

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Mémoire de Master

Présenté à l'Université 8 Mai 1945 de Guelma

Faculté des Sciences et de la Technologie

Département de : Génie Civil & Hydraulique

Spécialité : Génie Civil

Option : Géotechnique.

Présenté par :

CHELIHI Marwa

**Thème : Valorisation des déchets recyclés dans les
remblais à base de sable dunaire**

Sous la direction de : Dr ; BENAMARA Fatima Zohra

Juin 2025

Remerciements

Au terme de ce travail de recherche, il m'est particulièrement agréable d'exprimer ma profonde gratitude à toutes les personnes qui m'ont soutenue, accompagnée et encouragée tout au long de ce parcours.

Je tiens à adresser mes remerciements les plus sincères à Madame la **Dr BENAMARA Fatima Zohra**, directrice de ce mémoire, pour ses orientations avisées, son accompagnement constant et la qualité de son encadrement scientifique. Son sérieux, sa disponibilité et son engagement ont largement contribué à l'aboutissement de ce travail.

J'exprime également toute ma reconnaissance à doctorante **Zaidi Lina**, pour son encadrement technique, sa bienveillance et sa patience. Ses conseils pratiques ont été d'un grand apport, notamment dans la réalisation des essais expérimentaux.

Mes remerciements s'adressent avec respect aux **membres du jury**, pour l'honneur qu'ils me font en acceptant de juger ce travail. Leurs remarques et leurs suggestions seront pour moi des repères précieux dans la suite de mon parcours académique.

Je remercie aussi Monsieur **AMRAOUI Riad** ainsi que l'ensemble de l'équipe du laboratoire **LNHC** de Belkheir, pour leur accueil chaleureux, leur accompagnement sur le terrain, et pour avoir mis à ma disposition les équipements nécessaires à la partie expérimentale.

À vous tous, je témoigne ma sincère reconnaissance.

Dédicace

Je remercie Dieu Tout-Puissant infiniment, abondamment et avec bénédiction de m'avoir accordé force, patience et volonté, et de m'avoir guidé tout au long de mon humble parcours dans cette humble œuvre, malgré les difficultés et les défis que j'ai rencontrés.

Ma mère, **H. Rajimi**, qui a été une étreinte chaleureuse et une prière indéfectible... Je vous suis infiniment reconnaissante, ma lumière lorsque les chemins s'assombrissaient et mon soutien lorsque les jours m'accablaient.

Mon père, **Abd elWahab**, qui m'a inculqué l'amour de l'engagement et du travail acharné, et m'a appris que rien n'est accompli sans détermination et patience... Merci du fond du cœur.

Mon ami, qui m'ont accompagné à chaque étape de ce parcours, par leur présence chaleureuse et leur soutien sincère.

À mes amis, qui ont allégé mon fardeau et ont été mes compagnons sincères et bienveillants... Je vous suis tous reconnaissant.

À l'équipe du laboratoire **LNHC Belkheir**, qui m'a offert un environnement propice au travail et à la recherche. Je remercie tout particulièrement la professeure **Hiba Shaddadi** pour son précieux soutien et ses conseils lors de mes visites au laboratoire, ainsi que pour son aide sincère, qui a grandement facilité mon expérience... Que Dieu la récompense abondamment.

À tous ceux qui m'ont soutenu par un mot, une prière ou un moment d'attention, je présente ce travail avec toute ma gratitude et ma reconnaissance, en guise de remerciement sincère à tous ceux qui ont contribué à cette réussite.

Résumé

Le sable dunaire, abondant dans de nombreuses régions désertiques, présente souvent des propriétés géotechniques défavorables pour les applications de construction, telles qu'une faible cohésion, une granulométrie uniforme, une faible capacité portante et une forte perméabilité. Pour pallier ces lacunes et valoriser des matériaux secondaires, l'incorporation de déchets recyclés et d'argile est une solution prometteuse pour en améliorer les performances. Ce travail s'inscrit dans cette démarche et vise à améliorer les caractéristiques physiques et mécaniques du sable dunaire. Dans ce contexte, des mélanges ont été élaborés avec différents pourcentages d'argile et poudre de céramique. Une série d'essais de caractérisation physique et mécanique a été réalisée dans le but de déterminer l'impact de ces ajouts sur le comportement du sable dunaire. Les résultats obtenus ont été comparés et interprétés pour identifier les formulations les plus performantes, en vue d'une possible application dans les remblais routiers ou les ouvrages de terrassement.

Mots clés : sable dunaire, déchets de céramique, argile, cisaillement, Proctor, stabilisation.

Abstract

Dune Sand, abundant in many desert regions, often exhibits unfavorable geotechnical properties for construction applications, such as low cohesion, uniform particle size distribution, low bearing capacity, and high permeability. To overcome these shortcomings and utilize secondary materials, the incorporation of recycled waste and clay is a promising solution for improving its performance. This work is part of this approach and aims to improve the physical and mechanical characteristics of dune sand. In this context, mixtures were developed with different percentages of clay and ceramic powder. A series of physical and mechanical characterization tests were conducted to determine the impact of these additions on the behavior of dune sand. The results obtained were compared and interpreted to identify the most efficient formulations, with a view to possible application in road embankments or earthworks.

Keywords: dune sand, ceramic waste, clay, shear, Proctor, stabilization

ملخص

يُظهر رمال الكثبان الرملية، المتوافرة بكثرة في العديد من المناطق الصحراوية، خصائص جيوتقنية غير مواتية لتطبيقات البناء، مثل ضعف التماسك، وتوزيع حجم الجسيمات المتساوي، وانخفاض قدرة التحمل، والنفاذية العالية. وللتغلب على هذه العيوب والاستفادة من المواد الثانوية، يُعدّ دمج النفايات المُعاد تدويرها والطين حلاً واعدًا لتحسين أدائها. يُعدّ هذا العمل جزءًا من هذا النهج، ويهدف إلى تحسين الخصائص الفيزيائية والميكانيكية لرمال الكثبان الرملية. في هذا السياق، طُوّرت خلأط بنسب متفاوتة من الطين ومسحوق السيراميك. وأُجريت سلسلة من اختبارات التوصيف الفيزيائية والميكانيكية لتحديد تأثير هذه الإضافات على سلوك رمال الكثبان الرملية. وقورنت النتائج وفُسرت لتحديد أكثر التركيبات فعالية، بهدف تطبيقها في سدود الطرق أو الأعمال الترابية.

الكلمات المفتاحية: رمال الكثبان الرملية، نفايات السيراميك، الطين، القص، بروكتور، التثبيت

Sommaire

Remerciement	i
Dédicaces	ii
Résumé	iii
Abstract	iv
ملخص	v
Sommaire	vi
Liste des figures	x
Liste des tableaux	xiv

Chapitre I Généralité sur les remblais sableux

INTRODUCTION GENERALE	01
I.1.Introduction	05
I.2. Définitions des sables	05
I.3. Propriétés physico-chimiques	05
I.3.1. Granulométrie	05
I.3.2. Densité	06
I.3.3. Perméabilité	06
I.3.4. Angle de frottement	06
I.4.Les types des sables	06
I.4.1. Sable fluvial	06
I.4.2.Sable marin	07
I.4.3.Sable de carrière	08
I.4.4.Sable synthétique	09
I.4.5.Sable de dune	09
I.5.Type de dune	10
I.5.1.Les avant-dunes	10
I.5.2. Les falaises dunaires	11
I.5.3. Les dunes perchées	11
I.6.Mécanismes de formation des dunes	11
I.7. Différentes formes des dunes	12
I.7.1. Dune de Barkhane	12
I.7.2. La dune parabolique	12
I.7.3. Les dunes en étoile	12
I.7.4. Les dunes transversales	13
I.7.5. Les dunes longitudinales	13
I.8.Caractéristiques des sables de dunes du Sahara Algérien	14
I.8.1. Composition chimique	14
I.8.2. Analyses minéralogiques	15
I.8.3.Propriétés physiques	15
I.9.Utilisation du sable de dunes	15
I.9.1.Diverses utilisations	16
I.9.2. Béton	16
I.9.3.Domaine routier	16
I.10.Les remblais sableux	17

I.10.1.Les type des remblais	17
I.10.1.1.Les remblais de grande hauteur	17
I.10.1.2.Les remblais courants	18
I.10.1.3.Les remblais contigus aux ouvrages	19
I.10.1.4 Utilisation en remblai	20
I.7.4. Condition d'utilisation du matériau en remblais	20
I.10.2.1.Granulométrie et composition	20
I.10.2.2.Capacité de compaction	20
I.10.2.3.Drainage	21
I.10.2.4.Stabilité et portance	21
I.10.2.5.Portance du sable de dune	21
I.10.3.Condition d'utilisation du matériau en remblais	22
I.11.Critères de performance des remblais selon GTR et AASHTO	24
I.11.1.Classification GTR	24
I.11.2.Classification AASHTO	24
I.12.Conclusion	26
Références bibliographiques du premier chapitre	27
<i>CHAPITRE II Synthèse bibliographique sur la valorisation des déchets et des sols sableux</i>	
II.1. Introduction.	31
II.2 Synthèses sur les travaux de recherches sur les mélanges sable-déchets	31
II.2.1.Fibres naturelles	31
II.2.2.Fibres synthétiques	32
II.2.3.Mélanges sable-argile	34
II.2.4.Mélanges sable -poudre de céramique	35
II.3.Valorisation des déchets recyclent dans les remblais sableux	37
II.4Conclusion	38
Références Bibliographies de deuxième chapitre	39
<i>CHAPITRE III Matériaux et méthodes</i>	
III.1.Introduction	42
III.2.Les essais de Cratérisation	42
III.2.1.Sable de dune	42
III.2.1.1.Analyse granulométrique par tamisage	42
III.2.1.2.La masse volumique	44
III.2.1.2.1.La masse volumique apparente	44
III.2.1.2.2.La masse volumique absolue	44
III.2.1.3.Essai au bleu methylene	45
III.2.2.Argile	47
III.2.2.1.Analyse granulométrique par sédimentométrie	47
III.2.2.2.Densité apparente	47

III.2.2.3.Les limites d'Atterberg	49
III.2.2.4.La masse volumique	52
III.2.2.4.1.La masse volumique apparente	52
III.2.2.4.2.La masse volumique absolue	53
III.2.2.5.Essai au bleu méthylène	53
III.2.3.Déchet de poudre de céramique	53
III.2.3.1.L'analyse granulométrique de la poudre de céramique	53
III.2.3.2.La masse volumique	54
III.2.3.2.1.La masse volumique apparente	54
III.2.3.2.2.La masse volumique absolue	55
III.2.3.3.Essai au bleu méthylène de poudre de céramique	55
III.3.Essais mécaniques	56
III.3.1.L'essai Proctor normal	56
III.3.2.Essai de cisaillement direct	57
III.3.3.Essai CBR	59
III.3.4.Essai de l'œdomètre	60
III.4.Conclusion	62
Références Bibliographies de deuxième chapitre	63
Chapitre IV Interprétation des Résultats	
IV.1.Introduction	65
IV.2.Effet de l'ajout de l'argile et poudre de céramique sur le compactage	65
IV.2.1.Sable de dune + Argile	65
IV.2.2.Sable de dune + poudre de Céramique	68
IV.2.3.Sable de dune + Argile+ Céramique	70
IV.3.Effet de l'ajout de l'argile et poudre de céramique sur la portance (CBR)	74
IV.3.1.Sable de dune + Céramique	74
IV.3.2.Sable de dune + Argile + Céramique	75
IV.4.Effet de l'ajout de l'argile et poudre de céramique sur la résistance au cisaillement	75
IV.4.1.Essai de cisaillement sur le mélange sable de dune + Argile	75
IV.4.2.Essai de cisaillement sur le mélange sable de dune + Céramique	81
IV.4.3.Essai de cisaillement sur le mélange sable de dune + Argile + Céramique	84
IV.5.Synthèse des résultats	89
IV.6.Conclusion	92
CONCLUSION GENERALE	93

Liste des figures

La Page

Figure I.1	Sable fluvial	7
Figure I.2	Sable marin	8
Figure I.3	Sable de carrière	8
Figure I.4	Sable synthétique	9
Figure I.5	Sable de dune	10
Figure I.6	Dune de Barkhane	12
Figure I.7	La dune parabolique	12
Figure I.8	Les dunes en étoile	13
Figure I.9	Les dunes transversales	13
Figure I.10	Les dunes longitudinales	14
Figure I.11	DRX du sable de dune (Gueddouda, 2011)	15
Figure I.12	Remblai de grande hauteur	18
Figure I.13	Remblais pour terrassement routier	19
Figure I.14	Les remblais contigus aux ouvrages	19
Figure I.15	Remblais des fondations pour terrains accidentés	20
Figure I.16	Tableau de classification AASHTO	26
Figure II.1	Etude comparative des sols non renforcés et renforcés de fibres de jute	31
Figure II.2	La variation de l'angle de frottement en fonction des proportions de fibre de plumes de poulet	32
Figure II.3	Variation des paramètres de résistance au cisaillement pour les sols non renforcés et renforcés de fibres de palmier éventail (FP), palmier dattier (DP) et phragmites (Ph.A)	32
Figure II.4	Résistance au cisaillement pour différents pourcentages de PET	33
Figure II.5	Relation entre la contrainte de compression et la déformation pour différents pourcentages de PET	33
Figure II.6	Relation entre les déchets plastiques PET et CBR	34
Figure II.7	Evolution d'angle de frottement en fonction des fibres de caoutchouc	34
Figure II.8	Variation de la contrainte de cisaillement de densité sèche de $1,58 \text{ g/cm}^3$ et d'un mélange de sable et différents pourcentages de poudre de céramique	35
Figure II.9	Variation de la résistance au cisaillement en fonction de l'ajout de déchets de marbre fin dans le sable	36
Figure II.10	Variation de la densité sèche maximale par rapport au pourcentage de remplacement des déchets de briques céramiques	36
Figure II.11	Variation de (a) la cohésion et (b) l'angle de frottement en fonction des pourcentages des liants	37
Figure III.1	Sable de dune	42
Figure III.2	Série de tamis et tamiseuse électrique	43
Figure III.3	Courbe granulométrique du sable de dune	43
Figure III.4	Masse volumique apparente	44
Figure III.5	Masse volumique absolue	45
Figure III.6	Essais VBS	46
Figure III.7	Essai d'Analyse granulométrique par sédimentométrie	47

Figure III.8	Courbe de sédimentométrie du sol du sol argileux	47
Figure III.9	Essai de la densité apparente	48
Figure III.10	Etats de consistance d'un sol	50
Figure III.11	Essai limites d'Atterberg	51
Figure III.12	Courbe de la limite de liquidité WL de l'argile	51
Figure III.13	Abaque de plasticité de Casa grande selon la classification L.C.P.C des sols fins	52
Figure III.14	Résultats de l'essai à la tâche	53
Figure III.15	Courbe granulométrique de la poudre de céramique	54
Figure III.16	Masse volumique apparente	55
Figure III.17	Masse volumique absolue	55
Figure III.18	Résultats de l'essai à la tâche de poudre de céramique	56
Figure III.19	Essai Proctor normal des mélanges	57
Figure III.20	Courbe Proctor de l'argile	57
Figure III.21	Appareil de cisaillement direct	57
Figure III.22	La Boîte de Casagrande	58
Figure III.23	Préparation de l'échantillon pour l'essai de cisaillement	59
Figure III.24	Appareil de CBR	60
Figure III.25	Appareil odométrique	69
Figure III.26	Essais œdométrique de l'argile naturelle	62
Figure IV.1	Courbe de compactage Proctor du sable de dune +1% d'argile	65
Figure IV.2	Courbe de compactage Proctor du sable de dune +2% d'argile	65
Figure IV.3	Courbe de compactage Proctor du sable de dune +3% d'argile	66
Figure IV.4	Courbe de compactage Proctor du sable de dune +4% d'argile	66
Figure IV.5	Courbe de compactage Proctor du sable de dune +5% d'argile	66
Figure IV.6	Courbe de γ_d en fonction des pourcentages d'argile	67
Figure IV.7	Courbe de W_{opt} en fonction des pourcentages du l'argile	67
Figure IV.8	Courbe de compactage Proctor du sable de dune +2% céramique	68
Figure IV.9	Courbe de compactage Proctor du sable de dune +4% céramique	68
Figure IV.10	Courbe de compactage Proctor du sable de dune +6% céramique	69
Figure IV.11	Courbe de compactage Proctor du sable de dune +8% céramique	69
Figure IV.12	Courbe de la densité sèche en fonction des pourcentages de céramique	70
Figure IV.13	Courbe de W_{opt} en fonction des pourcentages du céramique	70
Figure IV.14	Courbe de compactage Proctor du mélange (sable de dune + 4% argile + 2% céramique)	71
Figure IV.15	Courbe de compactage Proctor du mélange (sable de dune + 4% argile + 4% céramique)	71
Figure IV.16	Courbe de compactage Proctor du mélange (sable de dune + 4% argile + 6% céramique)	72
Figure IV.17	Courbe de compactage Proctor du mélange (sable de dune + 4% argile + 8% céramique)	72
Figure IV.18	Courbe de la densité sèche en fonction du mélange (SD + 4% Ar + Cr	73
Figure IV.19	Courbe de W_{opt} en fonction des pourcentages du mélange (SD + 4% Ar + Cr (%))	73
Figure IV.20	Indice CBR du mélange sable de dune et poudre céramique	74
Figure IV.21	Indice CBR du mélange (SD+4% argile + % Cr)	75
Figure IV.22	Rapport contrainte déformation de l'argile	76

Figure IV.23	Courbe intrinsèque de l'argile	76
Figure IV.24	Courbe contrainte déformation du sable de dune	76
Figure IV.25	Courbe intrinsèque du sable de dune	77
Figure IV.26	Courbe contrainte déformation du mélange sable de dune+ 1 % Argile	77
Figure IV.27	Courbe intrinsèque du mélange sable de dune+1% argile	77
Figure IV.28	Courbe contrainte déformation du mélange sable de dune+2% argile	78
Figure IV.29	Courbe intrinsèque du mélange sable de dune+ 2% argile	78
Figure IV.30	Rapport contrainte déformation du mélange sable de dune+ 3% argile	78
Figure IV.31	Courbe intrinsèque du mélange sable de dune+3% argile	79
Figure IV.32	Contrainte déformation du mélange sable de dune+ 4 % argile	79
Figure IV.33	Courbe intrinsèque du mélange sable de dune+ 4% argile	79
Figure IV.34	Contrainte déformation du mélange sable de dune+5% argile	80
Figure IV.35	Courbe intrinsèque du mélange sable de dune+5% argile	80
Figure IV.36	Variation des paramètres de résistance mélange sable de dune+argile	80
Figure IV.37	Courbe contrainte déformation du mélange sable de dune+2% céramique	81
Figure IV.38	Courbe intrinsèque du mélange sable de dune+2% céramique	81
Figure IV.39	Courbe contrainte déformation du mélange sable de dune+4% céramique	82
Figure IV.40	Courbe intrinsèque du mélange sable de dune+4% céramique	82
Figure IV.41	Courbe contrainte déformation du mélange sable de dune+6% céramique	82
Figure IV.42	Courbe intrinsèque du mélange sable de dune+6% céramique	83
Figure IV.43	Courbe contrainte déformation du mélange sable de dune+ 8% céramique	83
Figure IV.44	Courbe intrinsèque du mélange sable de dune+ 8% céramique	83
Figure IV.45	Variation des paramètres de résistance du mélange sable de dune+céramique	84
Figure IV.46	Courbe contrainte déformation du mélange sable de dune+ 4% argile + 2% céramique	85
Figure IV.47	Courbe intrinsèque du mélange sable de dune+4% argile+ 2% céramique	85
Figure IV.48	Courbe contrainte déformation du mélange sable de dune+ 4% argile + 4% céramique	86
Figure IV.49	Courbe intrinsèque du mélange sable de dune+4% argile+ 4% céramique	86
Figure IV.50	Courbe contrainte déformation du mélange sable de dune+ 4% argile + 6% céramique	86
Figure IV.51	Courbe intrinsèque du mélange sable de dune+4% argile+ 6% céramique	87
Figure IV.52	Courbe contrainte déformation du mélange sable de dune+ 4% argile + 8% céramique	87
Figure IV.53	Courbe intrinsèque du mélange sable de dune+4% argile+ 8% céramique	87
Figure IV.54	Variation des paramètres de résistance du mélange sable de dune + argile + céramique	88
Figure IV.55	Variation de la densité sèche des mélanges (SD+Cr)et (SD+ 4% Ar+% Cr)	89
Figure IV.56	Variation de la cohésion en fonction des mélanges (SD+Cr) et (SD+ 4% Ar+% Cr)	90

Figure IV.57	Variation de l'angle de frottement en fonction des mélanges (SD+Cr) et (SD+ 4% Ar+% Cr)	91
Figure IV.58	Variation de l'angle de la valeur CBRt en fonction des mélanges (SD+Cr) et (SD+ 4% Ar+% Cr)	91

	<u><i>Liste des Tableaux</i></u>	La Page
Tableau I.1	Analyse chimique de sable de dune de la région de Laghouat (Gueddouda, 2011)	14
Tableau I.2	Ordre de grandeur de la pente d'un remblai en fonction de sa Hauteur	18
Tableau I.3	Values des indices CBR	22
Tableau I.4	fournit les conditions d'utilisation des divers matériaux de remblai	23
Tableau I.5	Definition des classes de sols selon le système AASHTO	25
Tableau II.1	l'effet des fibres de polyester sur les paramètres de cisaillement des mélanges	33
Tableau II.2	Mélange de sable-bentonite et pourcentages de copeau de pneu	35
Tableau II.3	Mélange de sable et pourcentages de copeau de pneu	37
Tableau III.1	Les critères de courbure et d'uniformité	43
Tableau III.2	La masse volumique apparente	44
Tableau III.3	La masse volumique absolue	44
Tableau III.4	Classe de sol en fonction du VBS (NF P 94-068,1998).	46
Tableau III.5	Les résultats de l'analyse granulométrique de l'argile	47
Tableau III.6	Essai de densité apparente	49
Tableau III.7	Les caractéristiques physiques du sol	49
Tableau III.8	Relation entre le potentiel de gonflement et l'indice de plasticité	51
Tableau III.9	Indice de plasticité des sols	52
Tableau III.10	La masse volumique apparente de l'argile	52
Tableau III.11	La masse volumique absolue	53
Tableau III.12	Les critères de courbure et d'uniformité de de	54

Liste des Tableaux

	poudre de céramique	
Tableau III.13	Masse volumique apparente	54
Tableau III.14	Masse volumique absolue	55
Tableau III.15	Résultat d'essai Proctor de l'argile	57
Tableau III.16	Classement de sol en fonction de l'indice CBR	59
Tableau III.17	Compressibilités des sols	61
Tableau III.18	Classification des résultats suivant l'indice de gonflement C_g	61
Tableau IV.1	Résultats des essais Proctor normal à différents Parentages d'argile	67
Tableau IV.2	Résultats des essais Proctor normal à différents pourcentages de poudre de céramique	69
Tableau IV.3	Résultats des essais Proctor normal du mélange d'argile + poudre de céramique	72

INTRODUCTION GENERALE

Introduction Générale

La croissance rapide des besoins en infrastructures, combinée à une volonté de préserver les ressources naturelles, a conduit à l'émergence de techniques innovantes pour l'amélioration des sols, notamment par l'intégration de matériaux locaux et recyclés. Parmi ces matériaux, le sable de dune, abondant mais peu exploité en génie civil à cause de ses faibles caractéristiques mécaniques, attire l'attention des chercheurs comme base d'étude prometteuse.

La stabilisation des sols consiste à améliorer leurs performances géotechniques, telles que la portance, la résistance au cisaillement et la compressibilité afin de répondre aux exigences des projets de construction. Le sable de dune, malgré sa disponibilité, présente une faible cohésion et une granulométrie défavorable, ce qui nécessite des traitements spécifiques pour améliorer ses propriétés.

Dans cette optique, ce mémoire s'intéresse à l'amélioration du sable dunaire désertique par l'ajout de matériaux recyclés. L'étude a porté sur la formulation de mélanges contenant une proportion importante de sable de dune combinée avec de la céramique recyclée et de l'argile. Ces ajouts visent à conférer au matériau final une meilleure cohésion, à améliorer la compacité et à augmenter la résistance globale.

Une campagne expérimentale a été menée pour évaluer l'effet de ces mélanges sur les propriétés géotechniques du sable de dune. Les essais réalisés ont permis de mesurer la densité sèche maximale, la teneur en eau optimale, la résistance au cisaillement et la portance (CBR). L'objectif est de déterminer la combinaison optimale des composants et de vérifier leur potentiel en tant que solutions durables pour la stabilisation du sable dunaire.

Ce mémoire est composé de quatre chapitres suivants détaillent les aspects théoriques et pratiques de ce travail.

Le premier chapitre présente les caractéristiques des sols sableux, notamment le sable dunaire, ses limites en l'état naturel et les problématiques qu'il pose en ingénierie géotechnique.

Le deuxième chapitre présente une recherche bibliographique sur les travaux réalisés relatifs à l'amélioration des sols sableux avec des déchets recyclés

Le troisième chapitre décrit les matériaux utilisés (sable de dune, céramique broyé, argile), les proportions de mélange testées, ainsi que la méthodologie des essais en laboratoire : Proctor normal, cisaillement direct, portance CBR et œdométrique.

Le quatrième chapitre présente et interprète les résultats expérimentaux, mettant en évidence l'influence des pourcentages de chaque composant sur les performances du matériau final.

Enfin, la conclusion générale résume les principaux résultats et propose des pistes futures pour l'utilisation élargie des matériaux locaux et recyclés dans les projets de construction, particulièrement dans les régions sahariennes.

CHAPITRE I

Généralité sur les remblais sableux

I.1.Introduction

Les sables de dunes sahariennes ont fait l'objet depuis longtemps de campagnes de reconnaissance et d'identification scientifique. Dès les années 50, des campagnes d'investigation menées dans le Sahara algérien ont mis en évidence des provinces minéralogiques homogènes. Dans ces immensités désertiques, les sables sont caractérisés par une composition minéralogique et granulométrique quasi similaires. Depuis et ce à ce jour, plusieurs investigations ont été tentées dans le but de l'utilisation de ce matériau surabondant dans le domaine de la construction, notamment en Algérie et en Afrique qui ont fait l'objet de travaux de recherche [13].

