau III-2, ces résultats correspondent à une compactibilité faible à moyenne et à une traficabilité médiocre après immersion. Les formulations à OPM-4 % présentent les plus faibles valeurs de CBR imbibé, ce qui montre qu'un déficit hydrique important réduit fortement les performances du matériau en présence d'eau.

Par ailleurs, l'augmentation de l'énergie de compactage de 55 à 60 coups par couche améliore systématiquement les valeurs de CBR, aussi bien à l'état immédiat qu'après immersion. Cette amélioration traduit une meilleure densification du matériau, ce qui favorise sa résistance mécanique et sa portance.

Globalement, cette comparaison montre que le mélange 70SD30AR possède de bonnes caractéristiques de compactibilité et de traficabilité à l'état immédiat, tandis que ses performances après immersion demeurent plus limitées. Une légère réduction de la teneur en eau associée à une énergie de compactage plus élevée semble constituer la condition la plus favorable pour améliorer le comportement global du matériau.

Tableau III -3 : Degré de compactibilité et de traficabilité.

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

4. LA RESISTANCE A LA COMPRESSION :

Les matériaux sahariens utilisés dans le domaine routier acquièrent, après compactage puis dessiccation prolongée, une forte cohésion, ce phénomène est appelé auto stabilisation ou durcissement ou encore effet de prise. Contrairement à la prise hydraulique où se produisent des liaisons rigides, souvent irréversibles et durables, ce durcissement n'est pas permanent, car la cohésion baisse considérablement quand le degré de saturation augmente et disparaît quasi totalement par saturation totale.

Les ingénieurs routiers qui ont utilisé ses matériaux sont d'accord sur les constatations suivantes (Domec M. 1980 ; Morsli M. 2008):

- Après compactage et séchage, les couches de chaussée durcissent. C'est dans la partie supérieure de la couche que le phénomène est plus important ;
- Sous réserve que la couche soit protégée de l'eau (couche de roulement étanche et drainage efficace), ce durcissement se conserve, voire s'accroît dans le temps ;
- Le durcissement disparaît si, faute des dispositions constructives nécessaires, la couche voit sa teneur en eau fortement augmentée ;
- Le durcissement est très inégal selon le gisement utilisé ;
- L'importance de ce durcissement influence le comportement dans le temps et sous le trafic des chaussées réalisées. Les chaussées sur lesquelles ce durcissement est le plus net se comportant mieux.

Les principales conclusions déduites de l'étude par l'auteur sont :

- La composante de dessiccation se développe lorsque la teneur en eau est relativement importante, sans toutefois que cette dernière porte préjudice à la cohésion du matériau lors du compactage. Donc la teneur en eau pour un développement optimal de la composante de dessiccation, est ω_{od} située à gauche ω_{opm} (coté sec).
- La composante de compactage est plus importante pour les faibles teneurs en eau ($\omega < \omega_{opm}$)
- Le durcissement étant la somme des deux composantes, il atteint son maximal pour une teneur en eau ω_{od} inférieur à ω_o .

- Lorsque la teneur en eau est maintenue constante, il y a peu ou pas d'évolution dans la résistance en compression ;
- Lorsqu'une dessiccation est possible, le durcissement des éprouvettes conduit à une augmentation importante des résistances en compression ;
- La température accélère le phénomène de durcissement, mais qu'à long terme, on tend vers une même résistance finale quel que soit la température de conservation ;
- Une forte augmentation de la teneur en eau, conduit à la détérioration des éprouvettes à moins de deux heures ;
- Pour des matériaux d'encroûtements différents, les résistances atteintes peuvent être très différentes.

D'après ces résultats, on peut constater que le durcissement est réversible, contrairement à la prise hydraulique, il disparaît aussitôt que la teneur en eau augmente et se reproduit s'il y a séchage. Plusieurs explications ont été données à ce phénomène nous citons :

Poton : Lors de la construction de la RN 1 entre Laghouat et Ghardaïa et selon laquelle : « *le durcissement est dû à une dissolution possible d'une partie de Calcite lors de l'imbibition et du compactage et recristallisation après séchage* » (Boukezzi L. 1997).

Alloul : Estime qu'il n'y a pas eu apparition de nouvelles formes cristallines au sein du matériau. Il conclut que : « *le durcissement constaté est dû uniquement à un arrangement des grains lors de l'imbibition et du compactage* » (Alloul B. 1981).

Ben Dhia : A simulé le phénomène se produisant dans une chaussée en soumettant une éprouvette ($\varphi = 10$ cm et $h = 20$ cm) immergée à sa base à une élévation de température ou une dépression en surface pendant une journée (voir figure V-16). Les éprouvettes soumises à l'essai ont été sciées et analysées au M.E.B. Les photos prises montrent que des zones de dissolution sont apparues à la partie inférieure (la base de l'éprouvette) et qu'à la partie supérieure, il y a eu dépôt et recristallisation de calcite. Ce résultat, a confirmé l'hypothèse que : « *l'auto stabilisation des tufs calcaires est due à une dissolution partielle du carbonate de calcium sous l'action d'eau et du CO_2 et à sa recristallisation après dessiccation* » (Ben Dhia M. 1983).