I.2.Définition des sables

Le sable est une substance granulaire solide composée de minuscules particules issues de la décomposition de matériaux minéraux (principalement des roches) ou organiques (coquillages, squelettes de coraux, etc.), dont la taille varie entre 0,063 mm (limon) et 2 mm (gravier), conformément à la définition géologique des matières granulaires. Sa composition peut révéler jusqu'à 180 minéraux différents (quartz, micas, feldspaths, etc.) aussi bien que des résidus calcaires. Sur le plan géologique, le mot « sable » englobe deux dimensions : une dimension granulométrique (la taille des grains) et une dimension minéralogique (la composition minérale des grains). On nomme grain de sable une particule individuelle [11].

I.3.Propriétés physico-chimiques**I.3.1.Granulométrie**

La granulométrie désigne la répartition des tailles des grains composant le sable. Elle s'évalue par des analyses granulométriques utilisant des tamis de différentes ouvertures, permettant de classer le sable en sable fin, moyen ou grossier selon la proportion des différentes tailles de grains. Le module de finesse (MF) est un indicateur couramment utilisé pour quantifier la granularité du sable :

Sable fin : MF de 0,6 à 2,1

Sable moyen : MF de 1,5 à 2,8

Sable grossier : MF de 2,4 à 3,6

Les coefficients d'uniformité (Cu) et de courbure (Cc) permettent également de caractériser la distribution granulométrique : un sable est dit bien gradué s'il présente une large gamme de tailles de grains, et mal gradué si la majorité des grains sont de taille similaire [4].

I.3.2.Densité

La densité du sable dépend de la nature minéralogique des grains et de leur compacité. Elle se mesure généralement en deux valeurs :

Densité réelle : densité des grains eux-mêmes, typiquement autour de 2,65 pour les sables siliceux.

Masse volumique apparente : densité du sable en vrac, qui varie selon le degré de tassement et la teneur en eau : densité du sable en vrac, qui varie selon le degré de tassement et la teneur en eau.

I.3.3.Perméabilité

Le sable est caractérisé par une perméabilité élevée, c'est-à-dire une grande capacité à laisser passer l'eau à travers ses interstices. Cette propriété dépend principalement de la taille et de la forme des grains : plus les grains sont gros et arrondis, plus la perméabilité est élevée Les sables fins sont moins perméables que les sables grossiers [21].

I.3.4.Angle de frottement

Angle de frottement interne (φ) est une propriété mécanique fondamentale des sables. Il correspond à l'angle maximal que peut prendre un talus de sable sans s'écrouler, et traduit la résistance au glissement entre grains. Cet angle dépend de la forme et de la rugosité des grains : plus ils sont anguleux, plus l'angle de frottement est élevé Pour les sables, l'angle de frottement interne se situe généralement entre 29° et 50°, selon leur état (dense ou lâche) et leur granulométrie.

L'angle de frottement interne a la même valeur que le sable soit sec, humide ou saturé. La raison en est que le frottement entre les grains n'est pas altéré ou modifié par la présence d'eau et que la perméabilité des sables est suffisamment grande pour qu'aucune surpression interstitielle ne puisse s'y développer [18].

I.4.Les types des sables

On peut classer les sables en fonction de leur origine de la manière suivante

I.4.1.Sable fluvial

Le sable fluvial, ou sable de rivière, est un type de sable caractérisé par des grains souvent anguleux, peu usés et d'aspect peu brillant, qui sont déposés par les cours d'eau lors des crues ou dans les lits des rivières Sa granulométrie et sa forme évoluent le long du cours d'eau : dans les parties hautes des rivières, les grains sont très anguleux et rugueux, tandis qu'ils

deviennent progressivement plus émoussés en descendant le cours. Ce sable est souvent mal classé, c'est-à-dire que les grains ont des tailles variées et ne sont pas uniformes. Il est utilisé dans la construction, notamment pour préparer des mortiers, du béton, réaliser des enduits, fabriquer des chapes, ou encore pour jointoyer du carrelage. L'extraction de sable fluvial est une activité économique importante dans certaines régions, mais elle peut aussi avoir des impacts environnementaux négatifs, comme le comblement des lits de rivière et la dégradation des écosystèmes aquatiques [26].



Figure I.1 Sable fluvial

I.4.2. Sable marin

Le sable marin est un sable naturel issu des fonds marins, caractérisé par une composition mixte minérale et organique. Il est formé par la désagrégation des roches sous-marines et enrichi en débris coquilliers, ce qui lui confère une couleur claire, souvent beige à blanche.

Provient de l'érosion des roches sous-marines et de coquillages, ce qui lui donne une composition riche en minéraux et en fragments calcaires.

Principalement du quartz (silice) et de la calcite (carbonate de calcium), avec aussi des oxydes d'alumine, magnésium, potassium, fer, etc. La présence de fragments coquilliers lui apporte une part organique.

Grains fins et homogènes, généralement entre 0,1 et 0,5 mm, avec des grains arrondis ou légèrement émoussés par le transport marin.

Bonne capacité de drainage grâce à sa texture fine et homogène, ce qui le rend adapté à divers usages en construction et aménagement paysager.

Employé dans la construction (béton, mortier), le génie civil, l'aménagement extérieur (jardins, plages artificielles), et parfois en agriculture (maraîchage) [27].



Figure I.2 sable marin

I.4.3.Sable de carrière

Le sable de carrière provient de l'extraction et du traitement de roches massives (calcaires, siliceuses, granitiques selon les régions).

Il est souvent désigné sous l'appellation « sable 0/4 mm », correspondant à sa granulométrie, c'est-à-dire des grains allant de 0 à 4 mm

Généralement comprise entre 0 et 4 mm, avec une granulométrie contrôlée et constante

Grains concassés, donc anguleux, ce qui favorise une bonne compacité et adhérence dans les mélanges.

Utilisé principalement dans la construction pour la fabrication de béton, mortier, chapes, dalles, terrasses [28].



Figure I.3 Sable de carrière

I.4.4. Sable synthétique

Le sable synthétique est un mélange composé principalement de grains réfractaires (généralement siliceux) auxquels on ajoute de l'argile et divers additifs pour conférer au mélange les caractéristiques nécessaires à la fabrication de moules en fonderie.

Grains de silice (quartz) agglomérés par de l'argile (souvent bentonite) activée par l'eau, avec des additifs carbonés et autres éléments destinés à améliorer le comportement du sable lors de la coulée

Bonne mise en forme pour épouser les détails du modèle, conservation de la forme pendant la solidification du métal, résistance à la pression statique et dynamique du métal liquide [29].

Permet l'évacuation des gaz lors de la coulée, évitant ainsi les défauts dans la pièce moulée.

Ce qui améliore la stabilité et réduit les défauts liés à l'humidité.

Permet une séparation aisée de la pièce moulée sans endommagement.

Grains généralement anguleux et propres, obtenus par broyage et mélange mécanique contrôlé [30].



Figure I.4 Sable synthétique

I.4.5. Sable de dune

Le sable de dune désigne le matériau granulaire fin, abondant notamment dans les régions désertiques comme le Sahara, où il constitue près de 60 % de la surface. Il provient de la désagrégation des roches suivie de leur transport par le vent (déflation) et leur accumulation en monticules ou cordons appelés dunes [7].

Plus de 95 % de silice (quartz), avec une faible teneur en calcaire (1 à 2 %) et des traces d'oxydes divers.

Grains très fins, généralement entre 0,04 mm et 0,5 mm, avec une granulométrie assez uniforme (coefficient d'uniformité autour de 1,8) [12].

Grains arrondis et polis par le transport éolien, ce qui leur donne une surface mate et une bonne fluidité.

Claire, souvent blanche à légèrement jaune ou ocre, liée à la pureté en quartz et aux faibles impuretés.

Faible cohésion en surface, tendance à se dessécher rapidement, formation de pentes stables autour de 30° (angle de repos naturel du sable).

Résultant d'un processus combiné d'érosion, transport et dépôt par le vent, les dunes présentent un profil dissymétrique avec une pente douce au vent et une pente plus raide sous le vent.

Le sable de dune, du fait de son abondance et de son coût d'extraction très faible, est envisagé comme matériau d'avenir pour la construction, notamment dans les régions désertiques, bien que ses propriétés spécifiques (granulométrie fine, faible cohésion) nécessitent des adaptations techniques [31].



Figure I.5 Sable de dune

I.5. Type de dune

I.5.1. Les avant-dunes

Les avant-dunes sont des formations plus ou moins stabilisées par la végétation (comme les oyats), qui sont parallèles à la ligne côtière et liées à la plage, c'est-à-dire qu'elles échangent du sable avec cette dernière, faisant partie d'un même système sédimentaire. Elle se distingue d'une ancienne arrière-dune en processus d'érosion, et d'une dune constituée de sable provenant de la terre dans une zone où une avant-dunes dynamique ne pourrait pas apparaître.

En Espagne et en Tunisie, ces avant-dunes sont constamment reconnues comme appartenant au domaine public maritime, ce qui rend leur sauvegarde plus aisée. L'avant dune se crée grâce à la stabilisation du sable sur la partie supérieure de la plage, effectuée par des plantes pionnières appelées spasmophiles [6].

I.5.2.Les falaises dunaires

Est plutôt un profil résultant de l'érosion marine d'une dune ancienne fixée par une pelouse ou un boisement qui ont été à l'origine de la formation d'une couche d'humus ou de sol sableux [6].

I.5.3.Les dunes perchées

Au sommet d'une falaise abrupte, on peut observer des dunes élevées. Le vent apporte du sable provenant de l'estran ou, dans le cas d'une falaise dunaire, à partir du profil de pente pour les alimenter [6].

I.6.Mécanismes de formation des dunes

Les dunes se créent dans des régions où le sable est présent en grande quantité et n'est pas stabilisé par la végétation (désert, plage, lit de rivière à sec). Le vent érode et transporte le sable (déflation). Il est déplacé près du sol par saltation, puis s'accumule lorsque la force du vent diminue (versant sous le vent). Une dune a la capacité de se mouvoir par l'érosion du côté exposé au vent et par accumulation sur le flanc opposé. Une dune est une masse de sable créée par le vent et l'action des vagues, qui est par ailleurs recouverte de végétation. Les dunes sont des formations en constante évolution qui modifient leur apparence en permanence. Pour qu'une dune se forme, il est nécessaire qu'il y ait des éléments perturbateurs tels que des rochers ou des arbres qui diminuent la vitesse du vent et favorisent l'accumulation de sable déplacé selon les phases suivantes :

- déposition des particules de sable face à l'obstacle suite à l'impact, où l'on observe ensuite une phase d'amoncellement de ces particules.

- Le courant d'air se scinde en deux bras au niveau de l'obstacle, où l'air s'accumule autour de cet obstacle.

- fait grandir la longueur des bras jusqu'à ce qu'ils touchent deux éléments de nuance sable.

Et poursuivre sa croissance dans les dunes en absorbant toujours plus de grains de sable jusqu'à atteindre la taille de la dune. Pour clôturer la scène, progressivement et lorsqu'il décrit la dune qu'il a atteinte à un stade de maturité, ni Pourrait attirer davantage de grains [1].

I.7. Différentes formes des dunes

I.7.1. Dune de Barkhane

Ces dunes sont des dunes d'accumulation, formées sur un terrain plat, mouvantes, présentant une forme de croissant dont la concavité est orientée vers le vent. Elles peuvent grandir jusqu'à 300 mètres et se combiner pour créer des structures complexes [1].

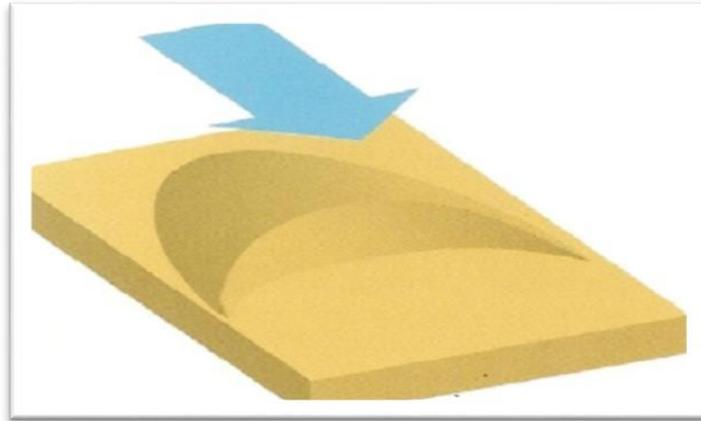


Figure I.6 Dune de Barkhane

I.7.2. La dune parabolique

Une dune asymétrique en forme de fer à cheval, concave au vent, généralement stabilisée par la végétation (Figure I.7). Ainsi, sa position relative à la direction du vent est opposée à celle de la barkhane. La dune parabolique est assez stable et ne se déplace généralement pas une fois qu'elle est constituée [1].

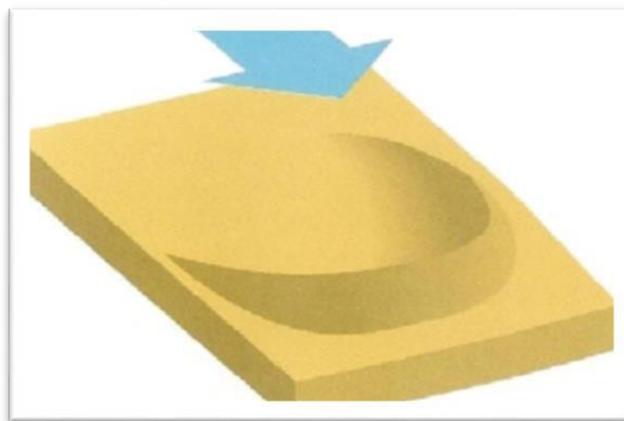


Figure I.7 La dune parabolique

I.7.3. Les dunes en étoile

Les immobiles se trouvent dans les clairières des forêts de pins et leur présence serait attribuée à un déséquilibre dans le régime des vents [16].

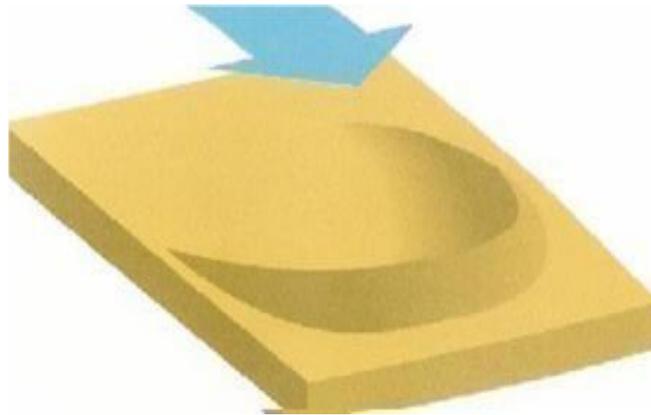


Figure I.8 Les dunes en étoile

I.7.4. Les dunes transversales

La dune du Pilat : mobiles rectilignes, orthogonaux à la direction du vent [16].

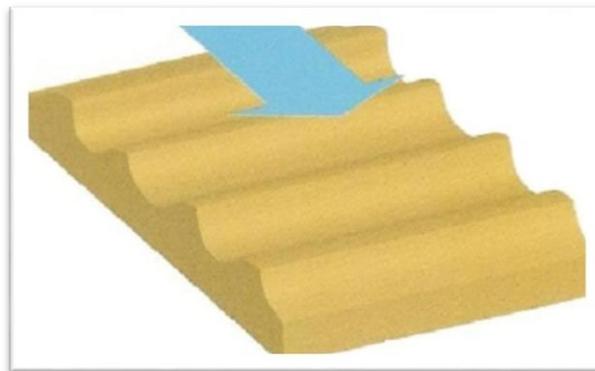


Figure I.9 Les dunes transversales

I.7.5. Les dunes longitudinales

Formées dans le sens du vent. Elles peuvent sembler changer de cap au fil de l'année. Plus précisément, elles peuvent apparaître si le vent a deux directions privilégiées. Ainsi, la dune est tendue dans la direction du vent moyen. On fait également référence aux dunes du «Seif ». Leur dynamique est infiniment plus complexe que celle des barkhanes, étant donné que leur configuration se transforme constamment avec le temps [16].

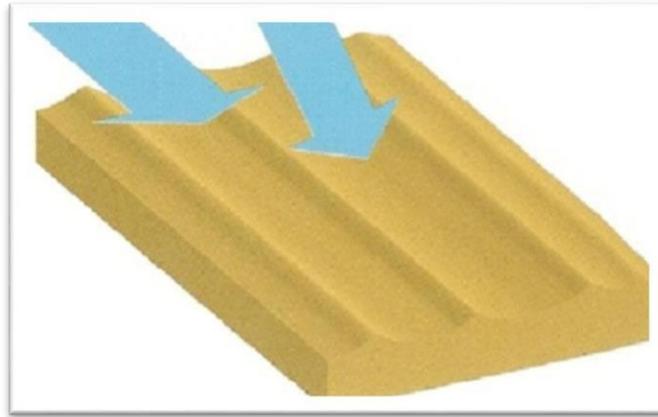


Figure I.10 Les dunes longitudinales

I.8. Caractéristiques des sables de dunes du Sahara Algérien

I.8.1. Composition chimique

Ces sables présentent une composition chimique plutôt simple : plus de 95% de silice, entre 1 et 2% de calcaire et quelques résidus d'oxydes variés. En raison de sa composition, le sable arbore une teinte blanche légèrement jaunâtre et ocre, il se dessèche et perd facilement sa cohésion en surface. (Ben Dhia, 1998). Par exemple, Gueddouda, 2011, a réalisé une recherche sur le comportement hydromécanique des sols compactés : Pour la conception d'une barrière ouvragée, il a fait appel à deux matériaux : la bentonite et le sable de dune provenant de la région de Laghouat.

Le tableau I-1 illustre les résultats de l'analyse chimique effectuée par LNHC de Djelfa (Laboratoire National d'Habitat et de Construction) [17].

*Tableau I-1 Analyse chimique de sable de dune de la région de Laghouat
(Gueddouda, 2011)*

	Symboles	Unité	Sable de dune
Résidu insoluble	SiO ₂ +Silice	%	95,87
Sulfates	SO ₃	%	0,91
Chlorures	Cl-	%	0,36
Carbonate de calcium	CaCO ₂	%	2,5
Matières organiques	MO	%	-----

I.8.2. Analyses minéralogiques

L'examen par diffraction des rayons X du sable dunaire indique la présence d'atomes de Si et O₂, ce qui correspond à l'espèce SiO₂ (silice). Par ailleurs, la proportion atomique significative de Si indique que SiO₂ est le composé dominant. Les autres valeurs de pourcentage atomique nous indiquent que le sable dunaire contient également quelques traces, en comparaison avec SiO₂, d'espèces calcaires et magnésiques ; ces résultats sont visibles dans le spectre. (Gueddouda, 2011)[9].

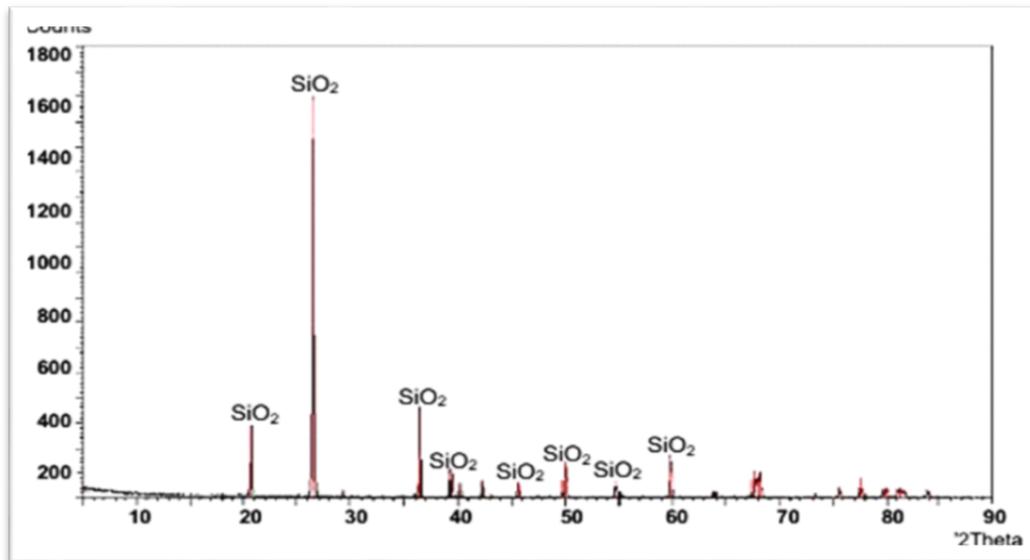


Figure I.11 DRX du sable de dune (Gueddouda, 2011)

I.8.3. Propriétés physiques

Grains très fins, allant de 0,04 mm (éléments les plus fins) à environ 0,5 mm (les plus gros), avec une granulométrie assez uniforme et mal graduée (coefficient d'uniformité autour de 1,8).

Grains arrondis et polis par transport éolien, avec une surface mate, ce qui donne une bonne fluidité au sable.

Faible cohésion en surface, tendance à se dessécher rapidement et à perdre sa cohésion, avec un angle de frottement interne autour de 30° à 35°, moyenne d'environ 6 mètres dans les zones étudiées.

Absence quasi totale d'argile, limite de liquidité faible (~25) et limite de plasticité non mesurable, ce qui indique un sable non plastique [9].

I.9.Utilisation du sable de dunes**I.9.1.Diverses utilisations**

Les sables sont un élément essentiel du processus sédimentaire et représentent une ressource très importante du point de vue économique : remblais, granulats pour béton, matériaux de construction, sables siliceux pour l'industrie. Ces derniers (appelés autrefois sables industriels) constituent l'essentiel de la matière première de l'industrie du verre, des moules, des noyaux de fonderie ; ils entrent aussi dans la fabrication des céramiques et des mortiers spéciaux. Le sable est aussi le milieu naturel où s'accumulent les minéraux lourds alluvionnaires ; ces concentrations minéralisées sableuses sont dénommées placers (un mot espagnol) et l'on y extrait de l'or, des diamants, de la cassitérite (minerai d'étain), de la magnétite (oxyde de fer), de l'ilménite (oxyde de titane et de fer), etc. Les placers d'ilménite, ou «sables noirs», sont importants économiquement pour la fabrication des pigments de la peinture blanche (gisements côtiers en Australie) et comme source du titane métal. Les sables jouent également un grand rôle comme réservoirs potentiels pour les nappes d'eau (aquifères) ou les hydrocarbures. Il importe que l'exploitation du sable, souvent anarchique, soit réglementée pour éviter de perturber de fragiles équilibres naturels : érosion des plages dont l'alimentation naturelle en sable a été coupée ; destruction à terre de la nappe phréatique, etc. [5].

I.9.2.Béton

Depuis longtemps, le sable des dunes était employé pour réaliser les travaux de remblaiement des fouilles de fondations et les travaux routiers. Cependant, son usage en tant qu'élément principal du béton ne s'est manifesté qu'à partir de l'invention du béton au sable par F. COIGNET en 1853. Cette découverte a inspiré le lancement d'une nouvelle étude qui a exploré l'éventualité de recourir au sable des dunes comme élément principal dans la construction des infrastructures en génie civil. De ce fait, plusieurs initiatives de recherche, tant en Algérie qu'à l'international, ont été initiées et mises en question [5].

I.9.3.Domaine routier

Le sable de dunes peut être employé dans la construction des routes, notamment dans les couches de roulement ou d'assise, mais généralement en mélange avec des stabilisants tels que le ciment, la chaux ou la poussière de cimenterie pour améliorer ses propriétés mécaniques. Son utilisation permet une économie significative sur le transport des matériaux, car il est disponible localement en grandes quantités, notamment dans les régions sahariennes.

Techniquement, le sable de dunes contribue à la densification des matériaux, améliore le frottement interne, la portance, et peut réduire la plasticité des sols de base, ce qui est bénéfique pour la stabilité des chaussées.

Des traitements spécifiques, comme l'ajout de laitier activé par de la chaux, augmentent la résistance à la compression, la portance et la rigidité du sable de dunes utilisé en technique routière [12].

I.10. Les remblais sableux

Ce type de remblai est constitué principalement de sable, souvent mélangé avec du gravier et une faible proportion de fines. Il s'agit d'un matériau granulaire utilisé pour combler des creux, niveler un terrain ou stabiliser une infrastructure. Ce remblai se caractérise par une bonne capacité de drainage et une excellente compaction, ce qui le rend adapté aux fondations, aux couches de base en construction routière, et aux travaux de terrassement nécessitant une surface stable et plane.

Le sable utilisé dans ces remblais est généralement propre, avec une granulométrie fine à moyenne, ce qui facilite le compactage et assure une bonne portance. Grâce à sa perméabilité, le remblai sableux limite les risques d'accumulation d'eau et de tassements liés à l'humidité, ce qui est essentiel pour la durabilité des ouvrages construits sur ce type de remblai [32].

I.10.1. Les types des remblais

I.10.1.1. Les remblais de grande hauteur

Les grands remblais ne se réduisent pas à un simple tas de couches soigneusement tassées. Leurs déformations peuvent être considérables et se modifier avec le temps. Ils sont généralement diversifiés, parfois composés de matériaux en évolution. Ils incluent des travaux transversaux et longitudinaux (Les systèmes d'assainissement des eaux). Il est aussi possible de construire des remblais de grande hauteur (Fig. I.12) en utilisant des matériaux ayant des caractéristiques moins sûres, comme les sols argileux fins [15].



Figure I.12 Remblai de grande hauteur

Selon les indications du tableau ci-joint, les pentes de talus des remblais de hauteur moyenne à grande peuvent être déterminées en fonction de la hauteur du remblai et des caractéristiques des matériaux [12].

Tableau I.2 Ordre de grandeur de la pente d'un remblai en fonction de sa hauteur

Nature du matériau	Hauteur du remblai		
	$h \leq 5 \text{ m}$	$5 \leq h \leq 10 \text{ m}$	$h \geq 10$
Sols et matériaux cohérents sensibles à l'eau ou matériaux rocheux issus de roche altérée ou argileuse mais fragmentable	Pente $\leq 2/3$	Pente $\leq 1/2$	pas de règle générale : la pente doit résulter d'une étude de stabilité
matériaux granulaires insensibles à l'eau d'origine alluvionnaire ou matériaux rocheux issus de roche tendre non argileuse	Pente $\leq 1/1$	Pente $\leq 2/3$	pas de règle générale : la pente doit résulter d'une étude de stabilité
matériaux issus de roche dure non altérée	Pente $\leq 1/1$	Pente $\leq 1/1$	Pente $\leq 2/3$ avec risberme

I.10.1.2. Les remblais courants

Les remblais standards ont pour rôle principal d'assurer la géométrie des projets selon les demandes du concepteur routier et de soutenir la structure de la chaussée.

Il est essentiel de restreindre leur développement pour assurer un niveau de service adéquat sur la route (Fig. I.13). La conception et l'implémentation de ces remblais se réalisent conformément aux prescriptions du GTR et du guide pour la conception et la réalisation des terrassements, assurant en théorie la durabilité à long terme de l'ouvrage en terre [25].



Figure I.13 Remblais pour terrassement routier

I.10.1.3 Les remblais contigus aux ouvrages

Les remblais adjacents, également connus sous le nom de remblais techniques ou blocs techniques, constituent un élément essentiel des constructions. Ils participent à la stabilité de la construction et garantissent la liaison entre les structures rigides, généralement en béton, et le remblai ou le déblai habituel. On sous-estime fréquemment leurs rôles, voire on les ignore, alors qu'ils constituent parfois le centre, donc la clé du succès de certaines œuvres.

Les remblais adjacents aux structures (Fig. I.14) ont pour rôle primordial de garantir l'articulation entre la section actuelle et les ouvrages d'art (rigide), ainsi que de soutenir tous les ouvrages inférieurs à franchir (buse hydraulique, passages pour la faune, etc.) [38].



Figure I.14 Les remblais contigus aux ouvrages

I.10.1.4 Utilisation en remblai

Le sable est fréquemment utilisé comme couche intermédiaire entre le sol naturel et la fondation, ou pour la stabilisation des sols. Il est aussi employé dans les remblais légers et les couches de forme, mais rarement seul dans les remblais nécessitant une forte résistance mécanique [36].

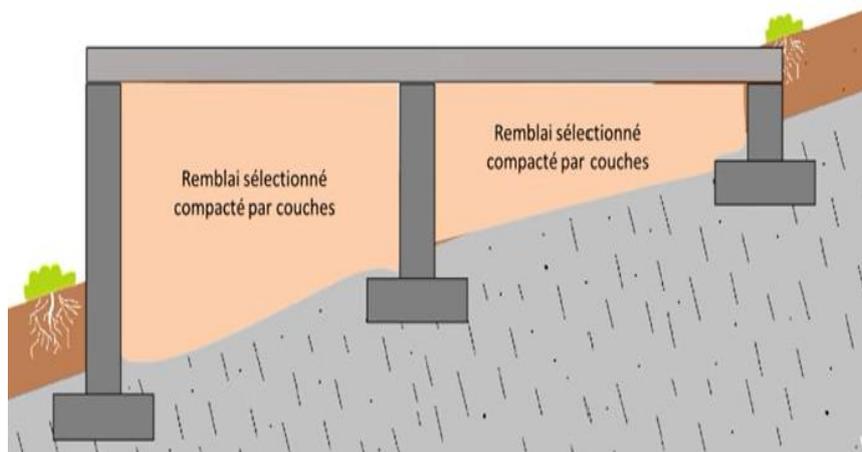


Figure I.15 Remblais des fondations pour terrains accidentés

Le sable peut être stabilisé par ajout de ciment (sable stabilisé) pour augmenter sa cohésion, sa résistance à la compression et sa durabilité, notamment dans les remblais proches des constructions [40].

I.10.2. Caractéristiques des remblais sableux

I.10.2.1. Granulométrie et composition

Le sable utilisé pour les remblais est généralement un matériau à granulométrie fine à moyenne, souvent propre ou avec peu de fines (particules inférieures à $63 \mu\text{m}$), ce qui lui confère une bonne perméabilité et un comportement peu cohésif [24].

I.10.2.2. Capacité de compaction

Le sable offre une excellente capacité de compaction, permettant d'obtenir une surface plane et régulière. Cette propriété est essentielle pour renforcer les couches de base, notamment en construction routière, et pour assurer la stabilité des ouvrages [33].

I.10.2.3.Drainage

Grâce à sa perméabilité élevée, le sable assure un bon drainage des eaux, limitant ainsi les risques de tassement liés à l'eau stagnante ou aux infiltrations. Il est particulièrement adapté aux zones à forte pluviométrie ou aux sols argileux nécessitant une couche drainante [34].

I.10.2.4.Stabilité et portance

Bien que le sable soit stable et supporte bien les charges réparties, il peut présenter des problèmes de tassement, surtout en présence d'humidité ou si la granulométrie n'est pas bien contrôlée. Par conséquent, il est souvent stabilisé ou mélangé avec d'autres matériaux (graviers, liants) pour améliorer sa portance et réduire les risques de déformation [35].

La portance est un essai de poinçonnement d'une éprouvette de sol compacté suivant des conditions de densité et de teneur en eau fixées au préalable. Il s'exprime par un chiffre CBR proportionnel à la force appliquée sur un piston s'enfonçant de 2.5 ou 5 mm dans le sol [38].

I.10.2.5.Portance du sable de dune

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

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

L'indice Portant Immédiat (IPI) exprime la valeur de l'indice CBR immédiat (sans Surcharge ni immersion), sur une éprouvette compactée à l'énergie Proctor Normal et à sa teneur en eau naturelle [25].

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

Le tableau I.5 représente les valeurs de la portance de nos échantillons. D'après ces Résultats on remarque que les indices CBR immédiat et imbibé des fines calcaires sont Supérieurs au seuil préconisé par la TRS. Les indices portants après 4 heures d'immersion, sont plus faibles que les indices immédiats. En effet, On constate, une réduction de 52% pour les fines calcaires et de 69% pour ceux du sable de dune [16].

Tableau I.3 Valeurs des indices CBR

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

I.10.3. Condition d'utilisation du matériau en remblais

La réalisation d'un remblai implique de synchroniser les étapes suivantes : l'extraction, le chargement, le transport, le déchargement, la mise en place en couches fines et le compactage. Il faut disposer le matériau en couches lors du remblayage. Un des défis constants lors de la mise en remblai est d'ajuster l'épaisseur de la couche en fonction des caractéristiques du matériau, de son niveau d'humidité et des capacités de la catégorie du compacteur employé. La décision de réutiliser un sol en remblai d'une certaine hauteur se fait en se basant sur les directives du GTR. Il faut identifier le sol afin de déterminer sa classe en fonction de sa nature et de son état hydrique, puis on identifie la classe du compacteur utilisé.

Ces deux informations aident à identifier les aspects opérationnels liés à son utilisation, notamment s'il est nécessaire d'intervenir sur :

- Ses conditions d'extraction E ;
- Sa granularité G ;
- Son contenu en eau w ;
- Son traitement T ;
- Et les modalités de réglage R ;
- De compactage

Tableau I.4 fournit les conditions d'utilisation des divers matériaux de remblai [15].

Rubrique	Code	Conditions d'utilisation
E Extraction	0	Pas de condition particulière à recommander
	1	Extraction en couches (0,1 à 0,3m)
	2	Extraction frontale (pour un front de taille > 1 à 2m)
G Action sur la granularité	0	Pas de condition particulière à recommander
	1	Elimination des éléments > 800mm
	2	Elimination des éléments > 250 mm pour traitement
	3	Fragmentation complémentaire après extraction
W Action sur la teneur en eau	0	Pas de condition particulière à recommander
	1	Réduction de la teneur en eau par aération
	2	Essorage par mise en dépôt provisoire
	3	Arrosage pour maintien de l'état
	4	Humidification pour changer d'état
T Traitement	0	Pas de condition particulière à recommander
	1	Traitement avec un réactif ou un additif adaptés
	2	Traitement à la chaux seule
R Régalage	0	Pas de condition particulière à recommander
	1	Couches minces (20 à 30 cm)
	2	Couches moyennes (30 à 50 cm)
C Compactage	1	Compactage intense
	2	Compactage moyen
	3	Compactage faible
H Hauteur des remblais	0	Pas de condition particulière à recommander
	1	Remblai de hauteur faible ($\leq 5m$)
	2	Remblai de hauteur moyenne ($\leq 10m$)

I.11.Critères de performance des remblais selon GTR et AASHTO**I.11.1.Classification GTR**

La détermination de la classe géotechnique du sol en place, s'effectue selon la norme NF P 11-300 à partir d'essais de laboratoire pratiqués sur un prélèvement représentatif de Ce dernier effectué sur site dans des conditions adéquates.

A partir de ce classement défini dans le GTR (Guide Technique Routier), quatre grandes classes géotechniques de sol naturel sont distinguées présentant des Propriétés spécifiques ainsi que des comportements mécaniques et gélifs prévisibles dans le temps :

Classe **A** : les sols fins. Cette classe contient quatre sous classes : **A1, A2, A3, A4** ;

Classe **B** : les sols sableux et graveleux avec fines. Cette classe contient six sous

Classes : **B1, B2, B3, B4, B5, B6** ;

Classe **C** : les sols comportant des fines et des gros éléments. Cette classe contient

Deux sous classes : **C1, C2** qui s'associent pour la fraction 0/50 mm aux classes

A1, A2, A3, A4 ou B1, B2, B3, B4, B5, B6 ;

Classe **D** : les sols insensibles à l'eau. Cette classe contient trois sous classes :

D1, D2, D3.

L'ensemble de ces matériaux se retrouve le plus souvent dans la réalisation d'une Chaussée neuve ou d'un élargissement, notamment au niveau de la partie supérieure des terrassements (PST). (P, Mars 2017)[2].

I.11.2.Classification AASHTO

La classification AASHTO (American Association of States Highway and Transportation Officials) est une version plus sophistiquée de la classification de Terzaghi (1929). Son utilisation se retrouve principalement en géotechnique routière.

La fraction de sol identifiée par l'AASHTO est présentée dans le tableau ci-dessous. Même si les blocs doivent être écartés des échantillons à classer, il est tout de même important de

mentionner leur proportion relative. Si la valeur de I_p est inférieure à 10, on considère les particules comme siliceuses, et si elle dépasse 10, elles sont qualifiées d'argileuses.

Tableau I.5 Définition des classes de sols selon le système AASHTO

Fraction de sol	Echelle de grandeur
Bloc	Plus de 75 mm
Gravier	De 75 mm à 2.0 mm (tamis n°10)
Sable grossier	De 2.0 mm (tamis n°40) à 0.425 mm (tamis n°40)
Sable fin	De 0.425 mm (tamis n°40) à 0.075 mm (tamis n°200)
Silt et /ou argile	Moins de 0.075 mm (tamis n°200)

Dans le système de classification AASHTO, on trouve huit groupes de sol (A-1 à A-8) et quelque sous-groupe. Les seuls essais qu'il est nécessaire d'effectuer sont l'analyse granulométrique et les essais de limites de consistance. Le tableau ci-dessous fournit la classification de l'AASHTO utilisée de nos jours.

Les sols grenus sont classés dans catégories A-1 à A-3 de la catégorie A-1 sont bien étalés alors que ceux de la catégorie A-3 sont des sables propres et à granulométrie uniforme. Quant à ceux de la catégorie A-2, ils contiennent un pourcentage significatif de particules fines (jusqu'à 35 % de particules passant le tamis n° 200). Dans les catégories A-4 à A-7, On trouve des limons et des argiles ; leur classification repose sur les limites d'Atterberg. Les zones contenant les valeurs de W_l et d' I_p proposent à chacun des groupes A-4 à A-7 et des sous- groupes d'A-2. On classe généralement les sols fortement organiques (les tourbes, par exemple) dans le groupe A-8. Comme dans système USCS, les sols A-8 sont classés d'après un examen visuel [3].

General Classification	Granular materials (35% or less passing No. 200 Sieve (0.075 mm))							Silt-clay Materials More than 35% passing No. 200 Sieve (0.075 mm)			
	A-1		A-3	A-2				A-4	A-5	A-6	A-7
	A-1-a	A-1-b		A-2-4	A-2-5	A-2-6	A-2-7				A-7-5 A-7-6
(a) Sieve Analysis: Percent Passing											
(i) 2.00 mm (No. 10)	50 max										
(ii) 0.425 mm (No. 40)	30 max	50 max	51 min								
(iii) 0.075 mm (No. 200)	15 max	25 max	10 max	35 max	35 max	35 max	35 max	36 min	36 min	36 min	36 min
(b) Characteristics of fraction passing 0.425 mm (No. 40)											
(i) Liquid limit				40 max	41 min	40 max	41 min	40 max	41 min	40 max	41 min
(ii) Plasticity index	6 max		N.P.	10 max	10 max	11 min	11 min	10 max	10 max	11 min	11 min*
(c) Usual types of significant Constituent materials	Stone Fragments Gravel and sand		Fine Sand	Silty or Clayey Gravel Sand				Silty Soils		Clayey Soils	
(d) General rating as subgrade.	Excellent to Good							Fair to Poor			

* If plasticity index is equal to or less than (liquid Limit-30), the soil is A-7-5 (i.e. PL > 30%)
If plasticity index is greater than (Liquid Limit-30), the soil is A-7-6 (i.e. PL < 30%)

Figure I.16 Tableau de classification AASHTO

I.12. Conclusion

Les remblais de sable sont une option technique performante pour divers projets de construction, du moment qu'on comprend bien leurs propriétés et qu'on se conforme aux normes actuelles. La performance d'un matériau de remblai est directement influencée par sa provenance géologique, sa granulométrie, sa perméabilité et sa résistance au cisaillement. Bien qu'ils présentent de nombreux atouts, leur faible cohésion et leur sensibilité à certaines conditions, telles que la saturation en eau, imposent des restrictions d'utilisation et des mesures spécifiques lors de leur application. L'expertise en matière d'exigences mécaniques, établies notamment par le GTR et les normes AASHTO, assure la qualité, la longévité et la sûreté des structures érigées sur ou avec des remblais de sable. Ce cadre conceptuel établit les fondations indispensables pour traiter les éléments expérimentaux et pratiques dans les chapitres à venir.

Références bibliographiques du premier chapitre

[1] Abdallah, B. M. (2022). Le sable de dunes : Etude de la résistance au cisaillement (Mémoire de Master). Adrar. Sciences de la Technologie.

- [2] Abdeslam, G. (2023). Influence de trois types de géotextiles sur l'indice CBR d'un mélange optimal de sable de dune et l'argile de Bouhraoua de la wilaya de Ghardaïa dans le domaine routier (Mémoire de Master). Ghardaïa: Génie civil.
- [3] Alia, S. E. (2021). Facteurs influençant la capacité portante des fondations renforcées par géo synthétiques (approche expérimentale et modélisation numérique).(Mémoire de Master). Guelma: Génie Civil & Hydraulique.
- [4] Amine, B. Y. (2017). caractérisation des sols allégés avec les résidus de bois (Mémoire de Master). Guelma: Génie Civil & Hydraulique.
- [5] Azouz, H. (n.d.). Étude des bétons à base des sables de dune (Mémoire de Magistère).
- [6] Balhachemi, S., & Berrafa. (2017). La valorisation de sable de dune (sable de Naama) durabilité et comportement mécanique.(Mémoire de magister) en génie civil, centre universitaire Belhadj Bouchaïb d'Ain Témouchent.
- [7] Bellabidi, A. (n.d.). Caractérisation physico-chimique de sable des dunes dans les régions Ouargla, Touggourt et El Oued (Thèse de doctorat, Université Kasdi Merbah Ouargla).
- [8] Ben Dhia, M. H. (1998). Quelques particularités de l'utilisation du sable de dune en construction routière en milieu saharien. Bulletin des laboratoires des ponts et chaussées.
- [9] Ben Moussa, I. (2019). Étude des caractéristiques physico-chimiques du sable des dunes (cas sites d'Adrar) (Thèse de doctorat). Université Ahmed Draïa-Adrar.
- [10] Chevalier, P., & Van den Schrieck, J.-C. (2011, août). Le sable naturel en Région Wallonne.
- [11] Cylia, M. K. (2021). Influence de la nature du sable sur les caractéristiques physiques et mécaniques d'une argile (Mémoire de Master). Tizi-Ouzou: Génie civil.
- [12] Dhia, M. B. (1997). Quelques particularités de l'utilisation du sable de dune en construction routière en milieu saharien.
- [13] ETTahir, A. K. (2020). Caractérisation d'un mortier à base de sable de dune avec caoutchouc (Mémoire de Master). Guelma: Génie Civil & Hydraulique.
- [14] Hakim, B. O. (2015). Utilisation du sable de dunes en technique routière : étude bibliographique (Mémoire de Master). Biskra: Génie civil et hydraulique.
- [15] Ismail, B. A. (2022). Étude de la stabilité d'un remblai routier de sol sableux renforcé par des matériaux recyclés (Mémoire de Master). Guelma: Génie Civil & Hydraulique.

- [16] Khadidja, K. (2016). Caractérisation mécanique d'un mélange : Tuf + sable de dunes. Adrar (Mémoire de Master). Sciences et Technologie.
- [17] Khengaoui, S. (2013). Valorisation du sable de dunes en couche de roulement sable-bitume (Mémoire de Magister) Université Kasdi Merbah de Ouargla.
- [18] Lérau, J. (2006). Cours Chapitres 4. Sciences et Technologies Pour l'Ingénieur.
- [19] Noussaiba, B. S. (2023). Influence de l'ajout des fines calcaire sur certaines caractéristiques (sec) géotechnique du sable de dune (application dans le domaine de la géotechnique routière saharienne) (Mémoire de Master). Ghardaïa: Génie Civil.
- [20] Philippe Chevalier, J.-C. Van den Schrieck. (2011). Le sable naturel en Région Wallonne.
- [21] Rezika, K. (2015). Étude expérimentale et analytique de la perméabilité des sables stratifiés (Mémoire de Master). Tizi-Ouzou: Génie civil.
- [22] Samira, T. (2022). Modélisation numérique des colonnes ballastées recouvertes de géosynthétiques à couches horizontales supportant le remblai sur les sols mous (Mémoire de Master). Biskra: Génie Civil.
- [23] Sylia, S. E. (2020). Étude expérimentale de mortier à hautes performances armé de textiles (Mémoire de Master). Tizi-Ouzou: Génie civil.
- [24] Terrassements Routiers, G. G. (1992). Réalisation des remblais et des couches de forme. Paris: Bagnaux.
- [25] Wone, M. (1995). Contribution à la modélisation du comportement hydrique et mécanique des remblais routiers en matériaux fins (Thèse de doctorat). École Nationale des Ponts et Chaussées, Université Paris.
- [26] <https://www.lacaillasserie.fr/le-sable-de-riviere/>
- [27] <https://fr.vikidia.org/wiki/Sable>
- [28] <https://kingmatériaux.com/gestion-des-carrieres-de-granulat/>
- [29] [https://fr.wikipedia.org/wiki/Sable_\(fonderie\)](https://fr.wikipedia.org/wiki/Sable_(fonderie))
- [30] <https://vitrinelinguistique.oqlf.gouv.qc.ca/fiche-gdt/fiche/17026069/sable-synthetique>
- [31] <https://www.aquaportail.com/dictionnaire/definition/11830/dune-de-sable>
- [32] <https://www.aquaportail.com/dictionnaire/definition/6955/remblai>

[33] <https://www.koncrete.fr/blog/quel-materiau-pour-un-remblai>

[34] <https://geotechniquehse.com/remblayage-fondation/>

[35] https://batiments.wallonie.be/files/unzip/html_CCTB_01.09/Content/11-32-1c-Remblais-en-sables-stabilises.html

[36] <https://geotechniquehse.com/remblayage-fondation/>

[37] https://batiments.wallonie.be/files/unzip/html_CCTB_01.09/Content/11-32-1c-Remblais-en-sables-stabilises.html

[38] Http://wiklimat.developpementdurable.gouv.fr/index.php/Wikigeotech:Remblais_contigus

[39] https://arvorgeo.fr/cariboost_files/Probl_C3_A9matiques_20remblais_20sols_20compressibles_20du_2023_01_11.pdf.

[40] https://batiments.wallonie.be/files/unzip/html_CCTB_01.09/Content/11-32-1c-Remblais-en-sables-stabilises.html

CHAPITRE II

Synthèse bibliographique sur la valorisation des déchets et des sols sableux

II.1.Introduction

Ce chapitre propose une synthèse des recherches récentes sur la valorisation des sables et des déchets pour la stabilisation des sols dans le domaine de la construction, en particulier pour les remblais sableux. Face aux défis environnementaux et économiques liés à l'exploitation des granulats naturels, l'utilisation de matériaux recyclés (fibres naturelles, plastiques, argile, poudre de céramique, caoutchouc, etc.) apparaît comme une solution prometteuse pour améliorer les propriétés mécaniques des sols tout en réduisant l'impact écologique.

II.2.Synthèses sur les travaux de recherches sur les mélanges sable-déchets

II.2.1.Fibres naturelles

Les études récentes mettent en évidence le potentiel des fibres naturelles pour améliorer les propriétés mécaniques des sols sableux. Islam et al. (2021) ont démontré que l'incorporation de fibres de jute à 2% permet d'optimiser l'angle de frottement interne, tandis qu'un dosage de 1% donne la densité sèche maximale au l'essai Proctor [21]. Dans une approche similaire, Rose et al. (2022) ont obtenu des gains de résistance allant jusqu'à 43% avec des fibres de plumes de poulet, avec des dosages optimaux variant selon la contrainte appliquée (1-2%) [1]. Ces résultats sont complétés par les travaux d'Alhakim et al. (2022) sur trois types de fibres végétales (palmier éventail FP, palmier dattier DP et phragmites Ph.A), montrant des améliorations spectaculaires de la cohésion et de l'angle de frottement avec des dosages faibles (0,5-2%) [2].

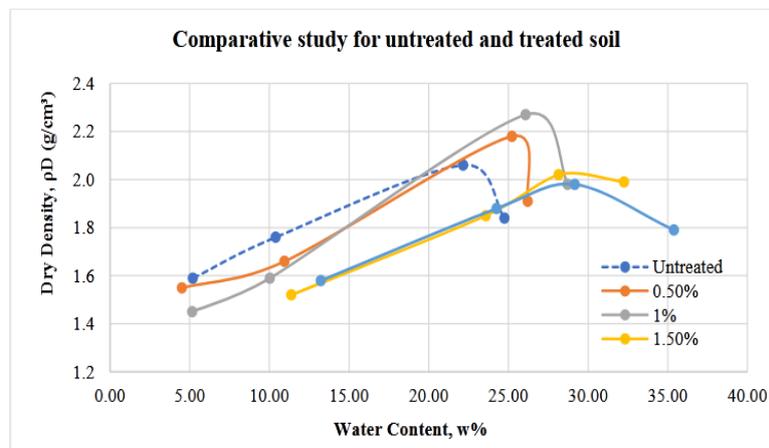


Figure II.1 Etude comparative des sols non renforcés et renforcés de fibres de jute [21]

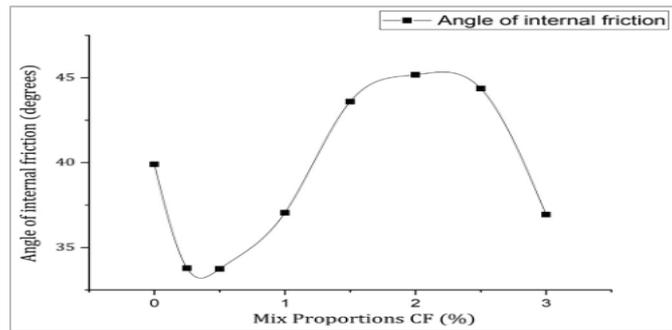


Figure II.2 La variation de l'angle de frottement en fonction des proportions de fibre de plumes de poulet [3]

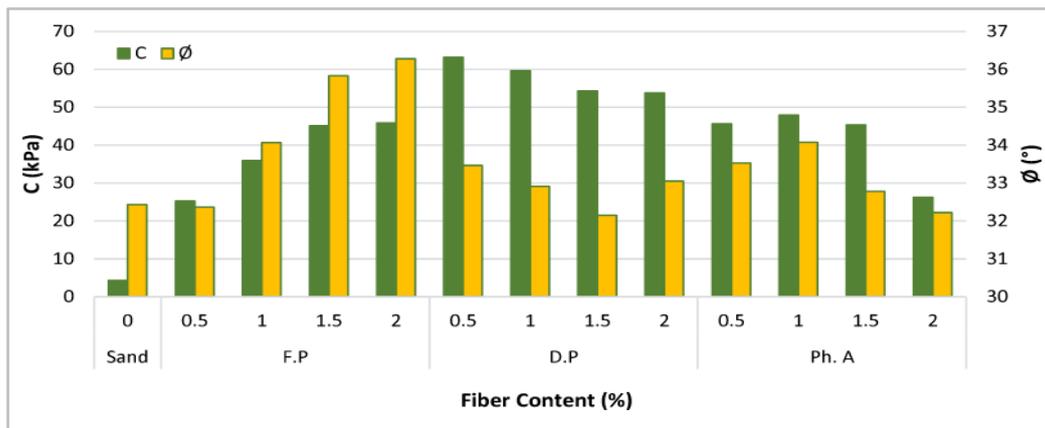


Figure II.3 Variation des paramètres de résistance au cisaillement pour les sols non renforcés et renforcés de fibres de palmier éventail (FP), palmier dattier (DP) et phragmites (Ph.A) [2]

II.2.2. Fibres synthétiques

Les études menées entre 2016 et 2024 révèlent l'efficacité des matériaux synthétiques et plastiques recyclés pour améliorer les propriétés mécaniques des sols. Aouali et al. (2019) ont démontré qu'un faible pourcentage (0,25%) de fibres de polyester améliore significativement la résistance au cisaillement du sable limoneux, particulièrement en conditions humides, tout en réduisant les variations volumétriques [4].

Plusieurs recherches ont exploré l'utilisation de déchets plastiques : Gangadhara (2016) a identifié un dosage optimal de 0,7% de fibres plastiques permettant d'augmenter la résistance au cisaillement à 72 kPa [9]. Alshkane (2017) a établi qu'e 1% de fibres PET augmente simultanément la cohésion et l'angle de frottement des sols sableux [3], tandis que Kumari et Naidu (2018) ont observé une amélioration de l'angle de frottement des sols sableux mélangés avec 8% de fibre de PET [13]. Les travaux récents de Suthar et al. (2024) confirment ces résultats avec des déchets PET (5-15%), montrant des gains remarquables sur l'angle de frottement et l'indice CBR [23]. Enfin, Liu et al. (2018) ont développé une approche innovante combinant polymère organique et fibres de verre, améliorant simultanément la cohésion et la résistance à la traction sans affecter l'angle de frottement [14].