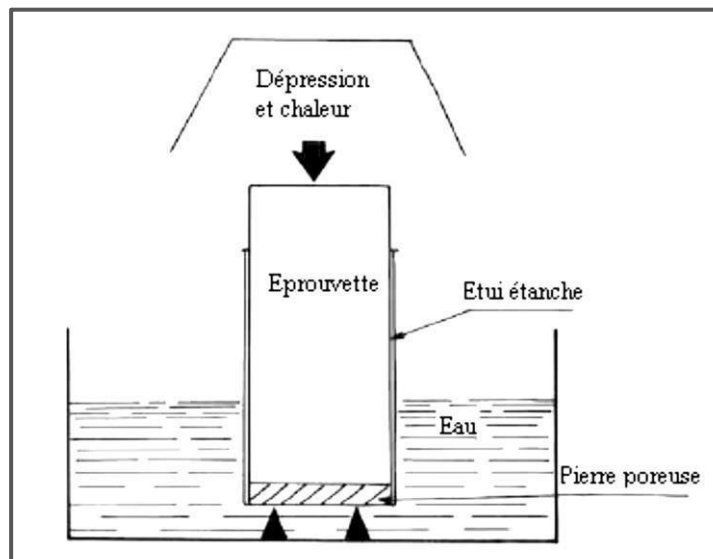


Figure III-15: Simulation du durcissement dans une couche sous l'effet de la température ou de la dépression (Ben Dhia M.H. 1983).

L'essai le plus courant pour produire ce phénomène consiste à mesurer les résistances à la compression en fonction du temps sur des éprouvettes de sols compactées.

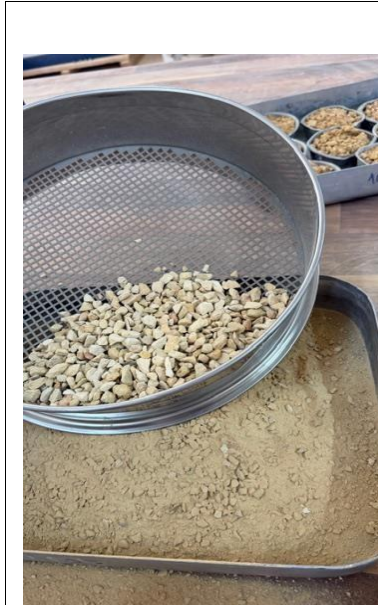
Cet essai est un indice permettant d'évaluer la cohésion des matériaux compactés (Fenzy E. 1966, Ben Dhia M. 1983, Morsli M. et al. 2007, Goual I. et al. 2012, Daheur E.G. et al. 2015), introduit pour les matériaux locaux la première fois par FENZY (1957), il est réalisé sur tous les matériaux sahariens sur la fraction $< 5\text{mm}$. Le compactage à l'OPM est effectué à la presse et les éprouvettes démoulées sont séchées à l'étuve à 55°C pendant 48h (éprouvettes de 5cm de diamètre et de hauteur).

Dans notre cas, une série d'éprouvettes cylindriques de dimensions ($\varnothing = 5\text{cm}$, $H = 10\text{cm}$), sont confectionnées à différentes teneurs en eau (OPM, OPM-2% et OPM-4%) et à différentes compacités théorique (100%, 98% et 95%), afin d'étudier la relation entre la résistance et la teneur en eau et la compacité. Le compactage est réalisé selon la norme NFP 98- 230-2.

4.1. Préparation des échantillons :

La préparation des échantillons s'effectue en quatre étapes principales :

1. Les sols naturels ont d'abord été séchés à l'air libre ; ensuite, l'argile a été tamisée à 4 mm afin d'éliminer les particules grossières. Par la suite, une fraction précise de sable de dune et argile ont été mélangées (70% sable de dune + 30% argile).



2. La quantité d'eau nécessaire, correspondant à la teneur en eau optimale, a été ajoutée aux mélange 70SD30AR. Le malaxage a ensuite été réalisé soigneusement afin d'obtenir un mélange homogène. Par la suite, le mélange sol-eau a été conservé dans un sac plastique hermétiquement fermé pendant au moins 24 heures, afin d'assurer une répartition uniforme de l'humidité.



-1-



-2-



-3-

3. Une quantité de matériau a été compacté statiquement pour atteindre une densité sèche correspondant à 98% de la densité sèche maximale. Le compactage réalisé à l'aide d'un moule à double piston, avec une vitesse de chargement de 1,14 mm/min. Cette méthode de compactage permet d'assurer une répartition homogène des contraintes de compactage (Romero, 1999 ; Ghembaza et al., 2007 ; Gueddouda et al., 2010).



La Figure III-16 présente la relation entre résistance à la compression (R_c) et la compacité (C).

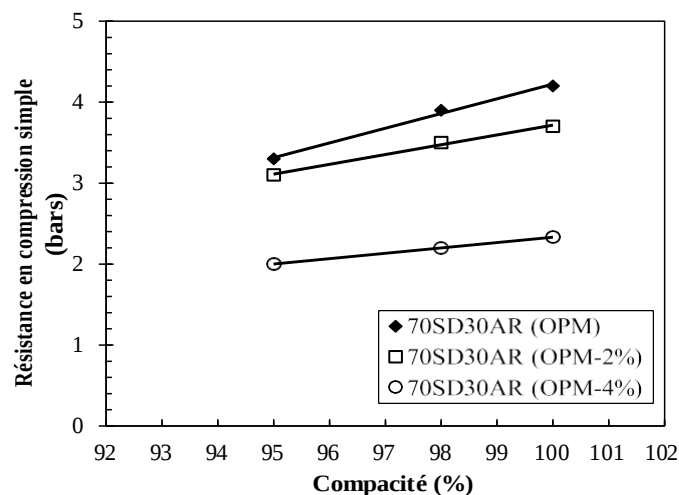


Figure III-17: Variation de la résistance à la compression en fonction de la compacité.