Bouazza et Haci (2020) ont établi qu'un dosage de 0,6% de fibres de verre constituait le seuil optimal pour renforcer le sable de Chlef, entraînant une augmentation de cohésion au détriment de l'angle de frottement interne [7]. Bouazza et Boukenine (2022), ayant comparé différents types de fibres, ont établi que les fibres de verre atteignent leur efficacité maximale

à 0,5%, tandis que les fibres de polypropylène et de chanvre l'atteignent à 0,75%. Leurs résultats démontrent que l'incorporation de fibres (naturelles ou synthétiques) améliore la résistance au cisaillement ainsi que les propriétés mécaniques intrinsèques notamment la cohésion et l'angle de frottement interne du sable renforcé comparativement au sable non renforcé [8].

Merzoug (2016) a développé une approche innovante de renforcement des sols sableux par valorisation de déchets, démontrant que l'incorporation de fibres caoutchouteuses (1,25-1,5%) a amélioré simultanément la résistance au cisaillement et la ductilité des sables dunaires [15].

Tableau II.1 l'effet des fibres de polyester sur les paramètres de cisaillement des mélanges [4]

Sable+% Fibres de Polyester	Cohésion C (kPa)	Angle de frottement (ϕ) (°)
0%	8	40
0.1%	10.5	37.5
0.25%	13	32.5
0.3%	15.8	30.8
0.5%	18	30

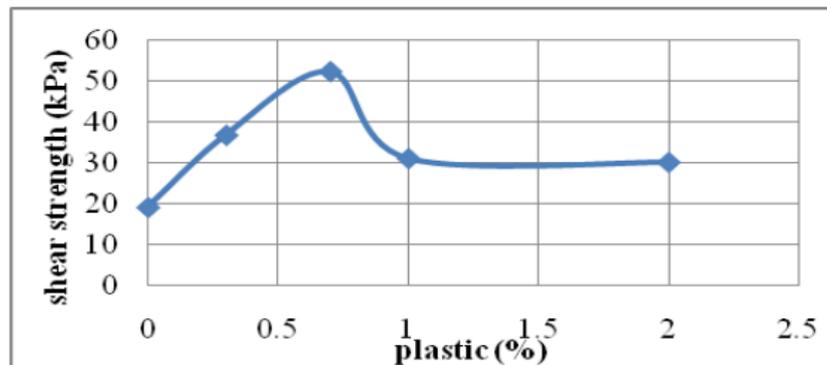


Figure II.4 Résistance au cisaillement pour différents pourcentages de PET [9]

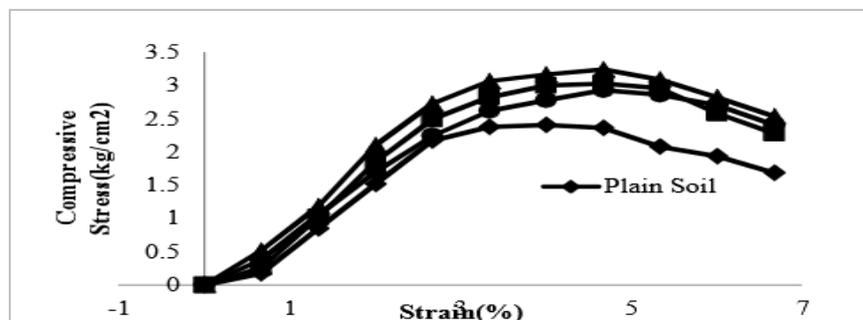


Figure II.5 Relation entre la contrainte de compression et la déformation pour différents pourcentages de PET [13]

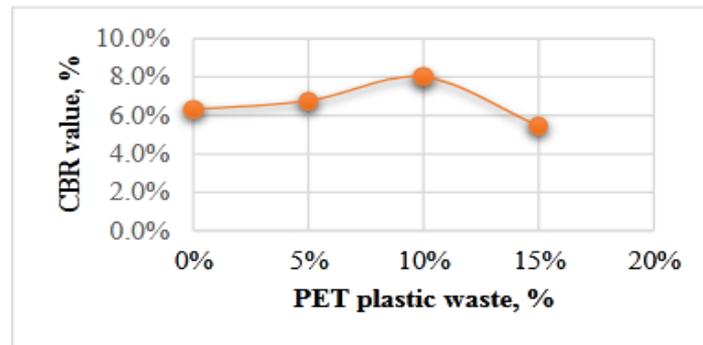


Figure II.6 Relation entre les déchets plastiques PET et CBR [23]

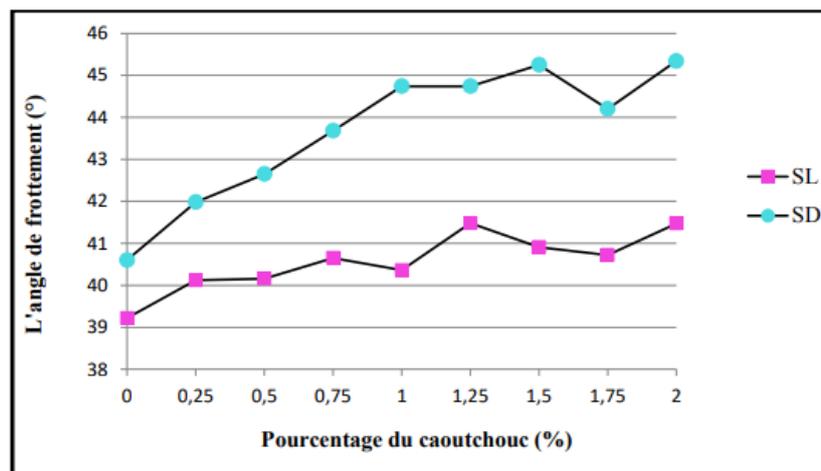


Figure II.7 Evolution d'angle de frottement en fonction des fibres de caoutchouc [15]

II.2.3. Mélanges sable-argile

Les études menées ont démontré l'efficacité de différents additifs, notamment la bentonite, pour améliorer les propriétés des sols sableux. Les travaux de Halila et Tessier (2006) ont révélé qu'une teneur de 12% en bentonite permettait d'optimiser la rétention hydrique tout en préservant la porosité sèche initiale du matériau [11]. Bani Baker et al., (2022) ont montré qu'un ajout de 3% de bentonite combiné à 10,3% d'eau augmentait significativement la résistance au cisaillement du sable, tout en conservant sa granulométrie naturelle [6]. Parallèlement, d'autres approches complémentaires ont été explorées. Mukherjee et Mishra (2021) ont démontré que l'incorporation de 10-15% de copeaux de pneus dans des mélanges sable-bentonite améliorait les propriétés mécaniques tout en réduisant notablement le temps de consolidation [17]. Plus récemment, Ghazali Abdessalam (2023) a mis en évidence les performances d'un mélange de sable de dune contenant 30% d'argile locale, montrant une amélioration conjointe de la portance et de la stabilité hydrique [10].

Tableau II.2 Mélange de sable-bentonite et pourcentages de copeau de pneu [17]

Sable + % Copeaux de pneus	γ_d max (kN/m ³)	Cohésion C (kPa)	Angle de frottement (ϕ) (°)
0%	16.87	15	21
5%	16.62	18.2	23.8
10%	15.50	21.9	24.9
15%	15.87	24.2	24.2

II.2.4. Mélanges sable -poudre de céramique

Plusieurs études ont démontré le potentiel des déchets industriels pour améliorer les propriétés des sols sableux. Panwar et Ameta (2013) ont été les premiers à montrer que les déchets de carreaux céramiques pouvaient renforcer significativement les sables fins pour des applications en remblais [18]. Qureshi et al. (2022) ont ensuite révélé qu'une incorporation de 20% de poudre de marbre optimisait la densité et la résistance au cisaillement des sables dunaires [19]. La même année, Arias-Trujillo et al. (2022) ont prouvé que 30% de déchets de briques céramiques triplait la portance (CBR) des sables éoliens de Djeddah [5]. Enfin, Kasehchi et al. (2024) ont obtenu des résultats remarquables avec un mélange de 15% de poudre céramique et d'activateur alcalin, multipliant par 27 la résistance à la compression du sable après 28 jours de cure [12]. L'étude de Mochten et Ben Ghedier (2023) a validé l'efficacité d'un mélange 60 % sable de dune et 40 % de fines calcaires pour des applications routières en zone saharienne [16].

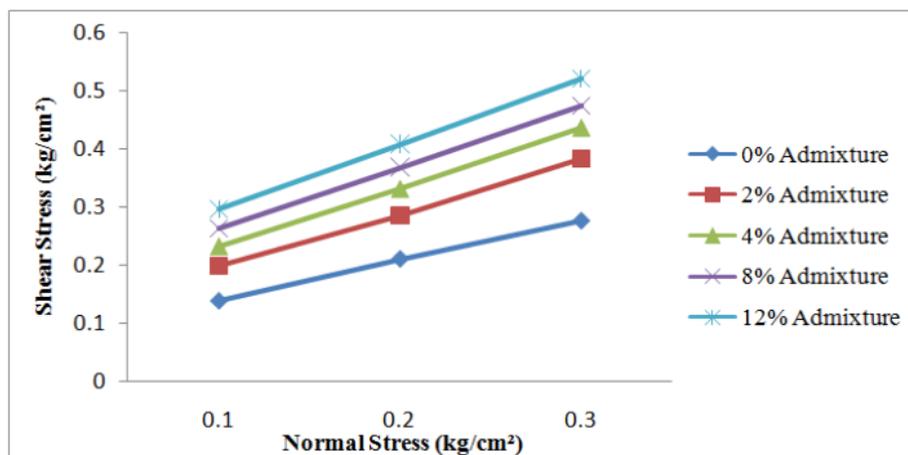


Figure II.9 Variation de la contrainte de cisaillement de densité sèche de 1,58 g/cm³ et d'un mélange de sable et différents pourcentages de poudre de céramique [18]

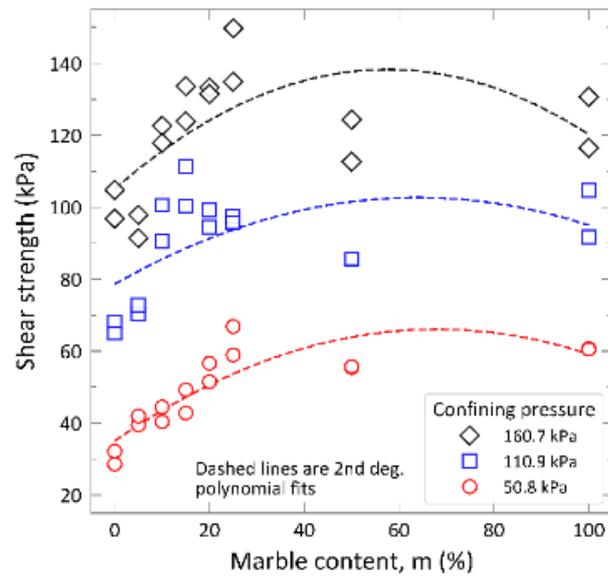


Figure II.8 Variation de la résistance au cisaillement en fonction de l'ajout de déchets de marbre fin dans le sable [19]

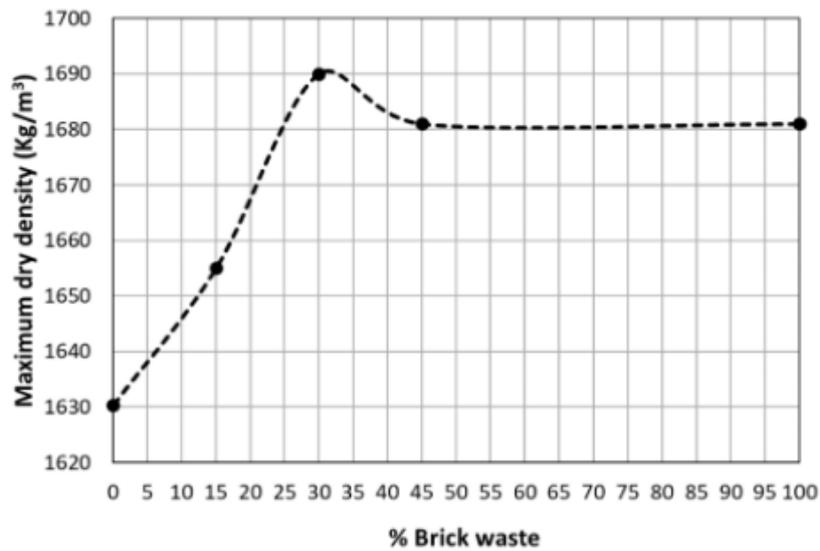


Figure II.10 Variation de la densité sèche maximale par rapport au pourcentage de remplacement des déchets de briques céramiques [5]

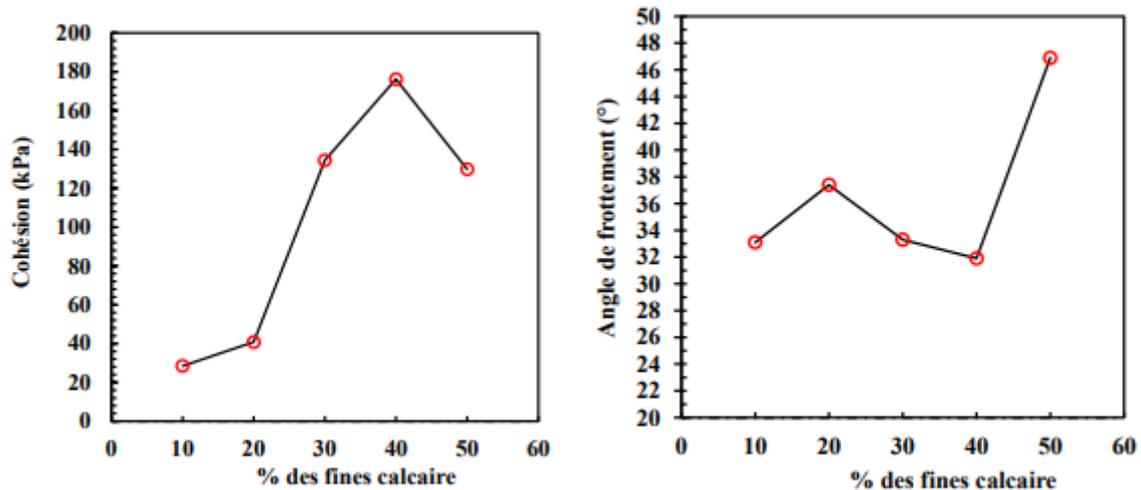


Figure II.11 Variation de (a) la cohésion et (b) l'angle de frottement en fonction des pourcentages des liants [16]

II.3. Valorisation des déchets recyclés dans les remblais sableux

Le sable a traditionnellement été employé dans divers travaux de génie civil, mais des recherches récentes explorent son amélioration par ajout de matériaux recyclés. Reddy et Krishna (2015) ont démontré que les mélanges sable-copeaux de pneus (STC) réduisent considérablement (50-60%) les déplacements horizontaux et pressions latérales dans les murs de soutènement par rapport au sable seul, avec des performances optimales pour des teneurs variant entre 10% et 50% de caoutchouc [20]. Ces résultats ont été confirmés et affinés par Abdul Jalil et al. (2024), qui ont identifié un dosage optimal de 25% de caoutchouc permettant d'atteindre des contraintes de cisaillement maximales tout en maintenant la stabilité mécanique du remblai [22]. Ces deux études soulignent les avantages techniques (réduction des pressions, maintien de la résistance) et environnementaux (valorisation de déchets, légèreté) de ces mélanges innovants, offrant des solutions prometteuses pour les travaux de soutènement et les remblais légers.

Tableau II.3 Mélange de sable et pourcentages de copeau de pneu [20]

sable +% copeau de pneu	G _s	γ_d max (kN/m ³)	Angle de frottement (ϕ) (°)
0%	2.62		48
10%	2.25	14.62	51
20%	1.94	14.12	52
30%	1.82	13.17	56
40%	1.71	12.29	51
50%	1.53	10.42	44

II.4. Conclusion

Les recherches analysées révèlent que l'amélioration des sols sableux peut être efficacement réalisée par diverses approches - ajouts d'argile (3-30%), fibres naturelles (0,5-2%) ou déchets recyclés (0,25-50%) - offrant des solutions techniques performantes tout en répondant aux enjeux environnementaux. Ces méthodes permettent d'améliorer significativement les propriétés mécaniques (résistance au cisaillement, portance) et hydriques (rétention d'eau, stabilité), avec des dosages optimaux désormais bien établis pour chaque matériau. L'évolution vers des techniques durables combinant valorisation de déchets et performance géotechnique ouvre des perspectives prometteuses pour la construction en zones arides et la gestion écologique des sols, marquant ainsi une avancée majeure en géotechnique environnementale.

Références Bibliographiques de deuxième chapitre

- [1] Adlin Rose, R., Subramanian, M., Elakkiyadasan, R., Siva, M., & Manoj Kumar, P. (2022). Strength characteristics of sand modified with keratinous chicken feather fiber. *Materials Today: Proceedings*, 62, 3935–3939.
- [2] Alhakim, G., Jaber, L., Baalbaki, O., & Barraji, F. (2023). Utilization of Fan Palm, Date Palm, and Phragmites Australis fibers for improving the mechanical behavior of sandy soil. *Geomechanics for Energy and the Environment*, 33, 100427.
- [3] Alshkane, Y. M. (2017). Reinforcement of sandy soil using plastic fibres made from waste plastic bottles. *Iraqi Journal of Civil Engineering*, 11(2), 45–54.
- [4] Aouali, N., Benessalah, I., Arab, A., Ali, B., & Abed, M. (2019). Shear strength response of fibre reinforced Chlef (Algeria) silty sand: Laboratory study. *Geotechnical and Geological Engineering*, 37(2), 1047–1057
- [5] Arias-Trujillo, J., Matías-Sánchez, A., Cantero, B., & López-Querol, S. (2023). Mechanical stabilization of aeolian sand with ceramic brick waste aggregates. *Construction and Building Materials*, 363, 129846.
- [6] Bani Baker, M., Abende, R., Sharo, A., & Hanna, A. (2022). Stabilization of sandy soils by bentonite clay slurry at laboratory bench and pilot scales. *Coatings*, 12(12), 1922
- [7] Bouazza, I., & Hacı, F. Z. (2020). Évaluation en laboratoire des performances mécaniques d'un sol sableux renforcé par des fibres de verre (Mémoire de master). Université Ibn Khaldoun de Tiaret.
- [8] Bouazza, M., & Boukenine, A. (2022). Étude du comportement d'un sol non cohérent renforcé par des fibres naturelles et synthétiques (Mémoire de master). Université Ibn Khaldoun de Tiaret.

- [9]Gangadhara, D. S. (2015). Effect of addition of plastic waste on engineering properties of soil. *International Journal*, 3(11).
- [10]Ghazali, A. (2023). Influence de trois types de géotextiles sur l'indice CBR d'un mélange optimal de sable de dune et d'argile de Bouhraoua de la wilaya de Ghardaïa dans le domaine routier (Mémoire de fin d'études). Université de Ghardaïa.
- [11]Halila, M. T., & Tessier, D. (2006). Amélioration de la rétention en eau de matériau sableux par ajout de bentonite. *Revue Technique*, juillet-août.
- [12]Kasehchi, E., Arjomand, M. A., & Alizadeh Elizei, M. H. (2024). Experimental investigation of the feasibility of stabilizing inshore silty sand soil using geopolymer based on ceramic waste powder: An approach to upcycling waste material for sustainable construction. *Studies in Construction Materials*, 20, e02979. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2024.e02979>
- [13]Kumari, B., & Damodar Naidu, C. H. (2018). Influence of plastic waste strips on engineering behaviour of soils. *International Journal for Research in Applied Science & Engineering Technology (IJRASET)*. <https://doi.org/10.22214/ijraset.2018.3261>
- [14]Liu, J. et al. (2018). Improvement effect of water-based organic polymer on the strength properties of fiber glass reinforced sand. *Polymers*, 10(8), 836. <https://doi.org/10.3390/polym10080836>
- [15]Merzoug, K. (2016). Caractérisation d'un sol sableux contenant des fibres caoutchouteuses (Mémoire de master en génie civil, spécialité structures). Université Mohamed Boudiaf - M'sila.
- [16]Mochten, A., & Ben Ghedier, A. E. (2023). Amélioration du comportement mécanique du sable de dune par l'ajout d'un correcteur granulométrique « fines calcaire » (Mémoire de master). Université de Ghardaïa.
- [17]Mukherjee, K., & Kumar Mishra, A. (2021). Recycled waste tire fiber as a sustainable reinforcement in compacted sand–bentonite mixture for landfill application. *Journal of Cleaner Production*, 329, 129691. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.129691>
- [18]Panwar, K., & Ameta, D. N. K. (2013). Stabilization of fine sand with ceramic tiles waste as admixture for construction of embankment. *American Journal of Engineering Research*.
- [19]Qureshi, M. U., et al. (2022). Engineering characteristics of dune sand-fine marble waste mixtures. *Geomechanics and Engineering*, 28(6), 547–557. <https://doi.org/10.12989/gae.2022.28.6.547>

[20]Reddy, S. B., & Krishna, A. M. (2015). Recycled tire chips mixed with sand as lightweight backfill material in retaining wall applications: An experimental investigation. *International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering*, 1(4), 3 <https://doi.org/10.1007/s40891-015-0036-0>

[21]Sanyal, T. (2017). Jute geotextiles and their applications in civil engineering. In *Developments in Geotechnical Engineering*. Springer Singapore. <https://doi.org/10.1007/978-981-10-1932-6>

[22]Siti Nur Fathiha Abdul Jalil, Yahya, N. F., Chan, C. M., Sani, S., Kamarudin, M. S., & Mat Hassan, N. N. (2024). Characteristics of sand-waste tyre rubber composite as backfill material. *Journal of Advanced Research in Applied Mechanics*, 115(1), 61–71. <https://doi.org/10.37934/aram.115.1.6171>

[23]Suthar, L., Meena, S., & Kumar, U. (2024). Utilization of plastic waste in reinforcing sandy soil for sustainable engineering applications. *Journal of Engineering Sciences*. [https://doi.org/10.21272/jes.2024.11\(1\).h1](https://doi.org/10.21272/jes.2024.11(1).h1)

CHAPITRE III

Matériaux et méthodes

III.1.Introduction

Dans ce chapitre, nous présentons le dispositif expérimental et le mode opératoire utilisé au laboratoire pour exécuter les séries d'essais et analyser le comportement du sable de dune seul et différents mélanges de sable de dune, d'argile et déchet de céramique. Trois mélanges ont été réalisés pour améliorer ses propriétés : le premier mélange est constitué de sable de dune et poudre de céramique, le deuxième mélange est une combinaison sable de dune/sol argileux, et le troisième mélange est un mélange intégrant simultanément le sable de dune, poudre de céramique et sol argileux. Différents essais physiques et mécaniques ont été réalisés sur ces mélanges afin d'évaluer leurs performances et leur potentiel d'utilisation dans des applications de remblaiement, dans une perspective d'économie et de développement durable des territoires désertiques.

III.2.Les essais de Cratérisation

III.2.1.Sable de dune

Le sable de dune utilisé dans cette étude provient de la région d'Oued Souf, située au sud Est de l'Algérie.



Figure III.1 Sable de dune

III.2.1.1.Analyse granulométrique par tamisage (NF 18-304) [1]

L'analyse granulométrique par tamisage consiste à séparer les particules d'un échantillon selon leur taille à l'aide de tamis à mailles carrées, afin d'établir leur distribution granulométrique à l'état sec.

Le matériel utilisé est composé de :

- 1- Une série des tamis
 - 2- Une balance.
 - 3- Un sol de masse 1000g.
 - 4- Un couvercle pour fermer les tamis.
 - 5- Un fond de tamis.
- Une tamiseuse mécanique.

➤ Mode opératoire

L'analyse granulométrique a été réalisée sur un échantillon de 1000 g de sable de dune sec. Après pesée individuelle des tamis vides, la colonne de tamisage a été assemblée par ordre

décroissant de mailles. L'échantillon, placé au sommet, a été tamisé mécaniquement pendant 5 minutes avant analyse des refus.



Figure III.2 Série de tamis et tamiseuse électrique

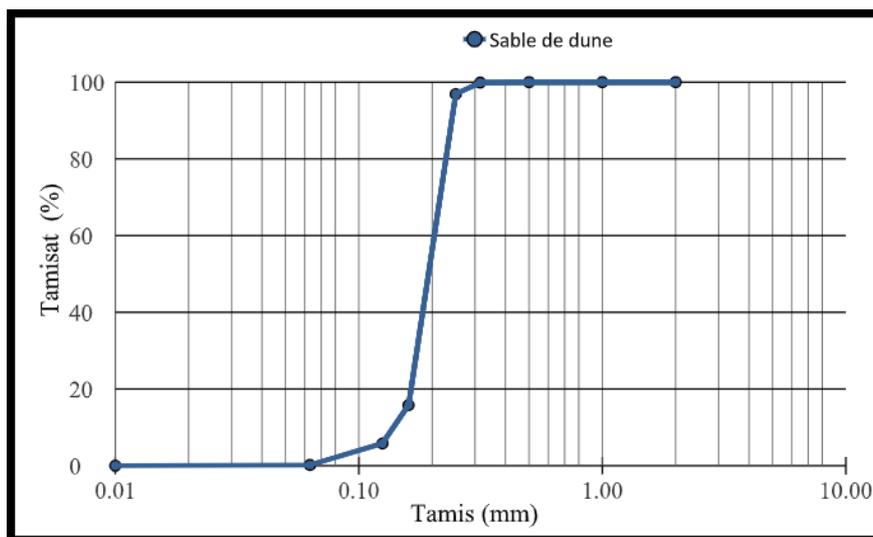


Figure III.3 Courbe granulométrique du sable de dune

Tableau III. 1 Les critères de courbure et d'uniformité

D10	D30	D60	C _u	C _c
0.15	0.19	0.20	1.33	1.20

La distribution granulométrique du sable de dune montre que 90 % des particules passent le tamis de 0,5 mm, caractéristique d'un sable fin homométrique. Toutefois, les coefficients C_u

et Cc ne respectent pas les seuils LPC ($C_u < 6$; $1 < C_c < 3$), conduisant à une classification en sable propre mal gradué (SP selon USCS).

III.2.1.2. La masse volumique (NF 18-304)[2]

III.2.1.2.1. La masse volumique apparente

La masse volumique apparente est une propriété physique intrinsèquement mesurée pour les pierres naturelles selon la norme NF 18-304. Ce paramètre est exprimé en g/m^3 et renseigne sur la compressibilité du matériau par masse et volume spécifiques [21].

$$\rho_{app} = (M_2 - M_1) / V \tag{III.1}$$

Tableau III.2 La masse volumique apparente

V (cm ³)	M1 (g)	M2 (g)	ρ min (g/cm ³)	ρ app (moy) (g/cm ³)
420	46	622	1.37	1.38
420	46	632	1,39	
420	46	632	1,39	

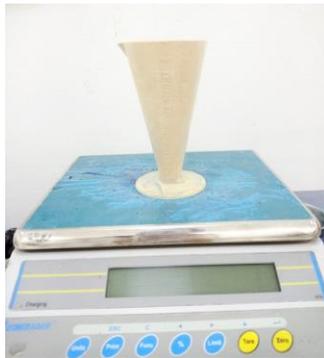


Figure III.4 Masse volumique apparente

III.2.1.2.2. La masse volumique absolue

La masse volumique absolue ρ_{abs} est la masse par unité de volume de la matière qui constitue le granulat, sans tenir compte des vides pouvant exister dans ou entre des grains.