Les résultats montrent une corrélation positive nette entre la compacité et la résistance en compression simple, indépendamment de la teneur en eau. En effet, pour l'ensemble des conditions étudiées, la résistance à la compression augmente d'une manière linéaire avec l'augmentation de la compacité, cela avec les relations 1,2 et 3. Ce comportement s'explique par la réduction de l'indice des vides et l'augmentation du nombre de contacts intergranulaires, ce qui améliore la transmission des efforts et la rigidité globale du matériau.

Par ailleurs, l'influence de la teneur en eau est clairement significative. La condition OPM présente systématiquement les valeurs de résistance les plus élevées, atteignant environ 4.2 bars pour la compacité maximale. Cette performance traduit une condition de compactage optimale où l'eau joue un rôle de lubrifiant, facilitant le réarrangement des particules et permettant une structure plus dense et plus homogène.

À l'inverse, les états sous-optimaux (OPM-2 % et OPM-4 %) conduisent à une diminution de la résistance. Cette réduction est particulièrement marquée pour OPM-4 %, où les valeurs restent faibles malgré l'augmentation de la compacité. Ce comportement peut être attribué à un déficit en eau entraînant une augmentation des forces de frottement intergranulaire, limitant l'arrangement optimal des grains et la formation d'une microstructure compacte.

Ainsi, la figure met en évidence un effet couplé entre compacité et teneur en eau, confirmant que la performance mécanique du matériau est fortement conditionnée par la proximité de la teneur en eau optimale de compactage. Elle souligne également que la compacité seule ne suffit pas à garantir une résistance élevée si l'état hydrique n'est pas optimal.

Ces résultats confirment que la résistance en compression simple des matériaux compactés dépend simultanément du degré de densification et de l'état hydrique initial

Les relations entre la compacité et la résistance à la compression sont comme suit :

$$R_c = 0,18 \times C - 13,93 \text{ avec } R^2 = 0,99. \text{ (OPM)} \quad 1$$

$$R_c = 0,12 \times C - 8,39 \text{ avec } R^2 = 0,99. \text{ (OPM)} \quad 2$$

$$R_c = 0,066 \times C - 4,27 \text{ avec } R^2 = 1. \text{ (OPM)} \quad 3$$

Les valeurs de R_c correspondent à 95% de compacité sont supérieures à celle qui est exigée par les spécifications de la TRS.

5. CONCLUSION

Les résultats de cette partie montrent que le mélange 70SD30AR présente une bonne portance à l'état immédiat, particulièrement à l'OPM, mais une sensibilité marquée à l'eau après immersion. Un compactage légèrement sec de l'optimum (OPM-2%) avec une énergie de compactage plus élevée améliore la résistance à l'état imbibé, tandis qu'un déficit plus important en eau (OPM-4%) dégrade les performances. Ainsi, l'optimisation de la teneur en eau et de l'énergie de compactage est essentielle pour garantir un meilleur comportement mécanique et une meilleure durabilité du matériau.

La résistance en compression simple du matériau dépend fortement de la compacité et de la teneur en eau, avec une augmentation globalement linéaire de la résistance lorsque la compacité s'améliore. Cependant, cette relation est conditionnée par l'état hydrique, l'OPM offrant les meilleures performances grâce à un équilibre optimal entre lubrification et densification. À l'inverse, les conditions sous-optimales, notamment OPM-4%, limitent la réorganisation des grains et réduisent significativement la résistance. Ainsi, la performance mécanique résulte d'un effet couplé entre compacité et teneur en eau, soulignant l'importance d'un compactage réalisé au voisinage de l'optimum pour garantir une meilleure résistance.

Conclusion Générale

Cette recherche s'inscrit dans une démarche visant à valoriser les matériaux locaux et à élargir la gamme des sols susceptibles d'être utilisés dans la construction routière en milieu saharien. Une telle approche présente des avantages économiques et environnementaux importants, notamment à travers la préservation des ressources naturelles, la réduction des coûts liés au transport des matériaux et la limitation de l'empreinte environnementale des projets routiers.

Les essais d'identification géotechnique et minéralogique réalisés dans le cadre de cette étude ont permis de caractériser les matériaux étudiés et d'évaluer leur aptitude à une utilisation en corps de chaussée au regard des normes et spécifications routières en vigueur. Les résultats obtenus montrent que le sable de dune se distingue par une granulométrie uniforme, une très faible teneur en fines et une absence de plasticité, traduisant un matériau propre, léger et peu sensible aux variations de teneur en eau, avec une portance relativement stable. En revanche, l'argile étudiée présente une forte proportion de fines et une granulométrie étalée, caractéristiques des matériaux cohérents de famille III, dont le comportement mécanique dépend fortement de la cohésion et de l'état hydrique. Les essais ont également révélé une légère pollution des fines ainsi qu'une sensibilité importante de ce matériau à l'eau, aussi bien en termes de compactage que de portance.

L'analyse des caractéristiques géotechniques des matériaux à l'état brut a mis en évidence des performances globalement insuffisantes par rapport aux exigences des références routières sahariennes et des guides techniques en vigueur, notamment en ce qui concerne la granulométrie, la qualité des fines et les résistances mécaniques. Toutefois, les résultats obtenus sur le mélange 70SD30AR montrent qu'une amélioration significative du comportement mécanique peut être obtenue grâce à une optimisation des conditions de compactage. En effet, le mélange présente une bonne portance à l'état immédiat, particulièrement au voisinage de l'optimum Proctor modifié, tandis qu'un compactage légèrement sec de l'optimum associé à une énergie de compactage plus élevée améliore la résistance après immersion. À l'inverse, une réduction excessive de la teneur en eau entraîne une diminution notable des performances mécaniques.