- La masse spécifique est la masse de granulats secs (M_s) rapportée au volume absolu (uniquement volume de solides V_s).
- La mesure du volume des solides ne tient pas compte des pores fermés contenus par les granulats.

La Méthode de l'éprouvette graduée:

$$\rho_{abs} = M / (V_2 - V_1) \tag{III.2}$$

Tableau III.3 La masse volumique absolue

M (g)	V1 (cm ³)	V2 (cm ³)	ρ_{abs} (g/cm ³)	ρ_{abs} (moy) (g/cm ³)
80	60	91	2.58	2.61
40	40	55	2.66	
30	40	51.5	2.60	



Figure III.5 Masse volumique absolue

III.2.1.3. Essai au bleu méthylène (NF P 94 – 068)[4]

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

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

L'essai consiste à introduire progressivement du bleu de méthylène dans une suspension de sol maintenue en agitation. On prélève périodiquement une goutte de la suspension que l'on dépose sur un papier filtre. Dès qu'une auréole bleutée se développe autour de la tache ainsi formée on peut considérer que l'adsorption du bleu de méthylène sur les particules d'argile est terminée. En effet, c'est l'excès de bleu de méthylène qui apparait dans l'auréole (NF P 94-068,1998 [22])

➤ Mode opératoire

Préparation de l'échantillon :

- Prélever 30 g de sol sec (fraction fine, généralement < 2 mm voire < 80 μm).
- Introduire l'échantillon dans un bécher.
- Ajouter environ 500 ml d'eau distillée.
- Agiter la suspension pour bien disperser les particules fines (au moins 5 minutes).

Ajout de bleu de méthylène :

- Remplir une burette avec la solution de bleu de méthylène à 10 g/L.
- Ajouter petit à petit (souvent par 0,5 mL), tout en agitant continuellement.

Test de tache sur papier filtre :

- Après chaque ajout de bleu, prélever une goutte de suspension avec une baguette ou pipette et la déposer sur un papier buvard.
- Observer la tache formée :
 - Si le bleu est absorbé par les argiles : la tache reste centrale, sans halo bleu.
 - Si un halo bleu apparaît autour de la goutte : le point d'adsorption est atteint.

Détermination du point final :

- Le test est terminé dès l'apparition persistante d'un halo bleu clair autour de la tache centrale, ce qui signifie que la capacité d'adsorption des argiles est saturée.

Calcul de la valeur de bleu de méthylène :

- Noter le volume total de bleu ajouté (en mL).
- Appliquer la formule :

$$VBS = V / M \tag{III.3}$$

$$VBS = 0.1 \%$$

Avec :

- C = concentration du bleu de méthylène (g/L) → généralement 10 g/L
- V = volume total de solution de bleu (en mL)
- m = masse d'échantillon (en g)

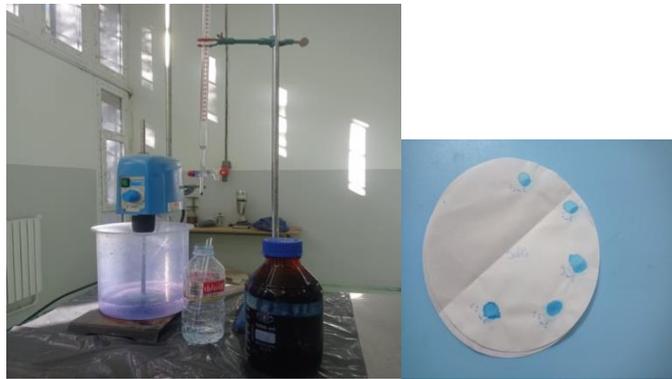


Figure III.6 Essais VBS

Tableau III.4 Classe de sol en fonction du VBS (NF P 94-068, 1998).

Valeur de bleu de méthylène (VB)	Catégorie de sol
$0.1 < VBS < 0.2$	sol insensible à l'eau
$0,2 \leq VBS < 1,5$	Sol sablo limoneux, sensible à l'eau
$1,5 \leq VBS < 2,5$	Sol sablo argileux, peu plastiques
$2,5 \leq VBS < 6$	Sol limoneux de plasticité moyenne.
$6 \leq VBS < 8$	sol argileux.
$8 < VBS$	sol très argileux.

Résultats : Les valeurs obtenues au bleu de méthylène (VBS =0.1) donc le sable de dune est un Sol insensible à l'eau.

III.2.2.Argile

III.2.2.1.Analyse granulométrique par sédimentométrie



Figure III.7 Essai d'Analyse granulométrique par sédimentométrie

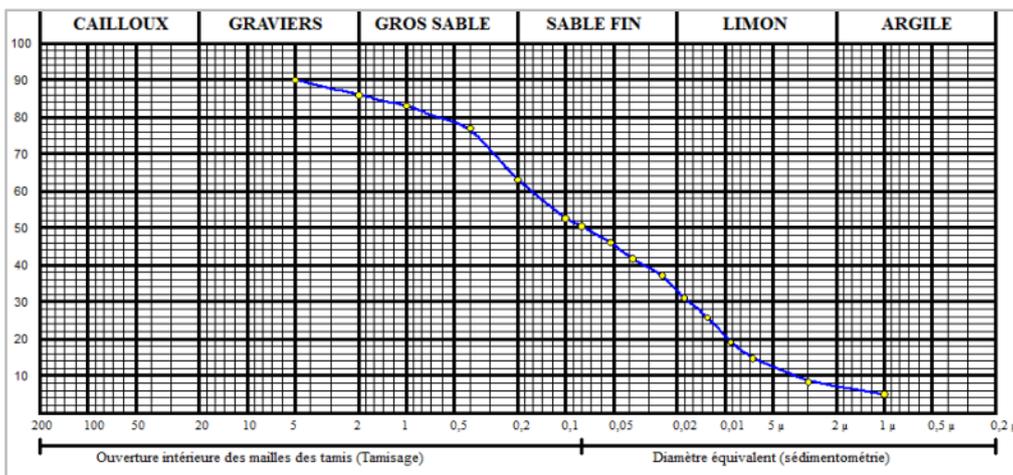


Figure III.8 Courbe de sédimentométrie du sol argileux

Tableau III.5 Les résultats de l'analyse granulométrique de l'argile

D ₁₀ (mm)	D ₃₀ (mm)	D ₆₀ (mm)	C _u	C _c	<80 u(%)
0.004	0.017	0.164	44.710	0.480	50.50

$C_u > 6$ et $C_c < 1$: sol mal gradué à granulométrie étalé mais (discontinu)

III.2.2.2.Densité apparente selon NF P 94-050 et NF P 94-053

Bien qu'il n'existe pas de norme française spécifique à la méthode de la paraffine, la norme NF P 94-053 (2013): Reconnaissance et essais de matériaux - Détermination de la masse volumique d'un matériau en place - Méthode de la trouchométrie peut être utilisée comme

référence pour les aspects généraux concernant la détermination de la densité apparente des sols.

L'essai consiste à déterminer

- Masse de l'échantillon sec (M_s): Obtenue après séchage à l'étuve à 105°C.
- Volume de l'échantillon (V_t): Déterminé par immersion de l'échantillon paraffiné dans l'eau et mesure de la poussée d'Archimède.

La densité apparente (ρ_d) est ensuite calculée en utilisant la formule :

$$\rho_d = M_s / V_t \quad (\text{III.4})$$

➤ Mode opératoire

1) Préparation de l'échantillon

- a. Prélever un échantillon de sol représentatif et homogène.
- b. Peser l'échantillon humide (M_h).
- c. Sécher l'échantillon à l'étuve à 105°C jusqu'à masse constante (M_s).

2) Enrobage de l'échantillon

- a. Faire fondre la paraffine au bain-marie à une température légèrement supérieure à son point de fusion en évitant toute surchauffe.
- b. Attacher un fil fin à l'échantillon sec et l'immerger complètement dans la paraffine fondue pendant quelques secondes.
- c. Retirer l'échantillon et le laisser refroidir pour que la paraffine se solidifie formant un enrobage étanche.

3) Mesure du volume de l'échantillon paraffiné

- a. Remplir le bécher ou l'éprouvette graduée d'eau distillée à température ambiante. Noter le niveau initial de l'eau (V_1).
- b. Immerger délicatement l'échantillon paraffiné dans l'eau en veillant à ce qu'il soit complètement immergé et qu'il ne touche ni le fond ni les parois du récipient.
- c. Noter le nouveau niveau de l'eau (V_2). La différence de volume ($V_2 - V_1$) correspond au volume de l'échantillon paraffiné (V_p).
- d. Déterminer la masse de l'échantillon enrobé de paraffine (M_p).

$$M_{\text{paraffine}} = M_p - M_s \quad (\text{III.5})$$

$$V_{\text{paraffine}} = M_{\text{paraffine}} / \rho_{\text{paraffine}} \quad (\text{III.6})$$

$$V_t = V_p - V_p \quad (\text{III.7})$$



Figure III.9 Essai de la densité apparente**Tableau III.6** Essai de densité apparente

Essais	01	02
Ph + Paraffine (g)	238	200.9
Poids humide (g)	217.2	182.5
Poids paraffine (g)	20.8	18.4
Poids Echantillon immergé (g)	102.7	81.5
Volume brut (cm ³)	135.3	119.4
Volume paraffine (cm ³)	23.63	20.90
Volume net (cm ³)	111.67	98.5
Densité humide (t /cm ³)	1.94	1.85
Teneur en eau (%)	16.49	14.35
Densité sèche (t /cm ³)	1.64	

Tableau III.7 Les caractéristique physique du sol

W (%)	Densité humide (t /cm ³)	Densité sèche (t /cm ³)	Sr (%)
15.42	1.89	1.64	64.47

III.2.2.3. Les limites d'Atterberg (NF P 94 – 051)

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

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

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

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

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

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

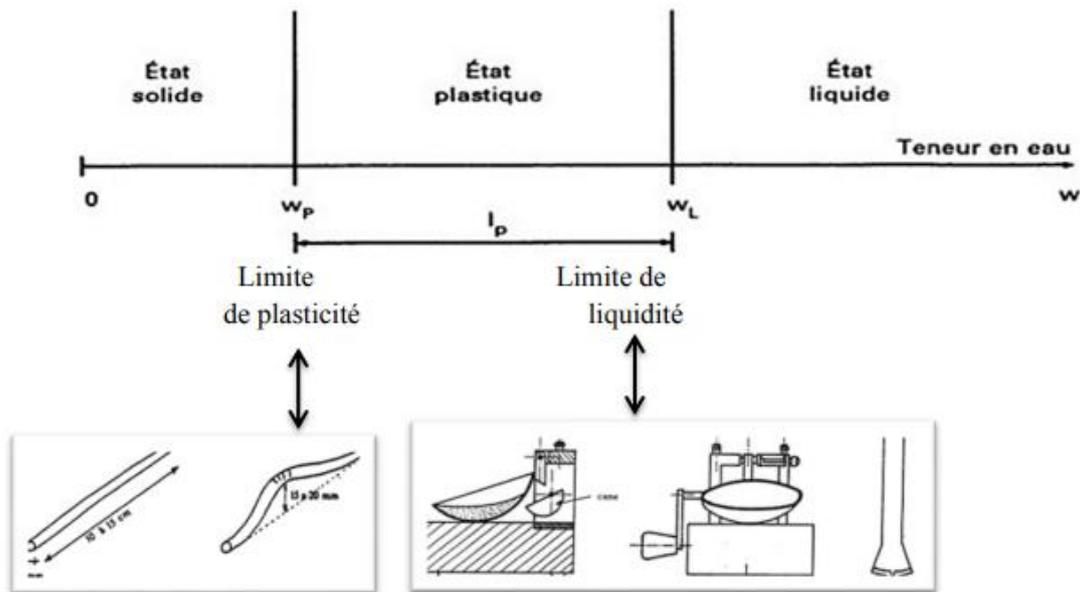


Figure III.10 Etats de consistance d'un sol

❖ **Limite de liquidité W_L**

C'est la teneur en eau d'un sol remanié au point de transition entre les états liquide et plastique $w_L = w (N/25)^{0,121}$ [N c'est nombre de chocs et W : la teneur en eau].

❖ **Limite de plasticité W_p**

Est la teneur en eau d'un sol remanié au point de transition entre les états plastique et solide. Elle est la teneur en eau du cylindre qui se brise en petits tronçons de 1 à 2 cm de long au moment où son diamètre atteint 3 mm Il faut donc réaliser des rouleaux de 3 mm de diamètre sans pouvoir faire de rouleaux plus fins (souvent avec les doigts). On exécute en général deux essais pour déterminer cette limite. L'essai s'effectue en deux phases :

- Recherche de la teneur en eau pour laquelle une rainure pratiquée dans un sol placé dans une coupelle de caractéristiques imposées se ferme lorsque cette dernière et son contenu sont soumis à des chocs répétés.
- Recherche de la teneur en eau pour laquelle un rouleau de sol, de dimension fixée confectionné manuellement, se fissure.

➤ **Mode opératoire**

L'essai est réalisé selon les étapes suivantes :

- Imbiber dans un récipient d'eau à la température ambiante, pendant au moins 24 heures, une masse de matériau.
- Tamiser par voie humide au tamis de 400 μm .
- Recueillir l'eau de lavage et le tamisât dans un bac.
- Siphonner le mélange sol-eau après une décantation au moins 12 heures.
- Evaporer l'eau excédentaire à une température ne dépassant pas 50°C.
- Homogénéiser par malaxage à la truelle du mortier

De nombreux modèles visant à estimer le potentiel de gonflement sont formulées à partir des limites d'Atterberg et de paramètres qui en découlent. Le tableau III.9 donne quelques exemples de cette estimation.

Tableau III.8 Relation entre le potentiel de gonflement et l'indice de plasticité

IP (%)	Taux de gonflement
0-1	Faible
10-20	Moyen
20-35	Elevé



Figure III.11 Essai limites d'Atterberg

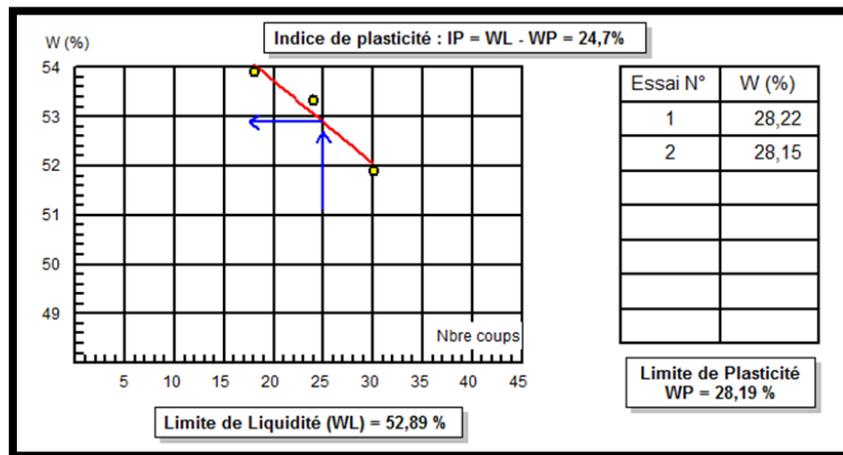


Figure III.12 Courbe de la limite de liquidité W_L de l'argile

Tableau III.9 Indice de plasticité des sols [6]

Indice de Plasticité (IP)	Classification
0 – 5	Non plastique
5 – 15	Peu plastique
15 – 40	Plastique
> 40	Très plastique

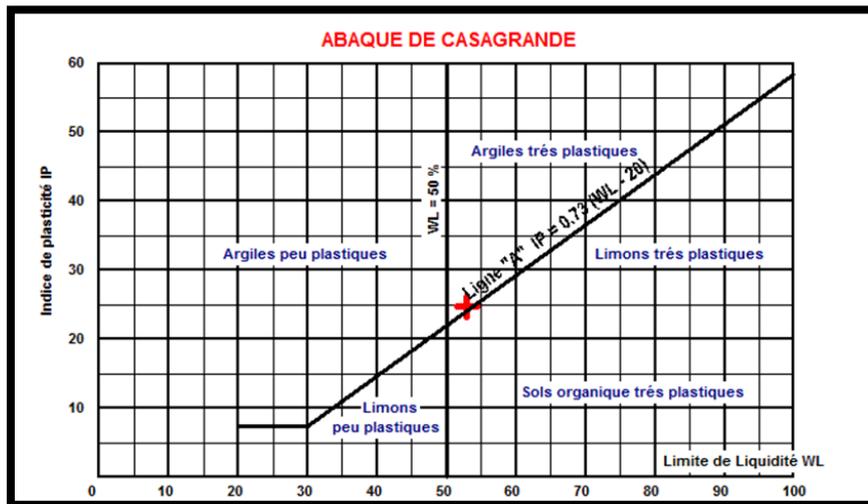


Figure III.13 Abaque de plasticité de Casa grande selon la classification L.C.P.C des sols fins

En fonction de la valeur de l'indice de plasticité et du GTR (tableau III.10) et L.C.P.C, le sol est classé comme une argile très plastique.

III.2.2.4.La masse volumique

III.2.2.4.1.La masse volumique apparente

$$\rho_{app} = (M2 - M1) / V \tag{III.8}$$

Tableau III.10 La masse volumique apparente de l'argile

V (cm ³)	M1 (g)	M2 (g)	ρ_{min} (g/cm ³)	ρ_{app} (moy) (g/cm ³)
420	46	495.9	1.07	1.06
420	46	490	1.05	
420	46	498	1.07	

III.2.2.4.2. La masse volumique absolue

$$\rho_{\text{abs}} = M / (V_2 - V_1) \quad (\text{III.9})$$

Tableau III.11 La masse volumique absolue

M (g)	V1 (cm ³)	V2 (cm ³)	ρ_{abs} (g/cm ³)	ρ_{abs} (moy) (g/cm ³)
500	500	740	2.08	2.02
300	500	650	2	
200	400	500	2	

III.2.2.5. Essai au bleu méthylène

Détermination de l'Argilosité d'un Sol: $VBS = 260 / 30 = 8.67 > 8$ donc le sol est très argileux

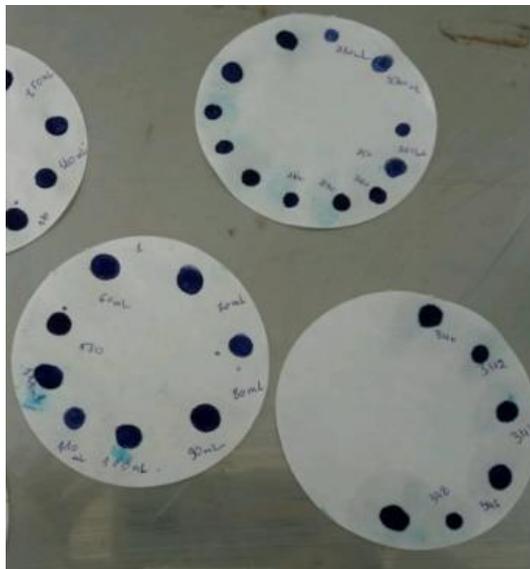


Figure III.14 Résultats de l'essai à la tâche

III.2.3. Déchet de poudre de céramique

III.2.3.1. L'analyse granulométrique de la poudre de céramique

Analyse granulométrique par tamisage (NF 18-304)

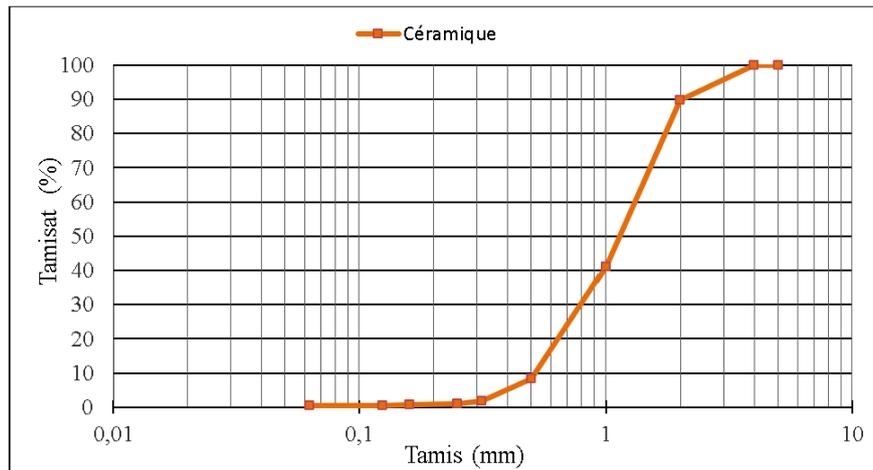


Figure III.15 Courbe granulométrique de la poudre de céramique

Tableau III.12 Les critères de courbure et d’uniformité de de poudre de céramique

D ₁₀	D ₃₀	D ₆₀	C _u	C _c
0.5	0.8	1.4	2.8	0.91

Cu < 6 et 1 < Cc < 3. On a une condition non satisfaite, donc le matériau de la céramique est mal gradué

III.2.3.2.La masse volumique

III.2.3.2.1.La masse volumique apparente

$$\rho_{app} = (M2 - M1) / V \tag{III.10}$$

Tableau III.13 Masse volumique apparente

V (cm ³)	M1 (g)	M2 (g)	ρ_{min} (g/cm ³)	ρ_{app} (moy) (g/cm ³)
420	46.3	526	1,142	1,245
420	46.3	529	1,149	
420	46.3	527	1,144	

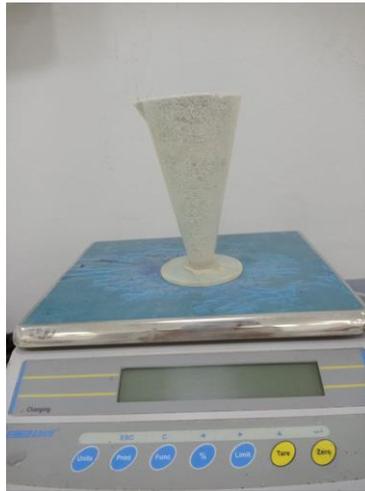


Figure III.16 Masse volumique apparente

III.2.3.2.2.La masse volumique absolue

La Méthode de l'éprouvette graduée

$$\rho_{\text{abs}} = M / (V2 - V1) \tag{III.11}$$

Tableau III.14 Masse volumique absolue

M (g)	V1 (cm ³)	V2 (cm ³)	ρ_{abs} (g/cm ³)	ρ_{abs} (moy) (g/cm ³)
120	100	160	2	2,013
100	100	149	2,040	
80	100	140	2	



Figure III.17 Masse volumique absolue

III.2.3.3.Essai au bleu méthylène de poudre de céramique

$$VBS = V / M = 5 / 60 = 0.083$$



Figure III.18 Résultats de l'essai à la tâche de poudre de céramique

III.3.Essais mécaniques

III.3.1.L'essai Proctor normal (NF P94-093)[10]

L'essai Proctor permet de déterminer la teneur en eau optimale nécessaire pour obtenir la densité sèche maximale d'un sol lors d'un compactage.

L'essai Proctor consiste à compacter un échantillon de sol dans un moule standardisé à l'aide d'une dame normalisée (2,5 kg tombant de 30 cm de hauteur) selon un protocole rigoureux : l'échantillon, préparé à différentes teneurs en eau croissantes (de 2% à 16% par paliers de 2%), est compacté en trois couches soumises chacune à 25 coups de dame pour le moule Proctor standard (ou 55 coups pour le moule CBR).

Pour chaque teneur en eau, on mesure la densité apparente humide puis on calcule la densité sèche, permettant ainsi de tracer la courbe Proctor qui présente un maximum dont l'abscisse donne la teneur en eau optimale (w_{opt}) et l'ordonnée la densité sèche maximale (γ_{dmax}). Cet essai fondamental en géotechnique, réalisé avec deux niveaux d'énergie de compactage (Proctor normal à 592 kJ/m³, permet de déterminer les conditions optimales de compactage des sols pour les travaux de génie civil.

➤ Mode opératoire

1. Préparer un échantillon de sol séché à l'étuve.
2. Diviser l'échantillon en plusieurs parties et ajouter de l'eau à chaque partie pour obtenir une gamme de teneurs en eau croissante.
3. Pour chaque teneur en eau :
 - Compacter le sol dans le moule Proctor en plusieurs couches successives, en appliquant un nombre de coups de dame Proctor défini pour chaque couche.
 - Après compactage, araser le moule et peser l'ensemble.
 - Prélever un échantillon de sol au centre du moule pour la détermination de la teneur en eau.
4. Déterminer la teneur en eau de chaque échantillon après passage à l'étuve.
5. Calculer la densité sèche (γ_d) pour chaque teneur en eau.
6. Tracer la courbe Proctor, représentant la densité sèche (γ_d) en fonction de la teneur en eau (w).



Figure III.19 Essai Proctor normal des mélanges

Tableau III.15 Résultat d'essai Proctor de l'argile

γ_d (kN/cm ³)	14.63	14.95	14.80
W (%)	18	19.35	21.21

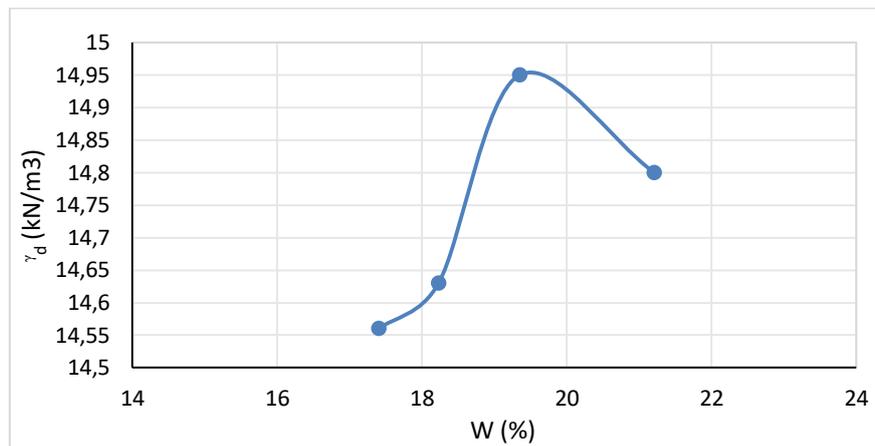


Figure III.20 Courbe Proctor de l'argile

III.3.2. Essai de cisaillement direct (NF P 94-071-1)[8]



Figure III.21 Appareil de cisaillement direct

L'essai de cisaillement direct à la boîte de Casa grande a pour objectif de déterminer la résistance au cisaillement du sol. En supposant les contraintes uniformément réparties sur la surface de rupture, on détermine la contrainte de cisaillement à la rupture τ (ou résistance au cisaillement) pour une contrainte normale donnée σ .