Par ailleurs, les essais de compression simple ont confirmé que la résistance du matériau est étroitement liée à la compacité et à la teneur en eau. Une augmentation de la compacité induit une amélioration quasi linéaire de la résistance, à condition que l'état hydrique soit proche de

Conclusion Générale

l'optimum. Les meilleures performances mécaniques sont ainsi obtenues à l'OPM, où l'équilibre entre lubrification et densification favorise une réorganisation optimale des grains. Ces résultats soulignent l'importance du contrôle simultané de la teneur en eau et de l'énergie de compactage afin d'assurer la durabilité et la performance mécanique des matériaux étudiés dans les structures de chaussées.

Il est recommandé d'utiliser un mélange composé d'environ 70 % de sable et 30 % d'argile en couche de fondation routière, en raison de ses bonnes performances de compactage et de stabilité. Le compactage doit être réalisé au voisinage de l'optimum Proctor modifié afin d'atteindre la densité sèche maximale et d'optimiser le comportement mécanique.

Des études complémentaires sont nécessaires pour évaluer la durabilité à long terme sous trafic et conditions climatiques réelles, ainsi que l'effet de stabilisants (chaux, ciment) sur l'amélioration des performances géotechniques.

Enfin, cette approche peut être généralisée à d'autres matériaux locaux en Algérie afin de promouvoir une construction routière durable et économiquement optimisée.

Références Bibliographiques

1. **Abdelghani, M. (1980).** Techniques routières sahariennes.
2. **Akacem, A. (2017).** Étude sur la valorisation des sables de dunes en technique routière. Mémoire Structure en génie civil, Université de Ghardaïa,
3. **Alloul, A., & Struillou, R.** Spécifications des matériaux routiers sahariens.
4. **Alloul, B. (1981).** Étude du phénomène d'auto-stabilisation des matériaux sahariens.
5. **Ameraoui, A. (2002).** Technique routière saharienne et compactage des chaussées.
6. **Azzouz, F. Z. (2016),** Caractérisation physique et mécanique de mélanges argile-sable de dune destinés la réalisation des couches compactées en région arides de l'Algérie. V ème Séminaire International innovation et valorisation en génie civil matériaux de construction, 15 et 16 décembre 2016 à Hammamet – Tunisie.
7. **Azzouz, F. Z. (2016),** Étude de la capacité portante de la couches compactées constituées par un mélanges d sable de dune et argiles et renforcés par géotextiles dans les régions arides. Troisième Journée Doctorale de la faculté de Technologie - 3JDFT2016 Université de Laghouat , 10 Mars 2016.
8. **Azzouz, F. Z. (2022),** Poster sur amélioration des caractéristiques mécaniques des mélanges sable – argile par ajout du géotextile destinés pour la réalisation des couches compactées en régions arides de Ghardaïa (Algérie), Journée d'étude sur matériaux laboratoire du MESTEL, 05 JUIN 2022 Université de Ghardaïa.
9. **Ben Dhia, H. (1998).** Valorisation des sables de dunes en technique routière saharienne.
10. **Ben Dhia, M.H. (1983).** Étude du phénomène d'auto-stabilisation des tufs calcaires sahariens.
11. **Benna, M., et al. (2004).** Étude des caractéristiques physico-chimiques des sables de dunes algériens.
12. **Boukezzi, L. (1997).** Étude du durcissement des matériaux sahariens.
13. **Boularak, A. (1989).** Étude des remblais routiers en milieu saharien.
14. **Bouttaba et S (2025),** étude comparative entre deux modes de compactage d'un matériau local Mémoire de Master Structure en génie civil, Université de Ghardaïa, 2024/2025.
15. **Cherf fares et (2025),** (influence du mode de compactage sur la portance d'un matériau local, Mémoire Structure en génie civil, Université de Ghardaïa, 2024/2025.
16. **Cherrak, M. (2015).** Étude des matériaux sahariens et valorisation des sables de dunes.
17. **CRATerre. (2012).** Traité de construction en terre. Marseille : Éditions Parenthèses.
18. **CTTP. (2001).** Catalogue de dimensionnement des chaussées neuves. Alger :CTTP
19. **Daheur, E.G., et al. (2015).** Étude de la résistance à la compression des matériaux sahariens compactés.
20. **Domec, J. (1980).** Construction des chaussées sahariennes.
21. **Fenzy, E. (1957).** Étude de la compression simple des matériaux locaux sahariens.
22. **Fenzy, J. (1966).** Technique Routière Saharienne (TRS).
23. **Gandil, P. (1988).** Étude comparative des matériaux routiers compactés.
24. **Ghazali (2023),** Influence des trois types des géotextiles sur un mélange optimal de 70%