Le dispositif est constitué comme suit:

- Pierre poreuse: Elles permettent de drainer l'échantillon et elles assurent une bonne adhérence entre l'échantillon et les demi-boîtes.
- Demi-boîte supérieur: formée d'un cadre et d'un piston elle permet de respecter la charge verticale N sur l'échantillon seulement.
- Demi-boîte inférieur: Elle est fixe et elle sert de moule. Dispositif à contrainte contrôlée: il entraîne la demi boîte inférieure a vitesse constante la mesure de la contrainte de cisaillement τ et s'effectue par un dynamomètre (Figure III.21)

L'échantillon de sol à étudier est placé entre deux demi-bottes qui peuvent coulisser horizontalement l'une par rapport à l'autre. Un piston permet d'exercer sur l'échantillon une contrainte normale σ . L'essai consiste à tirer horizontalement sur une des mâchoires (généralement la mâchoire inférieure) de façon à cisailier le sol. On mesure F en fonction des déformations horizontales ΔL . L'essai se fait à une vitesse contrôlée v dont dépendant les facteurs C et ϕ (Fig.22).

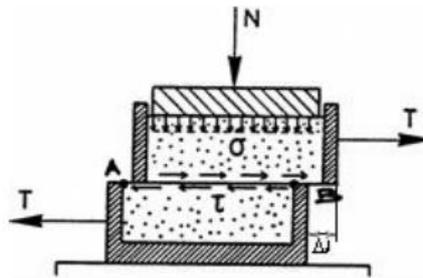


Figure III.22 La Boîte de Casagrande

➤ Mode opératoire

1. Préparer un échantillon de sol de forme et de dimensions définies.
2. Placer l'échantillon dans l'appareil de cisaillement.
3. Appliquer une force de cisaillement croissante à vitesse constante.
4. Enregistrer en continu la force appliquée, la déformation et la pression interstitielle (si mesurée).
5. Poursuivre le cisaillement jusqu'à la rupture de l'échantillon ou jusqu'à l'obtention d'une déformation significative.



Figure III.23 Préparation de l'échantillon pour l'essai de cisaillement

III.3.3. Essai CBR: (California Bearing Ratio test) (NF P 94 078)

En association avec l'essai Proctor Normale, des mesures de poinçonnement sur les éprouvettes compactées sont réalisées afin d'estimer l'indice de portance immédiat (IPI). Ce paramètre permet d'évaluer l'aptitude d'un matériau à supporter directement sur sa surface la Circulation des engins de chantier. Par convention, l'IPI est la plus grande des 2 valeurs suivantes :

$$\frac{\text{Effort de pénétration à 2.5 mm d'enfoncement (enkN)}}{13.35} \times 100$$

$$\frac{\text{Effort de pénétration à 5 mm d'enfoncement (enkN)}}{19.93} \times 100 \quad (\text{III.12})$$

$$\text{CBR} = \max (\text{CBR } 2,5 ; \text{CBR } 5) \quad (\text{III.13})$$

➤ Mode opératoire

Pour préparer l'échantillon, on retourne le moule CBR, on retire le disque d'espacement et on replace l'ensemble sur l'embase. La presse utilisée est celle d'une capacité de 50 kN. Le poinçon est monté sur un anneau dynamométrique de 50 kN, préalablement étalonné. La précision de mesure de la force est de 21 N. Un comparateur au 100^{ème} de millimètre disposé entre le piston et le moule permet de connaître la valeur de l'enfoncement. Une fois l'échantillon correctement centré sur le plateau de la presse, le poinçon est mis en contact avec le matériau afin de régler le comparateur à zéro. Ensuite, le plateau de la presse est actionné à la vitesse constante de 1,27 mm/min et on relève les forces qui correspondent aux valeurs d'enfoncement de 2,5 mm et 5 mm. En traçant sur le même graphe la courbe IPI = f(w), il est possible de déterminer la portance du matériau à l'optimum Proctor.

Tableau III.16 Classement de sol en fonction de l'indice CBR

Classes de portance	CBR [%]
S0 portance très faible	CBR < 3
S1 portance faible	3 < CBR < 6
S2 portance moyenne	6 < CBR < 12
S3 portance élevée	12 < CBR < 25
S4 portance très élevée	25 < CBR

On mesure 3 types d'indice en fonction des buts fixés :

- **L'indice portant immédiat (IPI)**
Il caractérise l'aptitude du sol à permettre la circulation des engins de chantier directement sur sa surface lors des travaux ($H=0$ pas de surcharge S).
- **L'indice C.B.R immédiat**
Il caractérise l'évolution de la portance d'un sol support (ou constituant de chaussée) compacté à différentes teneur en eau.
- **L'indice C.B.R après immersion**
Il caractérise l'évolution de la portance d'un sol support (ou constituant de chaussée) compacté à différentes teneur en eau et soumis à des variations de régime hydrique.



Figure III.24 Appareil de CBR

III.3.4. Essai de l'œdomètre (NF P 94-91)



Figure III.25 Appareil odométrique

L'essai vise à caractériser le tassement compressible et le degré de consolidation d'un échantillon d'argile intact sous chargement vertical progressif.

Cet essai permet d'établir, pour un échantillon donné, deux types de courbes:

- Les courbes de consolidation, qui donnent le tassement de l'échantillon en fonction du temps sous application d'une contrainte constante.
- La courbe de compressibilité, qui indique le tassement total en fonction du logarithme de la contrainte appliquée.
- Le potentiel de gonflement (C_g) d'un élément de sol ou de roche, dont l'état physique initial est connu, est la déformation maximale ($\Delta h/h$) que provoque l'imbibition de cet élément soumis à un état de contrainte nulle ou quasi-nulle jusqu'à sa saturation complète.

Tableau III.17 Compressibilités des sols.

Nature du sol	Les degrés de la compressibilité	Indice de compressibilité C_c
Sables	incompressible	$C_c < 0,02$
	très peu compressible	$0,02 < C_c < 0,05$
	peu compressible	$0,05 < C_c < 0,10$
Kaolinites	moyennement compressible	$0,10 < C_c < 0,20$
Illites	assez fortement compressible	$0,20 < C_c < 0,30$
	très compressible	$0,30 < C_c < 0,50$
Montmorillonites	extrêmement compressible	$0,50 < C_c$

Tableau III.18 Classification des résultats suivant l'indice de gonflement C_g

C_g	Classification
$C_g > 0,05$	Sol gonflant
$C_g < 0,05$	Sol peu gonflant

➤ **Mode opératoire**

1. Préparer un échantillon de sol de forme cylindrique et le placer dans l'odomètre, en veillant à un bon contact avec la pierre poreuse.
2. Appliquer une première charge verticale à l'échantillon.
3. Mesurer les variations de hauteur de l'échantillon en fonction du temps jusqu'à stabilisation du tassement.
4. Augmenter la charge verticale par paliers et répéter les mesures de tassement pour chaque palier.
5. Poursuivre le chargement jusqu'à atteindre la contrainte effective maximale prévue.

Les résultats obtenus par l'essai œdométrique sont présentés sur la figure III.25:

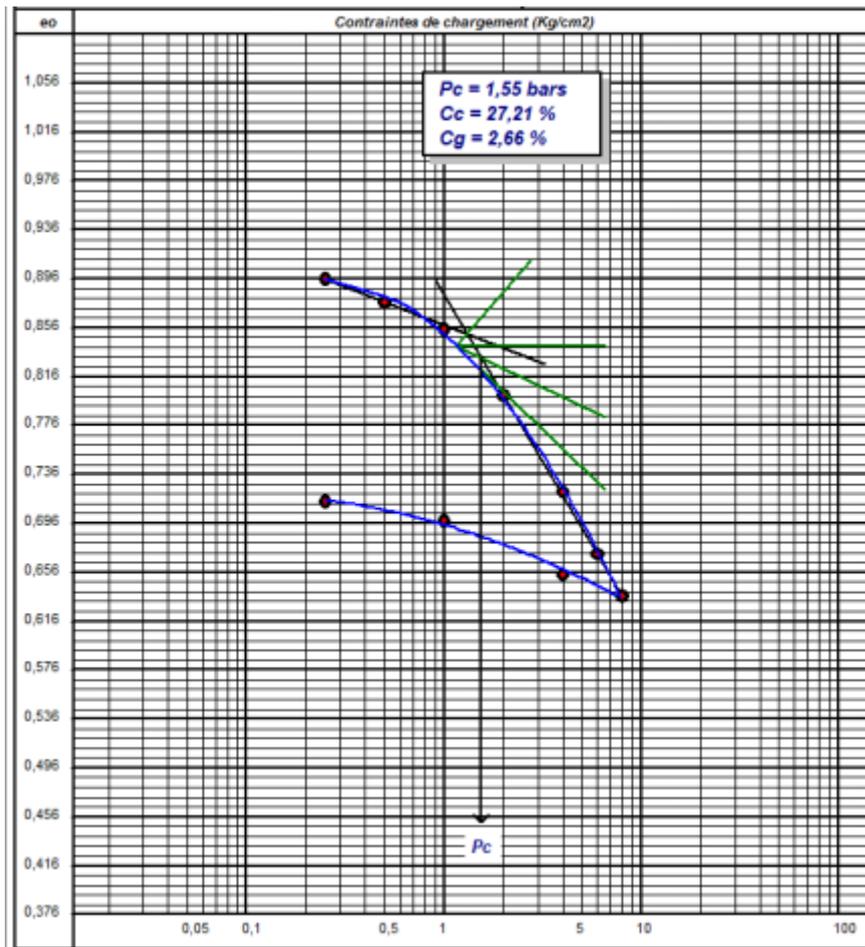


Figure III.26 Essais œdométrique de l'argile naturelle .

A partir de la Figure III.26, on peut déterminer le coefficient de gonflements et de compressibilité de notre sol, qui sont essentiels à la classification des sols considérés. Le classement des argiles selon leurs indices de compressibilités; D'après le tableau III.20, le $C_c = 0.27$, on peut conclure que notre sol est assez fortement compressible.

Selon le tableau III.21 $C_g = 0.026 < 0.05$ donc le sol est un sol peu gonflant.

III.4.Conclusion

Ce chapitre présente l'ensemble des essais expérimentaux réalisés dans le but d'étudier l'effet de la stabilisation du sable de dune à travers l'ajout de pourcentages variables de matériaux de Renforcement, notamment la poudre de céramique et l'argile. Les principaux essais de Caractérisation ont été réalisés le sable de dune, l'argile et le déchet de céramique. Également, Des essais mécanique (Proctor normal, cisaillement à la boîte, CBR et odomètre) sur les Mélanges préparés à différents pourcentages d'argile et poudre de céramique. Les résultats Obtenus ont mis en évidence la possibilité de valoriser le sable de dune et le déchet de Céramique comme matériaux de remblais.

Références Bibliographiques du troisième chapitre

- [1] NF 18-304 Béton et béton armé. Granulométrie des granulats (agrégats).
- [2] NF P 18-554 Granulats - Mesures des masses volumiques, de la porosité, du coefficient d'absorption et de la teneur en eau des gravillons et cailloux
- [4] NF P 18-598 Granulats - Équivalent de sable Dans la série des normes P 18-... qui concernent les granulats, la présente norme définit une méthode d'évaluation de la propreté des fines d'un sable.
- [5] NF P 18-598 Granulats - Équivalent de sable Dans la série des normes P 18-... qui concernent les granulats, la présente norme définit une méthode d'évaluation de la propreté des fines d'un sable.
- [8] NF P 94-071-1 Sols : reconnaissance et essais - Essai de cisaillement rectiligne à la boîte - Partie 1 : cisaillement direct.
- [10] NF P94-093-Sols : reconnaissance et essais - Détermination des références de compactage d'un matériau - Essai Proctor Normal - Essai Proctor modifié
- [21] Bakhoun, M. S., & Laabed, A. (2022). Le Sable de dunes : Etude de la résistance au cisaillement. [Mémoire de master, Université Ahmed Draia Adrar].
- [22] BENASSI .S, et SAADI .N (2023). Influence de l'ajout des fines calcaire sur certaines caractéristiques (sec) géotechnique du sable de dune (application dans le domaine de la géotechnique routière saharienne). [Mémoire de master, Université de Ghardaïa].
- Normes techniques
- La Norme NFP 94-093 Détermination des références de compactage d'un matériau.
- La Norme NFP 94-071-1 Essai de Cisaillement.
- La Norme NFP 94-051 Détermination des limites d'Atterberg.
- La norme NF P 94-053 la densité apparente
- La norme NFNF P 94-057 la sédimentométrie
- La norme NF NFP 94-068) le méthylène (VBS)
- La norme XP P 94-090-1 Essai œdométrique

Chapitre IV

Interprétation des Résultats

IV.1.Introduction

Ce chapitre présente les résultats d'essais menés sur du sable de dune et sur deux mélanges : sable de dune + céramique broyée et sable de dune+ sol argileux. L'objectif de cette étude est d'analyser l'effet de l'incorporation de l'argile et de déchet recyclé (céramique broyée) sur les propriétés physiques et mécaniques du sable de dune, notamment en termes de compactage, de résistance au cisaillement et de portance (essai CBR).

IV.2.Effet de l'ajout de l'argile et poudre de céramique sur le compactage

IV.2.1.Sable de dune + Argile

L'essai Proctor a été réalisé sur le mélange sable de dune à différents pourcentages (1%, 2%, 3%, 4% et 5%) afin d'améliorer la densité sèche. Les résultats obtenus sont présentés ci-après :

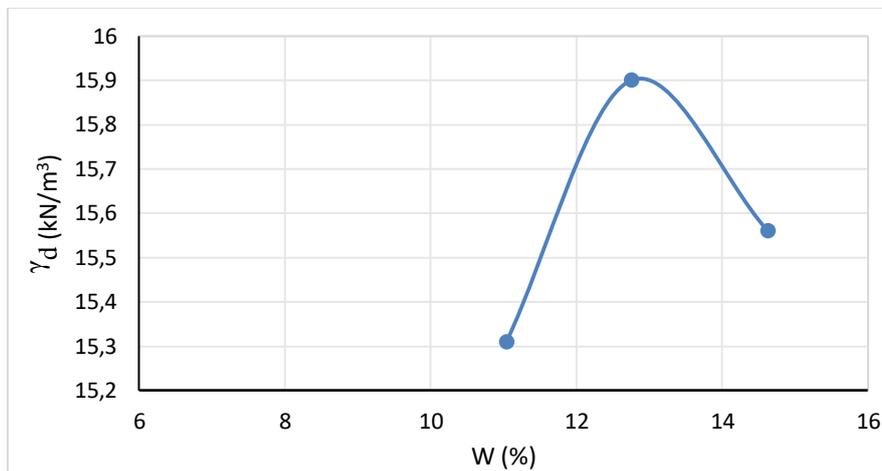


Figure IV.1 Courbe de compactage Proctor du sable de dune +1% d'argile

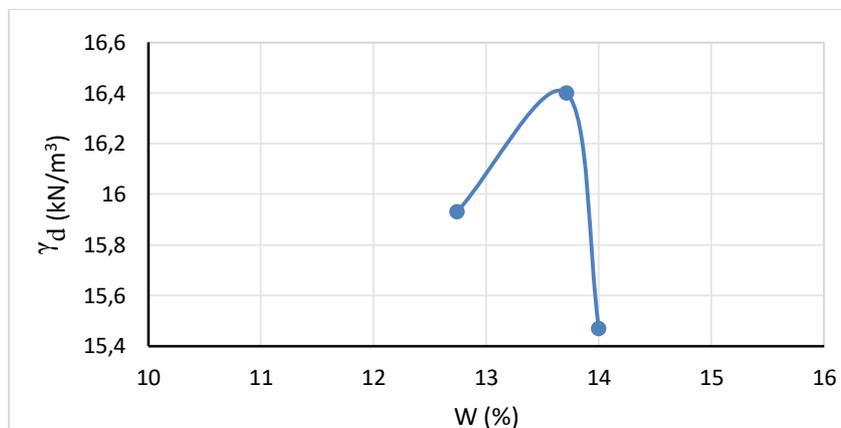


Figure IV.2 Courbe de compactage Proctor du sable de dune +2% d'argile

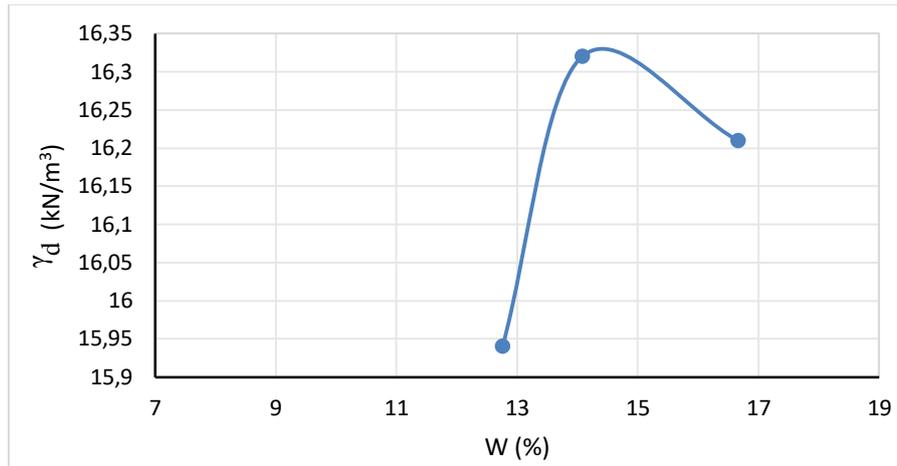


Figure IV.3 Courbe de compactage Proctor du sable de dune +3% d'argile

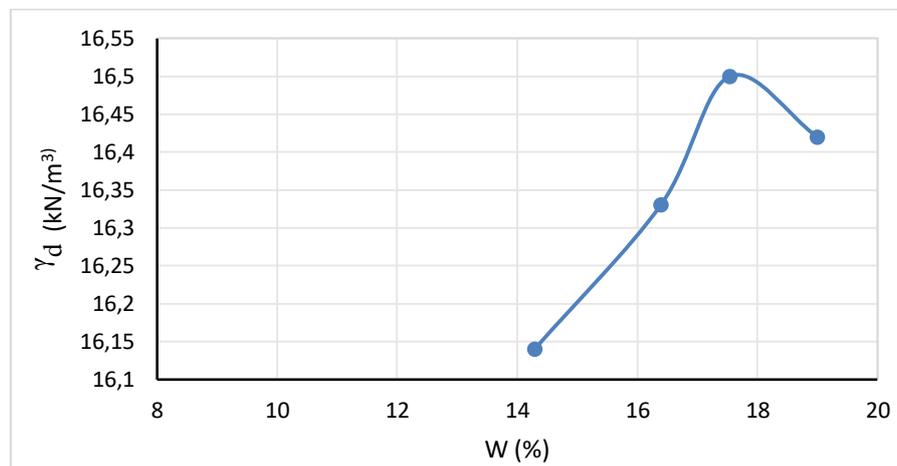


Figure IV.4 Courbe de compactage Proctor du sable de dune +4% d'argile

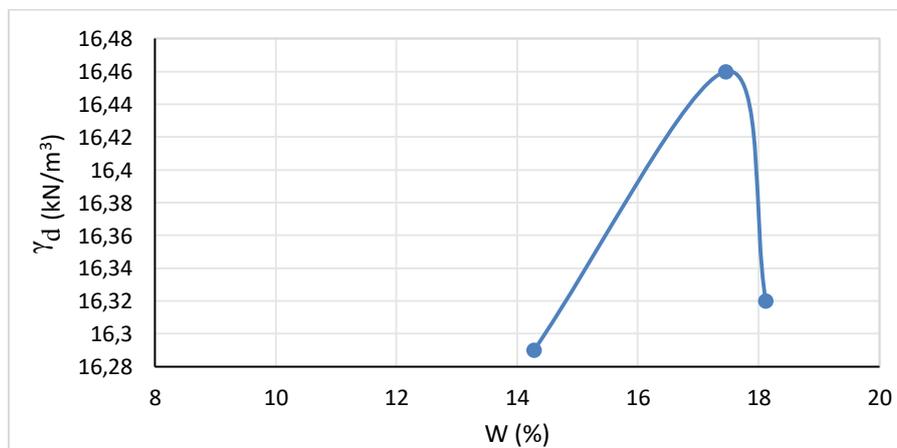


Figure IV.5 Courbe de compactage Proctor du sable de dune +5% d'argile

Le Bilan des résultats de l'essai Proctor sont présentés sur le tableau IV.1 et la figure IV.6 et IV.7.

Tableau IV.1 Résultats des essais Proctor normal à différents pourcentages d'argile

Argile (%)	1%	2%	3%	4%	5%
γ_d (kN/m ³)	15.90	16.40	16.32	16.50	16.46
W opt (%)	12.75	13.71	14.08	17.54	17.46

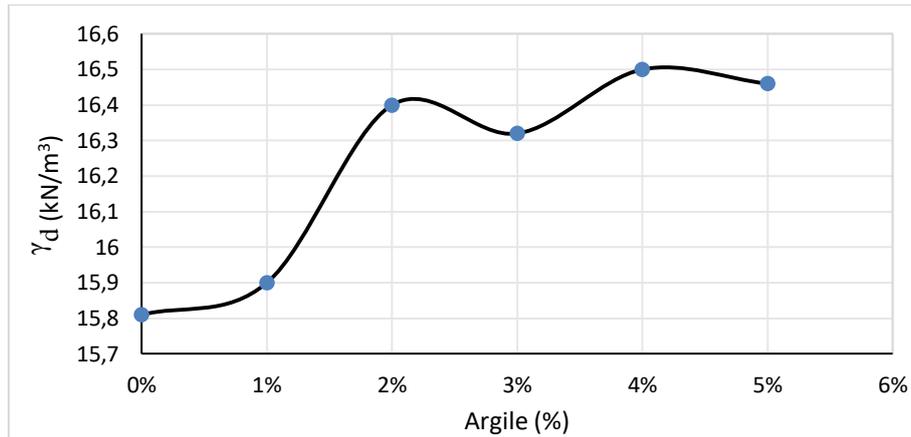


Figure IV.6 Courbe de γ_d en fonction des pourcentages d'argile

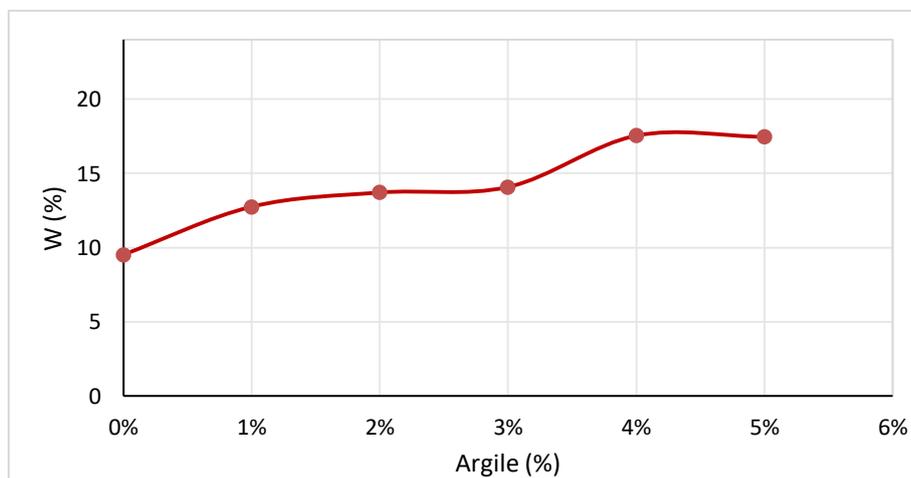


Figure IV.7 Courbe de W_{opt} en fonction des pourcentages du l'argile

D'après la figure IV.6 et IV.7, la densité sèche et l'optimum Proctor ont enregistré des valeurs maximales pour le pourcentage 4%

IV.2.2. Sable de dune + poudre de Céramique

L'essai Proctor a été réalisé sur le mélange sable de dune et poudre de céramique à différents pourcentages (2%, 4%, 6% et 8%). Les courbes Proctor pour l'ensemble des mélanges sont présentés ci-après :

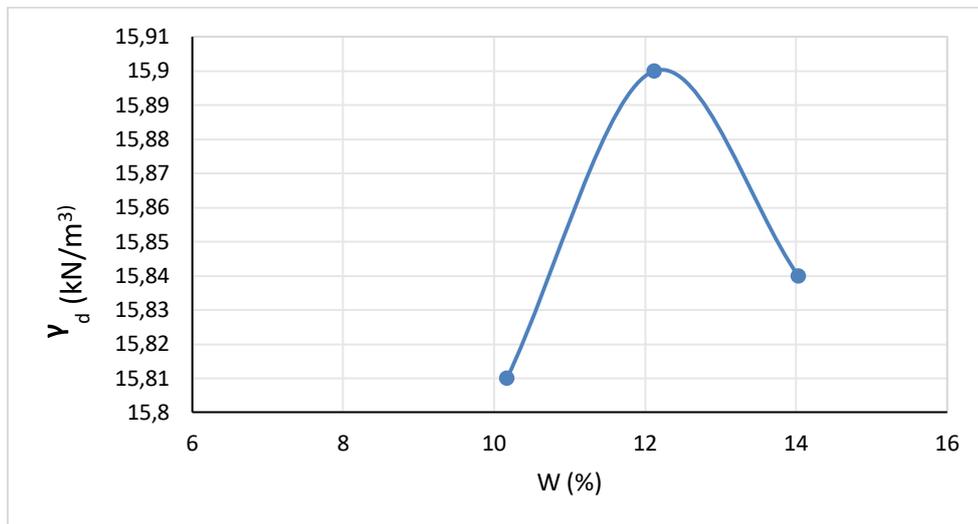


Figure IV.8 Courbe de compactage Proctor du sable de dune +2% céramique

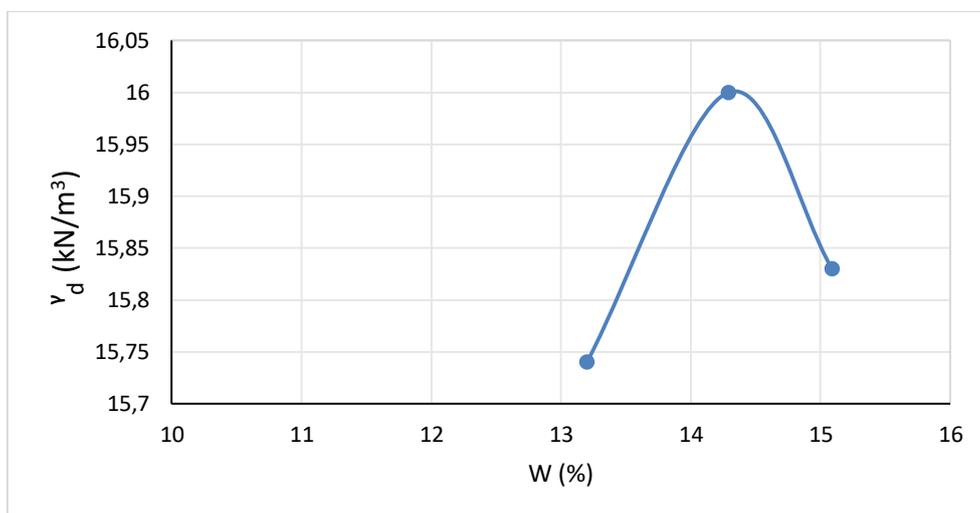


Figure IV.9 Courbe de compactage Proctor du sable de dune +4% céramique

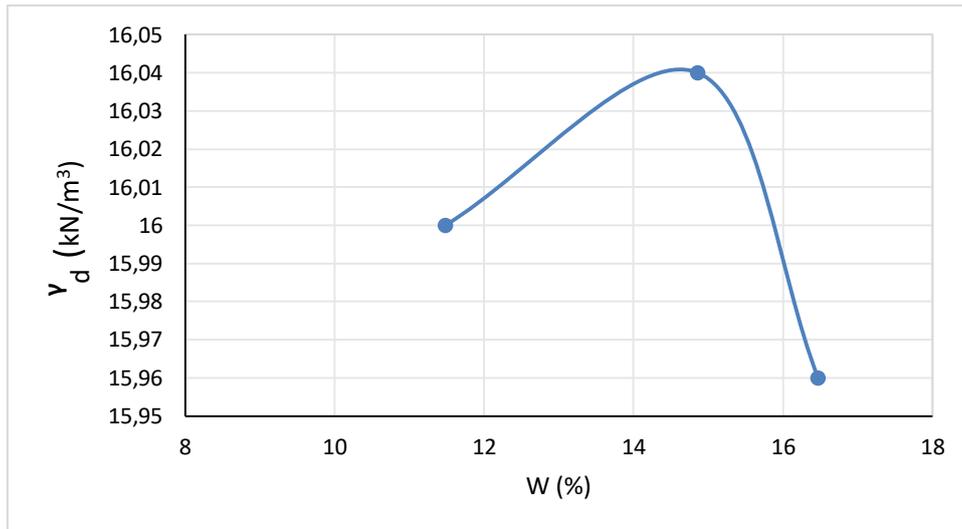


Figure IV.10 Courbe de compactage Proctor du sable de dune +6% céramique

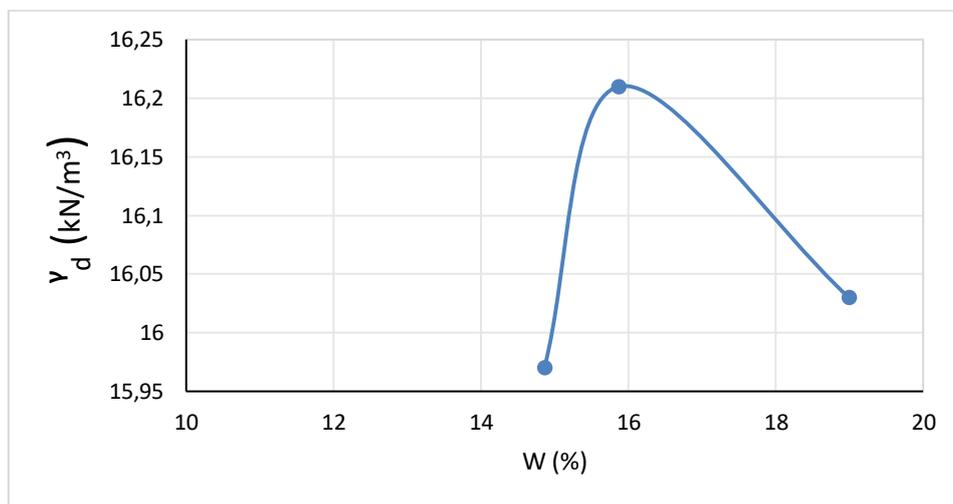


Figure IV.11 Courbe de compactage Proctor du sable de dune +8% céramique

Tableau IV.2 Résultats des essais Proctor normal à différents pourcentages de poudre de céramique

Céramique (%)	2%	4%	6%	8%
γ_d (kN/m ³)	15.90	16.00	16.04	16.21
W opt (%)	12.12	14.29	14.86	15.87

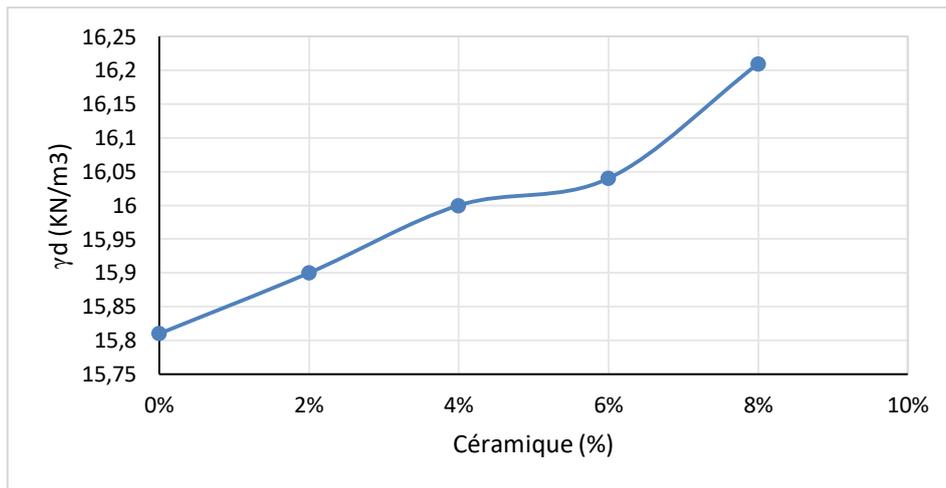


Figure IV.12 Courbe de la densité sèche en fonction des pourcentages de céramique

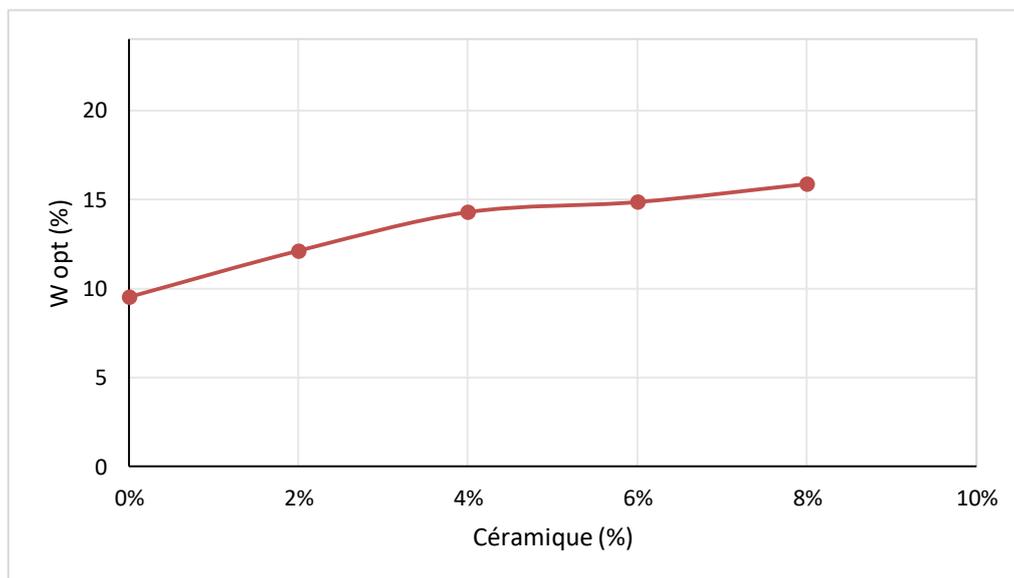


Figure IV.13 Courbe de W_{opt} en fonction des pourcentages de la céramique

D'après la figure IV.12 et IV.13, la densité sèche et l'optimum Proctor augmente simultanément avec l'augmentation du pourcentage de la poudre de céramique pour atteindre une densité sèche égale à 16,21 kN/m³ et un optimum Proctor égale 15,87%.

IV.2.3. Sable de dune + Argile+ Céramique

Des mélanges de sable de dune, 4% argile et (2%, 4%, 6% et 8%) de poudre de céramique ont été préparés pour étudier l'effet de l'ajout de l'argile et la poudre de céramique sur l'amélioration des paramètres de compactage. Les courbes Proctor des différents mélanges sont présentées ci-après :

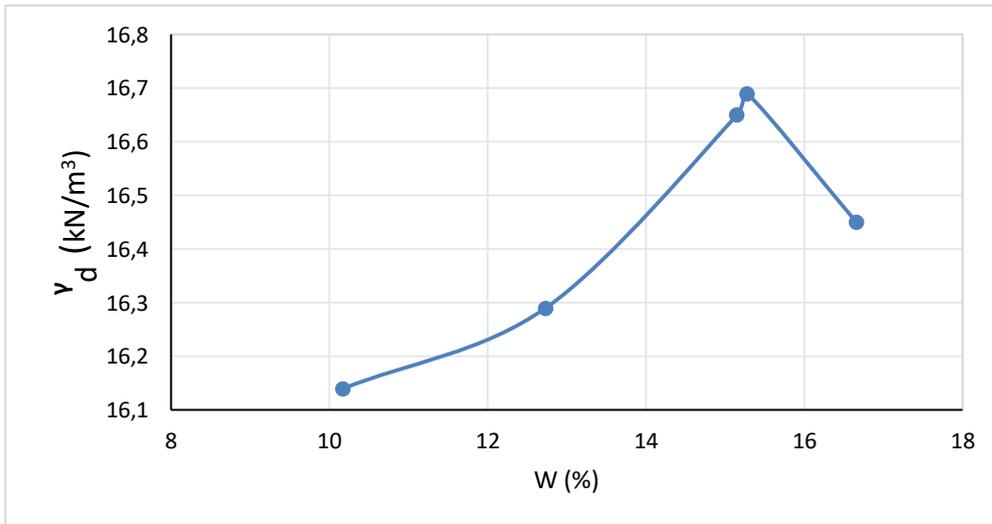


Figure IV.14 Courbe de compactage Proctor du mélange (sable de dune + 4% argile + 2% céramique)

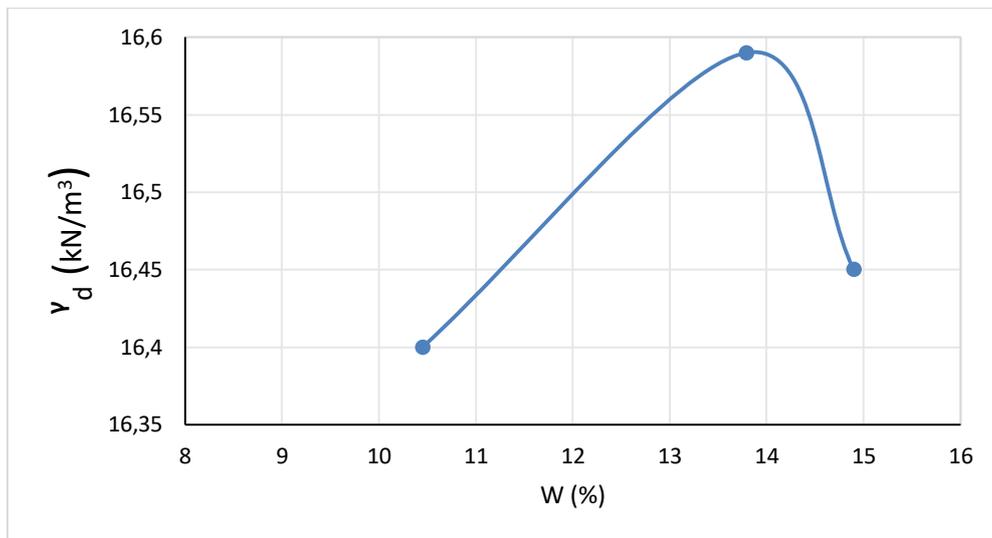


Figure IV.15 Courbe de compactage Proctor du mélange (sable de dune + 4% argile + 4% céramique)

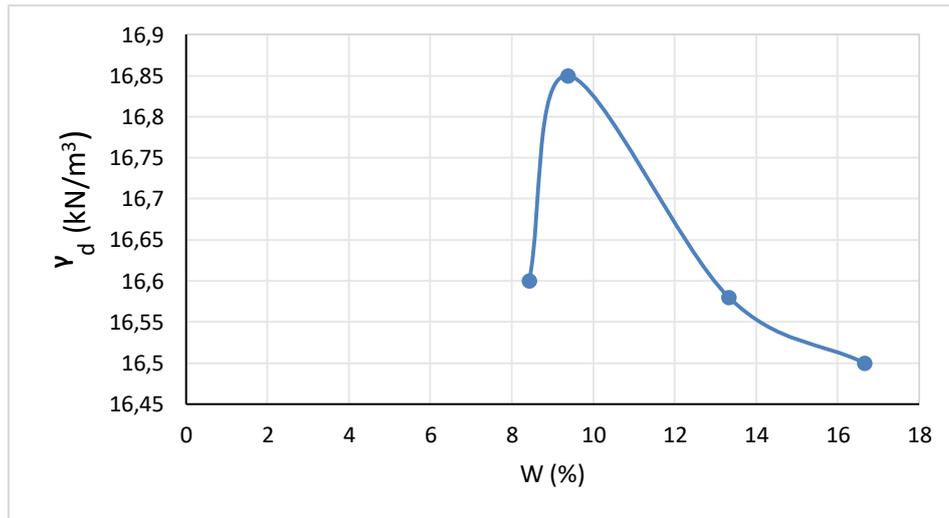


Figure IV.16 Courbe de compactage Proctor du mélange (sable de dune + 4% argile + 6% céramique)

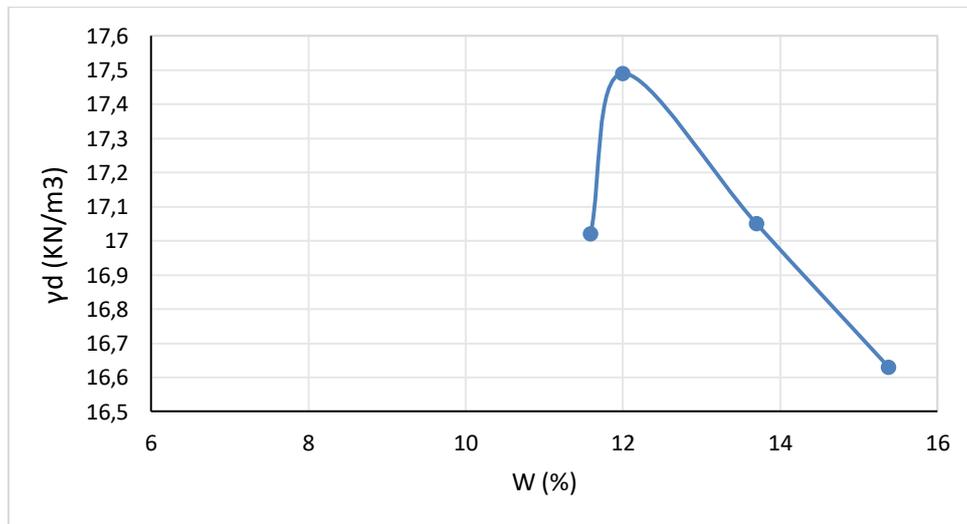


Figure IV.17 Courbe de compactage Proctor du mélange (sable de dune + 4% argile + 8% céramique)

Tableau IV.3 Résultats des essais Proctor normal du mélange d'argile + poudre de céramique

SD + 4% Ar + Cr (%)	2%	4%	6%	8%
γ_d (kN/m ³)	16.69	16.59	16.85	17.49
W opt (%)	15.28	13.79	9.38	12

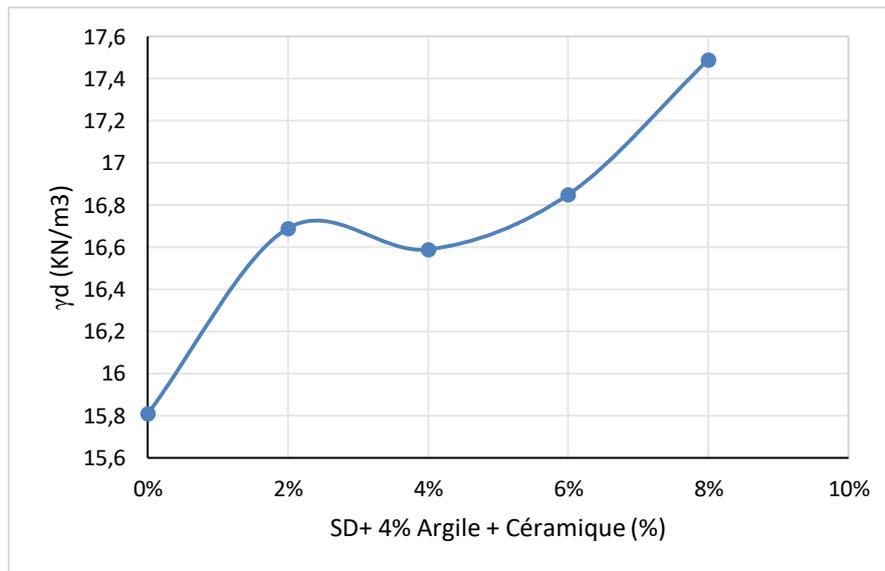


Figure IV.18 Courbe de la densité sèche en fonction du mélange (SD + 4%Ar + Cr (%))

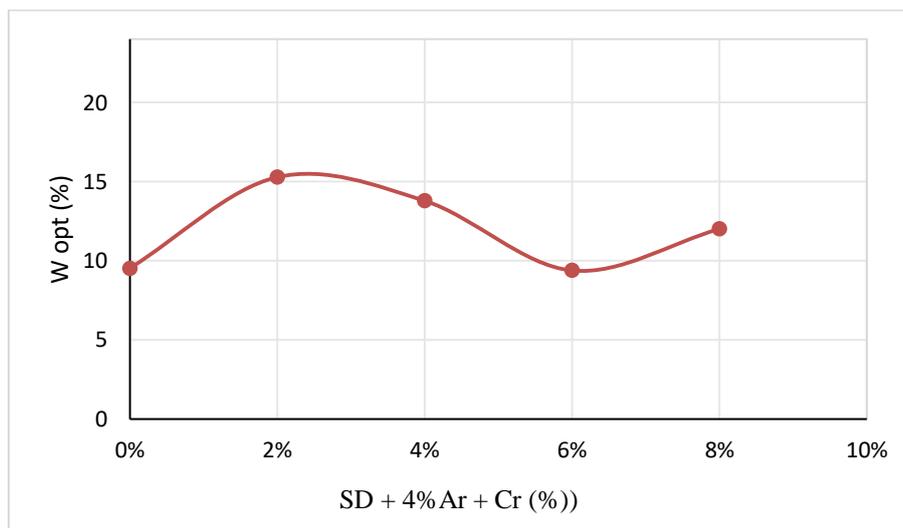


Figure IV.19 Courbe de W_{opt} en fonction des pourcentages du mélange (SD + 4%Ar + Cr (%))

D'après la figure IV.18 et IV.19, la densité sèche a enregistré une valeur maximal de $16,69 \text{ kN/m}^3$ à 2% de céramique ensuite diminué au pourcentage (SD+4% argile + 4% Cr) pour augmenter à la valeur $17,49 \text{ kN/m}^3$ à 4% de céramique. Par contre l'optimum Proctor enregistre un maximum égal à $15,28\%$ pour le mélange (SD+4% argile + 2% Cr).

IV.3.Effet de l'ajout de l'argile et poudre de céramique sur la portance (CBR)

L'indice CBR est un paramètre fondamental utilisé dans la construction des ouvrages en terre ou des couches de forme des chaussées. Pour étudier l'effet de l'ajout de l'argile et le déchet de céramique des essais CBR ont été réalisés sur deux mélanges à savoir (SD+argile), (SD + Poudre de céramique) et (SD + argile + poudre de céramique)

IV.3.1.Sable de dune + Céramique

L'essai CBR a été réalisé sur un mélange de sable de dune et déchet de céramique à différents pourcentages (0%, 2%, 4%, 6% et 8%). Les résultats obtenus sont présentés sur la figure IV.20

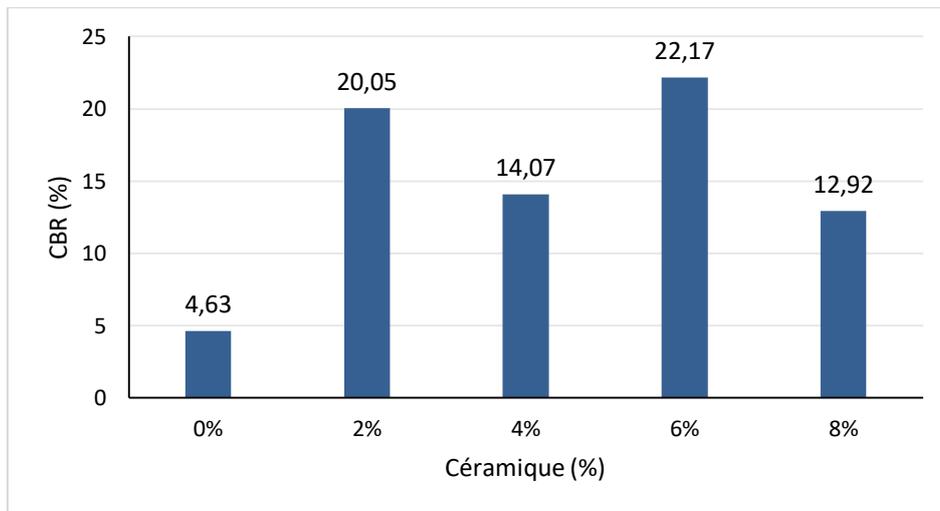


Figure IV.20 Indice CBR du mélange sable de dune et poudre céramique

La Figure IV.20 présente l'évolution de l'indice CBR (%) en fonction du pourcentage de céramique ajouté à un sable de dune.

À 0 % de céramique, le CBR est faible (environ 4,5 %), ce qui indique une faible portance du sable de dune seul.

L'ajout de 2 % de céramique augmente fortement le CBR à environ 20 %, traduisant une amélioration significative de la portance.

À 4 % de céramique, le CBR diminue légèrement, mais reste nettement supérieur à celui du sable seul.

À 6 % de céramique, le CBR atteint son maximum (environ 22 %), indiquant que ce taux d'ajout optimise la résistance du mélange.

Au-delà, à 8 % de céramique, le CBR redescend (environ 13 %), suggérant que trop de céramique détériore la cohésion ou la compacité du mélange.

L'ajout de céramique améliore la portance du sable de dune jusqu'à un certain seuil (6 %), en améliorant la compacité et la répartition des grains.

Un excès de céramique (>6 %) provoque une baisse du CBR, possiblement à cause d'une augmentation des pourcentages de fines le.

Le pourcentage optimal de céramique pour renforcer le sable de dune est donc de 6 %, au-delà duquel les propriétés mécaniques diminuent.

IV.3.2.Sable de dune + Argile + Céramique

On a réalisé l'essai CBR sur le deuxième mélange composé de sable de dune, l'argile à 4% et le déchet de céramique à différents pourcentages (0%, 2%, 4%, 6% et 8%). Les résultats obtenus sont présentés sur la figure IV.21.

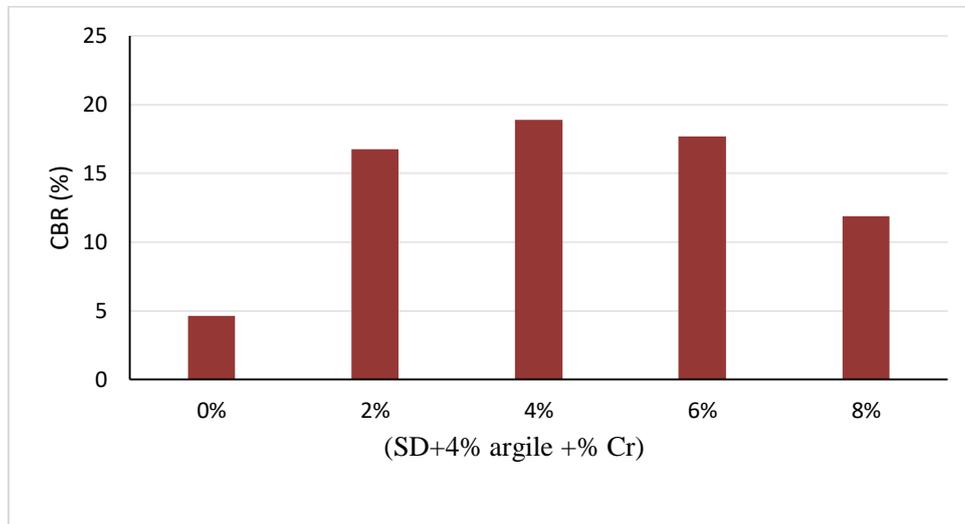


Figure IV.21 Indice CBR du mélange (SD+4% argile + % Cr)

La Figure IV.21 présente l'évolution de l'indice CBR (%) en fonction de la teneur en céramique ajoutée à un mélange de sable de dune, 4 % d'argile.

- À 0 % d'ajout, le CBR est faible (environ 4,5 %), ce qui indique que le sable de dune seul, même avec 4 % d'argile et 2 % de céramique, a une faible portance.
- Avec 2 % d'ajout, le CBR augmente fortement à environ 16,5 %. Cela montre que l'ajout de céramique améliore nettement la portance du mélange.
- À 4 %, le CBR atteint son maximum (environ 19 %), ce qui suggère que ce taux optimise la compacité et la cohésion du mélange.
- À 6 %, le CBR reste élevé (environ 17,5 %), mais commence à diminuer légèrement.
- À 8 %, le CBR chute à environ 12,5 %, montrant qu'un excès de céramique détériore la structure du mélange et réduit la portance.