Références Bibliographiques

- sable de dune et 30% argile de Bouhraoua de la wilaya de Ghardaïa sur la portance du sol domaine routiers(CBR) , Mémoire de Master Structure en génie civil, Université de Ghardaïa, 2022- 2023.
25. **Ghembaza, M., et al. (2007).** Étude du compactage statique des sols fins.
 26. **Ghrieb, A., et al. (2014).** Étude expérimentale des sables de dunes stabilisés.
 27. **Goual, I., et al. (2012).** Étude de la cohésion et résistance mécanique des matériaux sahariens.
 28. **Grim, R. E. (1968).** Clay Mineralogy. McGraw-Hill.
 29. **GTR. (1992).** Guide des Terrassements Routiers. LCPC-SETRA.
 30. **Gueddouda, M. (2010).** Analyse MEB des sables de dunes de Laghouat.
 31. **Gueddouda, M.K., et al. (2010).** Étude expérimentale du compactage des sols compactés statiquement.
 32. **Gueraa et S (2022)** Étude de un comportement mécanique d'un mélange sable de dune – argile de wilaya Ghardaïa renforcé par géotextile. Mémoire de Master Structure en génie civil Université de Ghardaïa, 2021/2022.
 33. **Holtz, R. D., Kovacs, W. D., & Sheahan, T. C. (2011).** An Introduction to Geotechnical Engineering. Pearson.
 34. **Kettab, A. (2007).** Valorisation des matériaux locaux sahariens dans les chaussées routières.
 35. **Kettab, A., et al. (2002).** Étude des mélanges sable de dunes–liants hydrauliques.
 36. **Lambe, T. W., & Whitman, R. V. (1969).** Soil Mechanics. Wiley.
 37. **LCPC.** Guide technique des traitements des sols. Paris : LCPC.
 38. **Ministère de l'Équipement du Maroc. (2001).** Guide des terrassements routiers.
 39. **Mitchell, J. K., & Soga, K. (2005).** Fundamentals of Soil Behavior. Wiley.
 40. **Morsli, M. (2007).** Technique routière saharienne et valorisation des matériaux locaux.
 41. **Morsli, M. (2008).** Étude du durcissement des matériaux sahariens utilisés en chaussée.
 42. **Nedjari, M. (2003).** Stabilisation des sables de dunes pour applications routières.
 43. **Oldache, A. (1988).** Étude géologique des formations dunaires sahariennes.
 44. **Ould Sid, S., et al. (1995).** Étude géotechnique des sables de dunes sahariens.
 45. **Pye, K. (2009).** Aeolian Sand and Sand Dunes. Springer
 46. **Romero, E. (1999).** Étude expérimentale du compactage statique des sols.
 47. **SETRA.** Guide technique routier. Paris : SETRA
 48. **SETRA–LCPC. (1992).** Classification des sols selon l'indice de plasticité.
 49. **Terzaghi, K. (1943).** Theoretical Soil Mechanics. Wiley.
 50. **Touati, A. (1994).** Étude climatique du Sahara algérien.
 51. **Vial, J. (1978).** Formation et dynamique des sables éoliens sahariens
 52. **Zahi djhad (2018),** Étude expérimentale des mélanges sable de dune/argile avec l'ajout du géotextile dans le domaine géotechnique routier (2017- 2018) – Mémoire de Master en Hydraulique Urbain Université de Ghardaïa.

Références Bibliographiques

NORMES DES ESSAIS :

1. (NF P94-078), Essai CBR (California Bearing Ratio test)
2. Méthode par Tamisage à sec après lavage.
3. NF P 11-300, septembre 1992 : Classification des matériaux utilisables dans la construction des Remblais et des couches de forme d'infrastructures routières.
4. NF P 18-598. Essai d'équivalent de sable.
5. NF P 94-050, septembre 1995. Sols : reconnaissance et essai - Détermination de la teneur en eau Pondérale des sols. Méthode par étuvage.
6. NF P 94-051, mars 1993. Sols : reconnaissance et essai – Détermination des limites d'Atterberg – Limite de liquidité à la coupelle- limite de plasticité au rouleau.
7. NF P 94-051. Détermination des limites d'Atterberg.
8. NF P 94-054, octobre 1991. Sols : reconnaissance et essai - Détermination de la masse volumique des particules solides des sols. Méthode du pycnomètre à eau.
9. NF P 94-056, mars 1996. Sols : reconnaissance et essai - Analyse granulométrique.
10. NF P 94-056. Analyse granulométrique par tamisage.
11. NF P 94-057. Analyse granulométrique par sédimentométrie.
12. NF P 94-068. Essai au bleu de méthylène.
13. NF P 94-071-1, août 1992. Sols : reconnaissance et essai - Essai de cisaillement rectiligne à la Boite : cisaillement direct.
14. NF P 94-078. Essai CBR.
15. NF P 94-078. Essai CBR.
16. NF P 94-093, Décembre 1993. Sols : reconnaissance et essai - Détermination des caractéristiques de compactage d'un sol : essai Proctor normal, essai Proctor modifié.
17. NF P 94-093. Essai Proctor modifié.
18. NF P 98-230-2. Compactage des matériaux routiers.
19. NF P 98-230-2. Compactage des matériaux routiers.
20. NFP 94-068, Novembre 1993. Sols : reconnaissance et essai - Mesure de la quantité d'adsorption de bleu de méthylène d'un sol ou d'un matériau rocheux. Détermination de la valeur de bleu de Méthylène d'un sol ou d'un matériau rocheux par l'essai à la tache.

ANNEXE 1

Analyse granulométrique de sable

Poids De L'Echantillon (g)	Tamis (mm)	Poids Refus Partiels (g)	Poids refus Cumulés (g)	Poids refus cumulés (%)	Complément à 100	Tamisat (%)
	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

Analyse granulométrique d'argile

Poids De L'Echantillon (g)	Tamis (mm)	Poids Refus Partiels (g)	Poids refus Cumulés (g)	Poids refus cumulés (%)	Complément à 100	Tamisat (%)
	0	0	0	0	0	100
500	5	2.97	2.97	0.59	99.41	99
	2	5.99	8.96	1.79	98.21	98
	1	4.34	13.3	2.66	97.34	97
	0.4	3.76	17.06	3.41	96.59	97
	0.2	2.65	19.71	3.94	96.06	96
	0.1	4.04	23.75	4.75	95.25	95
	0.008	1.16	24.91	4.98	95.02	95

Analyse granulométrique mélange

Poids De L'Echantillon (g)	Tamis (mm)	Poids Refus Partiels (g)	Poids refus Cumulés (g)	Poids refus cumulés (%)	Complément à 100	Tamisât (%)
	0	0	0	0	0	100
100	5	2.44	2.44	0.24	99.76	100
	2	7.14	9.58	0.96	99.04	99
	1	4.38	13.96	1.40	98.60	99
	0.4	5	18.96	1.90	98.10	98
	0.2	677.42	696.38	69.64	30.36	30
	0.1	20.22	716.6	71.66	28.34	28
	0.008	0.83	717.43	71.74	28.26	28

ANNEXE 2

Limite d'Atterberg

LIMITE DE LIQUIDITE ARGILE

	1 ^{er} Essai		2 ^{ème} Essai		3 ^{ème} Essai	
Nombre de coups	18		25		32	
N° de la tare	L	RA	D2	A1	L6	H3
Poids total humide	14.75	16.04	18.98	17.69	16.99	15.65
Poids total sec	12.15	13.18	15.06	13.95	13.88	13.02
Poids de la tare	7.81	8.4	8.38	7.59	8.49	8.46
Poids de l'eau	2.6	2.68	3.92	3.74	3.11	2.63
Poids du sol sec	4.34	4.78	6.68	6.36	5.39	4.56
Teneur en eau (%)	59.91	59.83	58.68	58.81	57.70	57.68
Moyenne	59.87		58.74		57.69	
WL = 58.77						

LIMITE DE PLASTICITE ARGILE

	1 ^{er} Essai		2 ^{ème} Essai		3 ^{ème} Essai	
N° de la tare	A		X8		X100	
Poids total humide	33.44		31.95		31.87	
Poids total sec	33.09		31.62		31.56	
Poids de la tare	31.76		30.34		30.33	
Poids de l'eau	0.35		0.33		0.31	
Poids du sol sec	1.33		1.28		1.23	
Teneur en eau (%)	26.32		25.78		25.20	
Moyenne	26.32		25.78		25.20	
LP = 25.77						

LIMITE DE LIQUIDITE SABLE DE DUNE

	1 ^{er} Essai		2 ^{ème} Essai		3 ^{ème} Essai	
Nombre de coups	18					
N° de la tare	B3	23				
Poids total humide	16.23	17.43				
Poids total sec	15.01	16.01				
Poids de la tare	8.49	8.45		SABLEUX		
Poids de l'eau	1.22	1.42				
Poids du sol sec	6.52	7.56				
Teneur en eau (%)	18.71	18.78				
Moyenne	18.75					
WL = 18.02						

LIMITE DE PLASTICITE MELANGE

	1 ^{er} Essai		2 ^{ème} Essai		3 ^{ème} Essai	
N° de la tare	X41		X5		A5	
Poids total humide	38.2		39.63		41.85	
Poids total sec	37.83		39.18		41.38	
Poids de la tare	35.44		36.27		38.35	
Poids de l'eau	0.37		0.45		0.47	
Poids du sol sec	2.39		2.91		3.03	
Teneur en eau (%)	15.48		15.46		15.51	
Moyenne	15.48		15.46		15.51	

LP = 15.48

LIMITE DE LIQUIDITE MELANGE

	1^{er} Essai		2^{ème} Essai		3^{ème} Essai	
Nombre de coups	18		25		32	
N° de la tare	M2	C3	B3	A9	N	K9
Poids total humide	16.01	17.26	18.01	19.36	19.31	19.6
Poids total sec	14.41	15.55	16.20	17.28	17.35	17.57
Poids de la tare	7.85	8.5	8.48	8.38	8.52	8.46
Poids de l'eau	1.6	1.71	1.81	2.08	1.96	2.03
Poids du sol sec	6.56	7.05	7.72	8.9	8.83	9.11
Teneur en eau (%)	24.39	24.26	23.45	23.37	22.20	22.28
Moyenne	24.32		23.41		22.24	

WL =23.32

RAPPORT D'ESSAI Limites d'Atterberg NF P 94 - 51																			
Client : Projet : RECHERCHE Endroit :		N° Projet : Réf. Client : N° rapport : Rév :																	
Echantillon n° : Sondage n° : ARGILE Profondeur : Matériaux :		Provenance : Endroit de prélèvement : Prélevé par : Reçu le : Date prélèvement : Date essais : 09 . 02. 2026																	
Limite de Liquidité (%) : WL = 58,77 Limite de Plasticité (%) : WP = 25,77 Indice de Plasticité (%) : IP = 33,00		Teneur en eau naturelle (%) : Weau =																	
Limite de liquidité <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th style="text-align: center;">Ech N°</th> <th style="text-align: center;">W (%)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td style="text-align: center;">1</td><td style="text-align: center;">26,32</td></tr> <tr><td style="text-align: center;">2</td><td style="text-align: center;">25,78</td></tr> <tr><td style="text-align: center;">3</td><td style="text-align: center;">25,2</td></tr> <tr><td> </td><td> </td></tr> <tr><td> </td><td> </td></tr> <tr><td> </td><td> </td></tr> <tr><td> </td><td> </td></tr> </tbody> </table> Limite de plasticité ABaque DE CASAGRANDE				Ech N°	W (%)	1	26,32	2	25,78	3	25,2								
Ech N°	W (%)																		
1	26,32																		
2	25,78																		
3	25,2																		
Remarque :																			
Préparé par : Date :		Approuvé par : Date : DAHMANE-HADJER																	

RAPPORT D'ESSAI Limites d'Atterberg NF P 94 - 51																			
Client : Projet : RECHERCHE Endroit :		N° Projet : Réf. Client : N° rapport : Rév :																	
Echantillon n° : Sondage n° : 70%SD +30AR Profondeur : Matériaux :		Provenance : Endroit de prélèvement : Prélèvement par : Date prélèvement :																	
Reçu le : Date essais : 12 . 02. 2026																			
Limite de Liquidité (%) : WL = 23,32 Limite de Plasticité (%) : WP = 15,48 Indice de Plasticité (%) : IP = 7,84		Teneur en eau naturelle (%) : Weau =																	
Limite de liquidité Nombre de coups Limite de plasticité <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse; text-align: center;"> <thead> <tr> <th>Ech N°</th> <th>W (%)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>1</td><td>15,48</td></tr> <tr><td>2</td><td>15,46</td></tr> <tr><td>3</td><td>15,51</td></tr> <tr><td> </td><td> </td></tr> <tr><td> </td><td> </td></tr> <tr><td> </td><td> </td></tr> <tr><td> </td><td> </td></tr> </tbody> </table> ABAQUE DE CASAGRANDE Limite de Liquidité WL (%)				Ech N°	W (%)	1	15,48	2	15,46	3	15,51								
Ech N°	W (%)																		
1	15,48																		
2	15,46																		
3	15,51																		
Remarque :																			
Préparé par :		Date :																	
Approuvé par : DAHMANE-HADJER		Date :																	

ANNEXE 3

LABORATOIRE DES TRAVAUX PUBLICS DU SUD

ANALYSE SEDIMENTOMETRIQUE NFP 94 – 057 Mai 1992

Structure : **U/G**

Lieu de travail : **S^{CE} ID**

N° Dossier interne : **RECHERCHE**

Date **15.02.2026**

Échantillon : **ARGILE**

Opérateur : /

Équipements utilisés : **BALANCE/ETUVE**

N° D'inventaire: **L21.09.15/L49.01.91**

Température ° C	Temps	Durée de chute	R'=R -1000 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
19C°	8h20	30 "	21	-0.180	20.820	0.075	95
19C°	8h21	01'	20.5	-0.180	20.320	0.055	93
19C°	8h22	02'	20	-0.180	19.820	0.038	90
19C°	8h25	05'	19	-0.180	18.820	0.025	86
19C°	8h30	10'	17	-0.180	16.820	0.017	77
19C°	8h40	20'	16	-0.180	15.820	0.012	72
19C°	9h00	40'	15	-0.180	14.820	0.008	68
19.C°	9h40	80'	13	-0.180	12.820	0.006	58
20C°	11h00	160'	11	0.000	11.000	0.004	50
20C°	13h40	320'	10	0.000	10.000	0.003	46
18.6C°	24 h	1440'	08	-0.248	7.752	0.002	35
18.8C°	48h	-	04	-0.214	3.786	0.001	17
18C°	72 h	-	02	-0.350	1.65	0.0005	08

Annexes

Remarque :

$$p' = \frac{y}{100} \times p \quad \text{avec } y = \% \text{ du passant à } 0.080 \text{ mm} = 95$$

$$R1 = R' + C \quad \text{Si } T^{\circ} > \text{à } 20^{\circ} \text{ C}$$

$$R1 = R' - C \quad \text{Si } T^{\circ} < \text{à } 20^{\circ} \text{ C}$$

ANNEXE 4

LABORATOIRE DES TRAVAUX PUBLICS DU SUD

Teneur en Eau : NFP 94-050 Septembre 1995
ET
Densité : NFP 94-064 Novembre 1993

Structure : Unité Ghardaïa.

Lieu de Travail : S^{CE} ID

N° Dossier interne : **RECHERCHE**

Équipements utilisés : **Balance / Etuve**

Echantillon : /

Date : **12.02.2026**

Opérateur : /

N° D'inventaire : **L21.09.15 / L49.02.15**

ECHANTILLON	ARGILE						
TARE N°	G02		Z48				
P.H + TARE	235,55		265,4				
P.S + TARE	235,19		264,96				
POIDS DE LA TARE	119,35		118,18				
POIDS DE L'EAU	0,36		0,44				
POIDS SEC	115,84		146,78				
TENEUR EN EAU	0,31		0,30				
P.H + PARAFFINE		163,9					
POIDS HUMIDE		145,39					
POIDS PARAFFINE		0,9					
DENSITE PARAFFINE ($\rho_p = 0.9 \text{ g/cc}$)		18,51					
P.MAT.DANS L'EAU		75					
VOLUME BRUT		88,9					
VOLUME PARAFFINE		20,57					
VOLUME NET.		68,33					
DENSITE HUMIDE		2,13					
T. EN EAU MOYENNE		0,31					
DENSITE SECHE		2,12					

Annexes

TENEUR EN EAU DE SATURATION WS %		10					
DEGRE DE SATURATION SR %		3					

REMARQUE : la densité des grains solides $\gamma_s = 2.7 \text{ g/cm}^3$

ANNEXE 5

PROPOSITION DE SPECIFICATIONS POUR L'ALGERIE PAR ALLOUL (1981) ET STRUILLOU (1984)

			Poids lourd /jour				
			< 130	130 300	300 600	600 1200	> 1200
Zone II sup- humide H=350 à 600 mm de pluie avec bon drainage exigé	% < 80 µm max	BF	30	30	30	30	30
	% > 4 mm min	BF	30	30	30	30	30
	% > 12,5 mm min	BF	10	10	10	10	10
	LA max. sur > 12,5 mm sec	B	100	55	35		
		F	100	100	100	100	100
	IP max. sur < 0,4 mm	BF	10	10	10	10	10
	CBRe à 4 j d'immersion min	BF	40	70	80	90	100
	% CaCO ₃ min. sur < 1 mm	B	70	70	70		
		F	60	60	60	60	60
	% CaSO ₄ max .sur < 1 mm	BF	tr	tr	tr	tr	Tr
Zone III semi aride H= 100 à 350 mm de pluie par an sans exigence- de bon drainage	% < 80 µm max	BF	30	30	30	30	30
	% > 4 mm min	BF	30	30	30	30	30
	% > 12,5 mm min	BF	10	10	10	10	10
	LA max. sur > 12,5 mm sec	B	100	100	55	35	
		F	100	100	100	100	35
	IP max. sur < 0,4 mm	BF	13	13	13	13	13
	CBRe à 4 j d'immersion min	BF	40	70	80	90	100
	% CaCO ₃ min. sur < 1 mm	B	70	70	70	70	
		F	60	60	60	60	60
	% CaSO ₄ max .sur < 1 mm	BF	05	05	05	05	05
Zone IV aride H<100 mm de pluie par an sans exigences de bon drainage	Rc (MPa) min. sur < 5 mm ; (γd = 0,95. γd opm ; 48 h à 55°C)	B	2,5	03	3,5		
		F	1,5	02	2,5	03	3,5
	IP max. sur < 0,4 mm	BF	16	16	16	16	16
	CBR à 4 j d'immersion min	BF	30	60	70	80	90
	%(CaCO ₃ + CaSO ₄) min Sur < 1 mm	B	70	70	70		
		F	60	60	60	60	60
	%NaCL max . sur < 1 mm	BF	03	03	03	03	03

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

ANNEXE 6
ESSAI PROCTOR MODIFIE

ESSAI PROCTOR MODIFIE MELANGE : 70% sable - 30% argile										
Poids d'eau ajoutée	4%		6%		8%		10%		12%	
Poids total humide	7961		8011		8285		8785		8512	
Poids du moule	3800		3866		3800		4035		3866	
Poids du sol humide	4161		4351		4709		4750		4646	
Poids du sol sec	3998		4103		4355		4313		4145	
Volume du moule	2104		2104		2104		2104		2104	
Densité sèche	1.90		1.95		2.07		2.05		1.97	
N de la tare	1	2	3	4	5	6	7		S5	S6
Poids total humide	215.7	213.1	214.6	229.9	231.0	232.4	193.2		185.24	186.28
Poids total sec	208.0	205.5	203.4	217.9	215.1	216.3	177.1		167.3	168.2
Poids de la tare	19.0	18.0	18.0	18.6	18.7	18.8	18.5		18.65	18.62
Poids de l'eau	7.75	7.65	11.21	12.01	15.92	16.06	16.10		17.94	18.08
Poids du sol sec	188.97	187.45	185.36	199.25	196.35	197.54	158.6		148.65	149.58
Teneur en eau	4.10	4.08	6.05	6.03	8.11	8.13	10.15	10.11	12.07	12.09
Moyenne	4.09		6.04		8.12		10.13		12.08	

ANNEXE 7

ESSAI COMPRESSION SIMPLE

W_{opm} : 8.8

Compacité théorique	Densité	Poids du sol sec	Poids de l'eau	Poids du sol humide
98	1.86	365.42	32.16	397.57

N° d'éprouvette	Poids réel après compactage	Poids réel à l'écrasement	Teneur en eau	Diamètre éprouvette	Hauteur éprouvette	Volume éprouvette	Densité sèche à l'écrasement	Compacité à l'écrasement	lecture	Résistance en (Kg/cm²)	RC Moyenne (bars)
98%	396.42	364.31	8.81	5	10	196.25	1.86	98	0.757	3.93	3.87
98%	396.31	361.35	8.77	5	10	196.25	1.88	98	0.732	3.80	3.87

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 والتكنولوجيا
قسم الري والهندسة المدنية

ترخيص بإيداع مذكرة الماستر

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

DAHEUR Amira et - BEN LAKHDIM Affaf

الشعبة: هندسة مدنية

التخصص: هياكل

نحن الأساتذة:

الإمضاء	الصفة	الرتبة و الجامعة الأصلية أو المؤسسة	الاسم واللقب
	ممتحن	أستاذ محاضر ب (جامعة غرداية)	دموم عبد الله
 AZOUA Fatima Zahra Enseignante	رئيس	أستاذ مساعد أ (جامعة غرداية)	عزوز فاطمة الزهراء
	مؤطر	أستاذ (جامعة غرداية)	ظاهر الحاج قسمية

نرخص بإيداع النسخة النهائية لمذكرة الماستر بعنوان:

**Influence de la teneur en eau et l'énergie de compactage sur les performances
mécanique d'un mélange sable de dune - Argile**

رئيس القسم



عبد الكبير إبراهيم
رئيس قسم الري والهندسة المدنية
كلية العلوم والتكنولوجيا

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 والتكنولوجيا
قسم الري والهندسة المدنية

ترخيص بإيداع مذكرة الماستر

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

DAHEUR Amira et - BEN LAKHDIM Affaf

الشعبة: هندسة مدنية

التخصص: هياكل

نحن الأساتذة:

الإمضاء	الصفة	الرتبة و الجامعة الأصلية أو المؤسسة	الإسم واللقب
	ممتحن	أستاذ محاضر ب (جامعة غرداية)	دمدوم عبد الله
	رئيس	أستاذ مساعد أ (جامعة غرداية)	عزوز فاطمة الزهراء
	مؤطر	أستاذ (جامعة غرداية)	ظاهر الحاج قسمية

نرخص بإيداع النسخة النهائية لمذكرة الماستر بعنوان:

**Influence de la teneur en eau et l'énergie de compactage sur les performances
mécanique d'un mélange sable de dune - Argile**

رئيس القسم



عبد الكبير إبراهيم
رئيس قسم الري والهندسة المدنية
كلية العلوم والتكنولوجيا