IV.4.Effet de l'ajout de l'argile et poudre de céramique sur la résistance au cisaillement

IV.4.1.Essai de cisaillement sur le mélange sable de dune + Argile

L'essai de cisaillement direct a été effectué sur des échantillons de sable de dune (UU), angle CD) et le mélange (SD + argile) (UU) à différents pourcentages (1%, 2%, 3% 4% et 5%)

➤ Echantillon de l'rgile

Les résultats de l'essai de cisaillement direct à la boîte réalisé sur l'argile est présenté sur les figures IV.22 et IV.23.

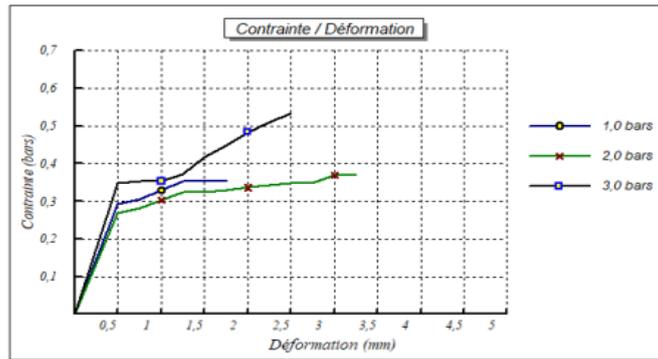


Figure IV.22 Rapport contrainte déformation de l'argile

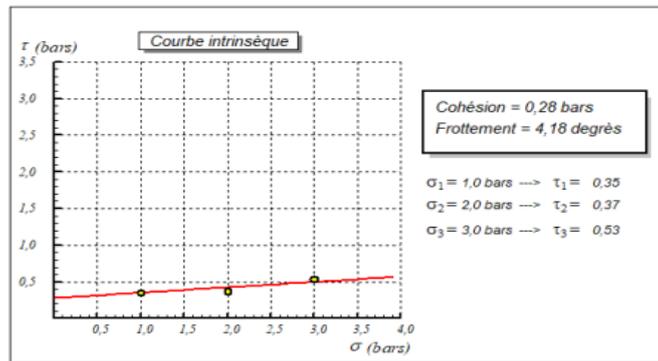


Figure IV.23 Courbe intrinsèque de l'argile

➤ **Sable de dune**

Les résultats de l'essai de cisaillement direct à la boîte réalisé sur le sable de dune est présenté sur les figures IV.24 et IV.25.

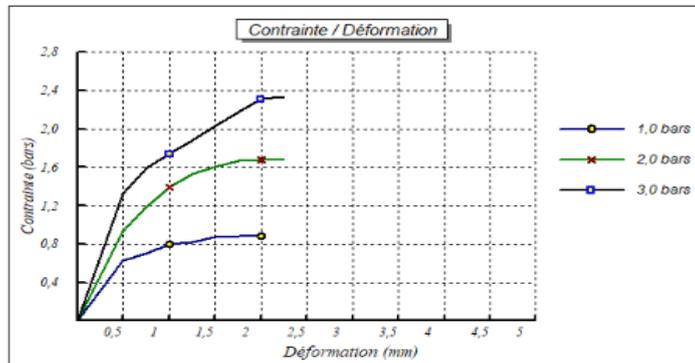


Figure IV.24 Courbe contrainte déformation du sable de dune

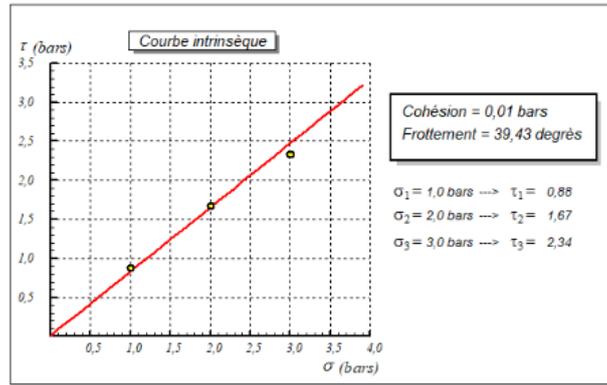


Figure IV.25 Courbe intrinsèque du sable de dune

➤ **Sable de dune + 1% Argile**

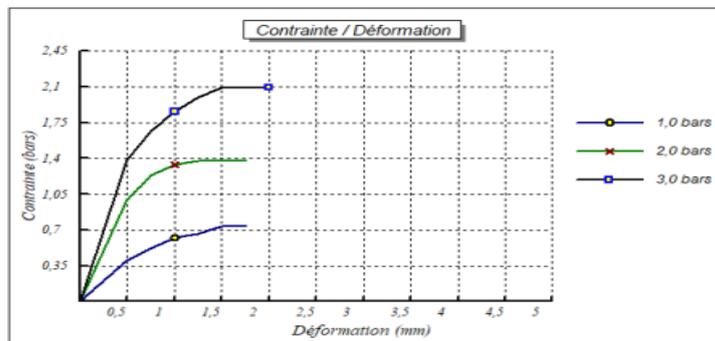


Figure IV.26 Courbe contrainte déformation du mélange sable de dune+1% argile

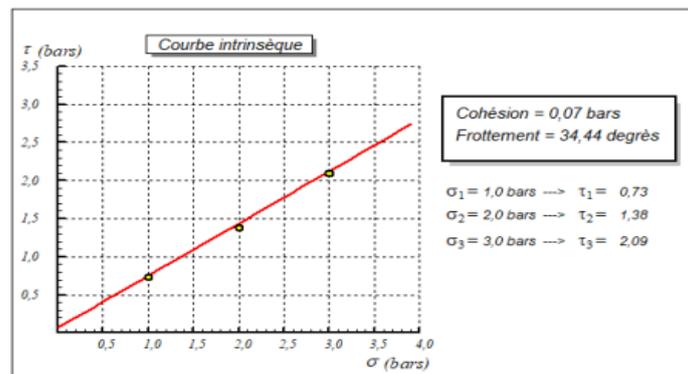


Figure IV.27 Courbe intrinsèque du mélange sable de dune+1% argile

➤ **Sable de dune + 2% Argile**

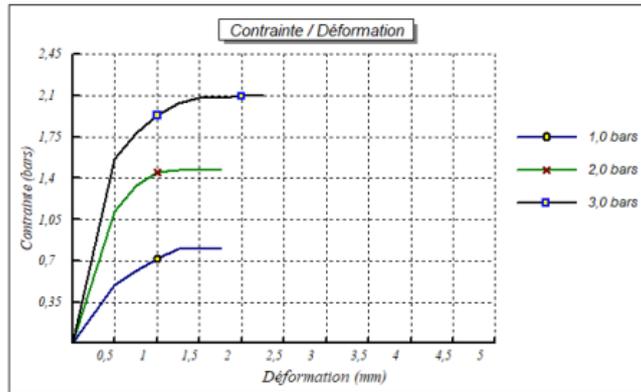


Figure IV.28 Courbe contrainte déformation du mélange sable de dune+2% argile

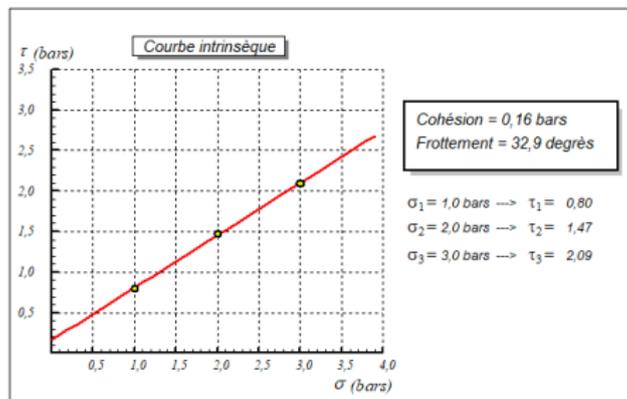


Figure IV.29 Courbe intrinsèque du mélange sable de dune+ 2% argile

➤ **sable de dune + 3% Argile**

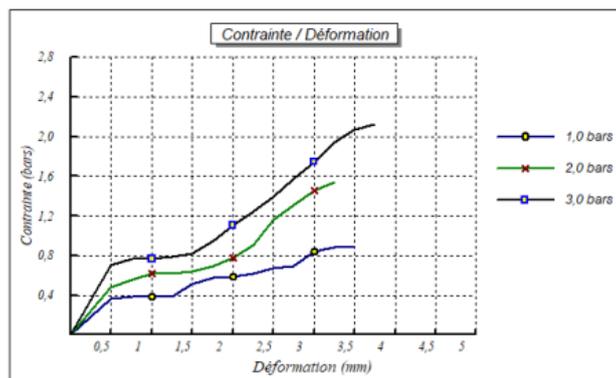


Figure IV.30 Rapport contrainte déformation du mélange sable de dune+ 3% argile

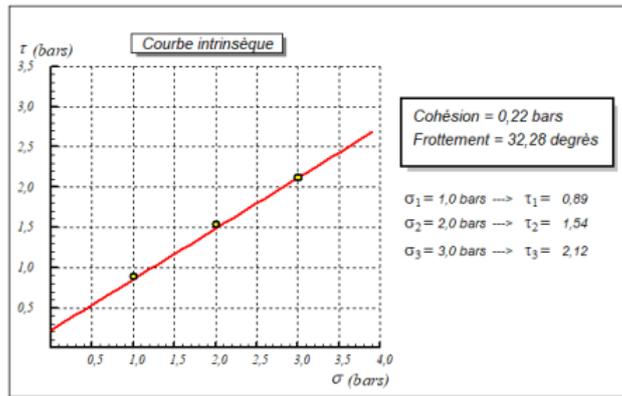


Figure IV.31 Courbe intrinsèque du mélange sable de dune+3% argile

➤ **Sable de dune + 4% Argile**

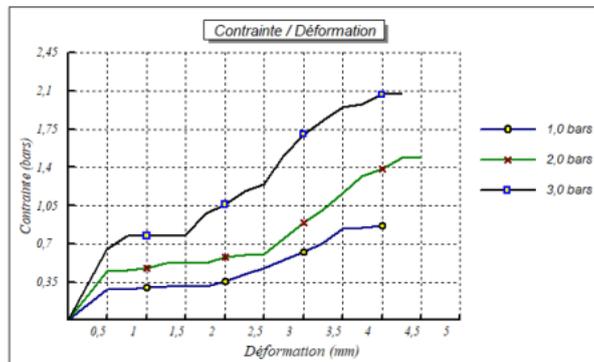


Figure IV.32 Contrainte déformation du mélange sable de dune+ 4 % argile

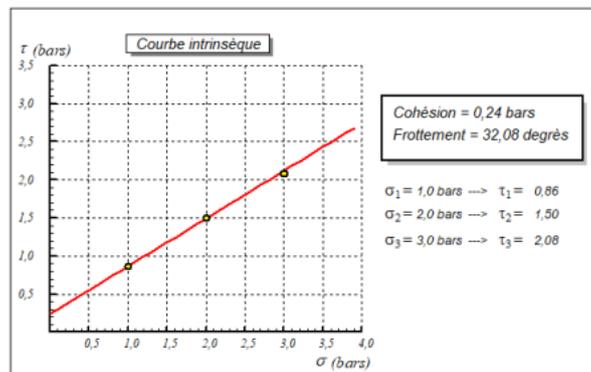


Figure IV.33 Courbe intrinsèque du mélange sable de dune+ 4% argile

➤ **Sable de dune + 5% Argile**

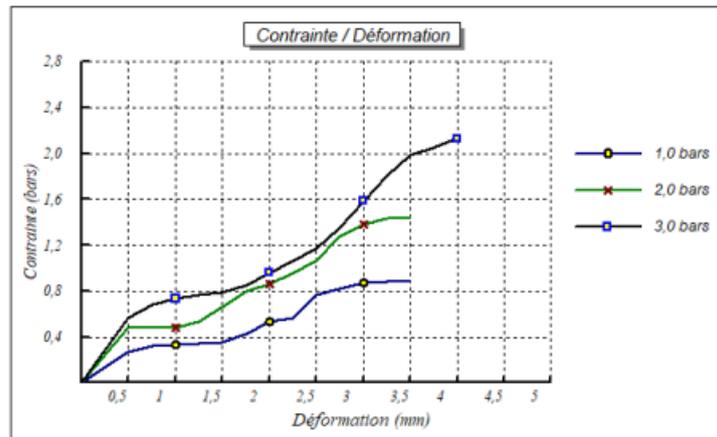


Figure IV.34 Contrainte déformation du mélange sable de dune+5% argile

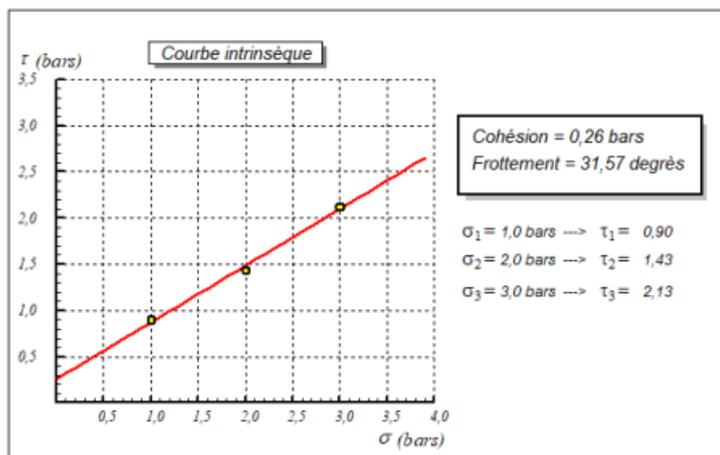


Figure IV.35 Courbe intrinsèque du mélange sable de dune+5% argile

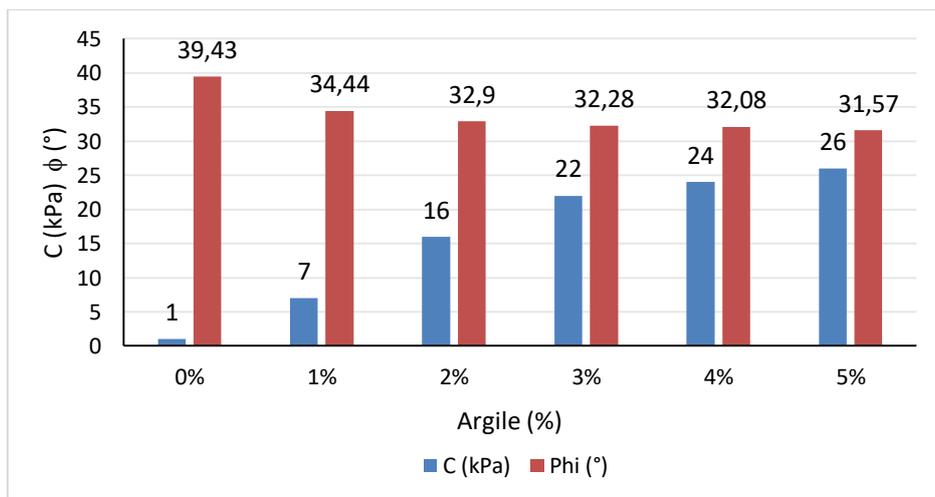


Figure IV.36 Variation des paramètres de résistance mélange sable de dune+argile

La Figure IV.36 présente l'évolution de la cohésion et de l'angle de frottement interne en fonction du pourcentage d'argile ajouté au sable de dune.

Le mélange sable de dune + argile montre une augmentation significative de la cohésion avec l'ajout d'argile, tandis que l'angle de frottement interne diminue

- L'angle de frottement interne mobilisé diminue avec l'augmentation des fines, par contre la cohésion augmente d'une manière significative avec l'augmentation du pourcentage des fine.
- À faible teneur en argile (1-3 %), le mélange gagne rapidement en cohésion sans perdre trop de son frottement ce qui peut être bénéfique pour la portance et la stabilité des ouvrages.
- À plus forte teneur (5 %), la cohésion continue d'augmenter, mais l'angle de frottement diminue, ce qui peut rendre le sol plus sensible à l'eau et à la déformation plastique

IV.4.2.Essai de cisaillement sur le mélange sable de dune + Céramique

L'essai de cisaillement direct a été effectué sur des échantillons de mélange sable de dune et poudre de céramique (UU) à différents pourcentages (2%, 4%, 6% et 8%)

➤ **sable de dune + 2% Céramique**

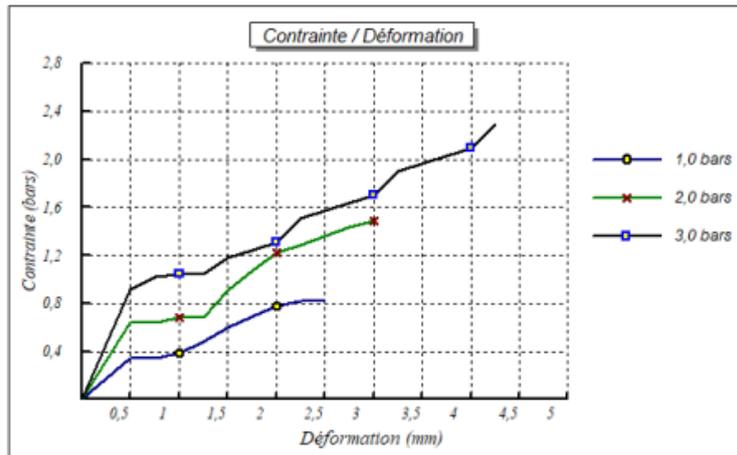


Figure IV.37 Courbe contrainte déformation du mélange sable de dune+2% céramique

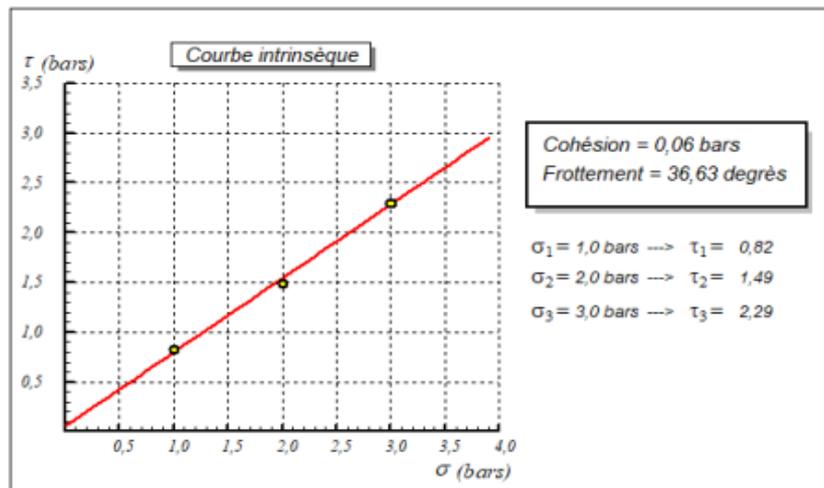


Figure IV.38 Courbe intrinsèque du mélange sable de dune+2% céramique

➤ **Sable de dune + 4% Céramique**

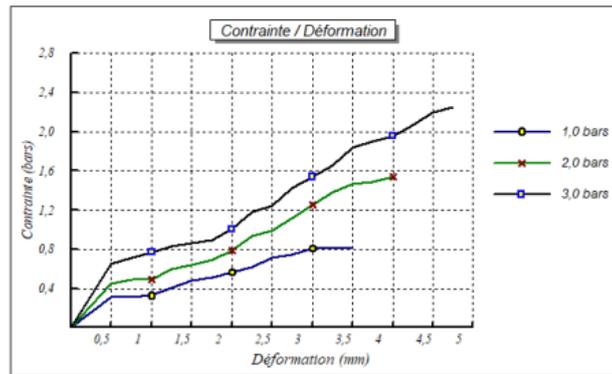


Figure IV.39 Courbe conainte déformation du mélange sable de dune+4% céramique

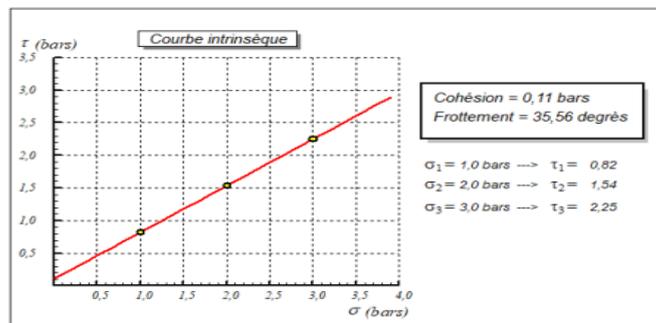


Figure IV.40 Courbe intrinsèque du mélange sable de dune+4% céramique

➤ **Sable de dune + 6% Céramique**

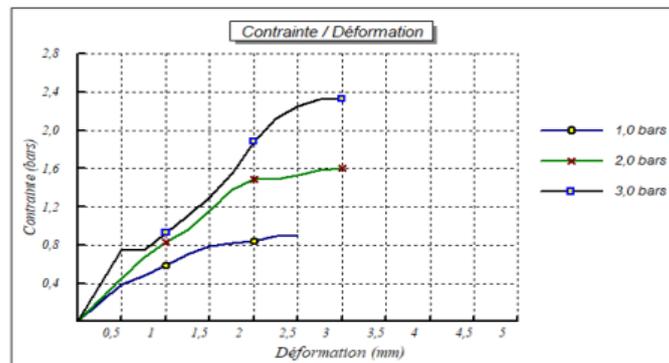


Figure IV.41 Courbe conainte déformation du mélange sable de dune+6% céramique

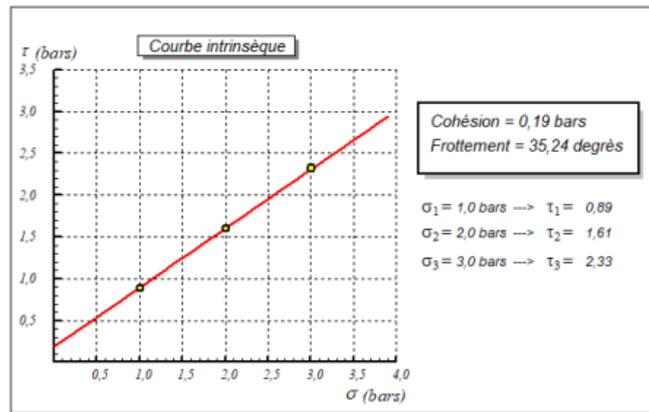


Figure IV.42 Courbe intrinsèque du mélange sable de dune + 6% céramique

➤ **Sable de dune + 8% Céramique**

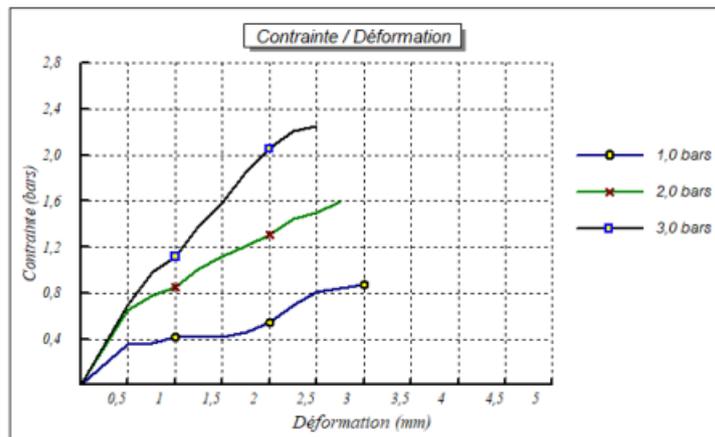


Figure IV.43 Courbe contrainte déformation du mélange sable de dune + 8% céramique

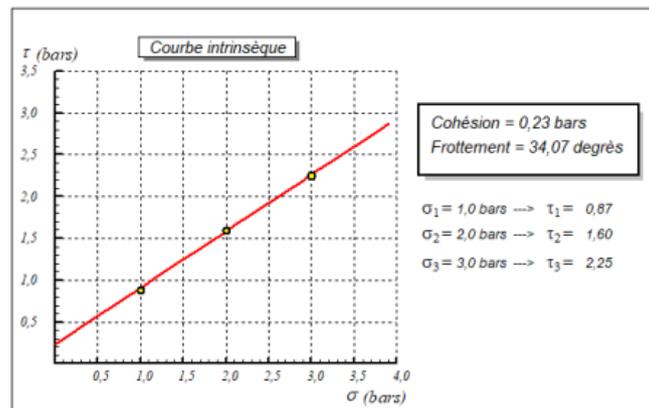


Figure IV.44 Courbe intrinsèque du mélange sable de dune + 8% céramique

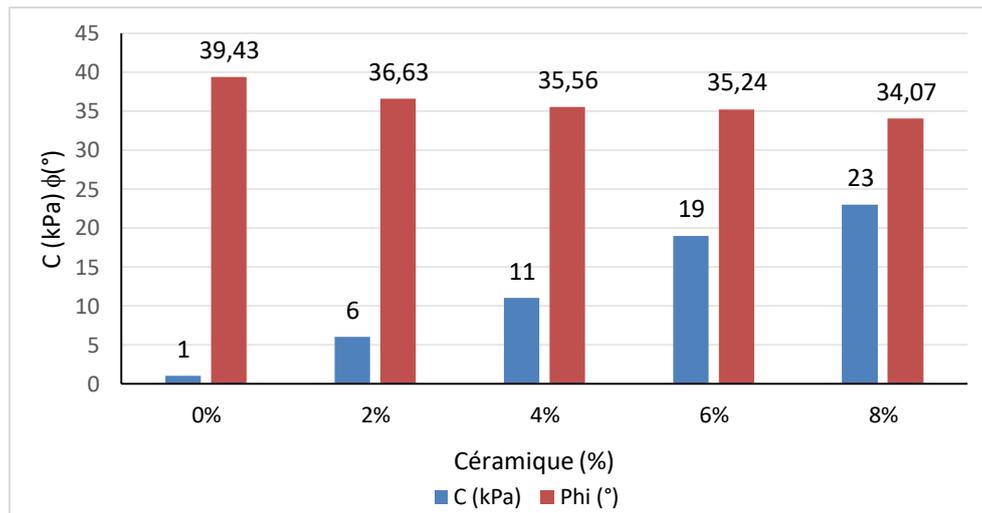


Figure IV.45 Variation des paramètres de résistance du mélange sable de dune+céramique

D'après la figure IV.45, l'angle de frottement diminue avec l'ajout de poudre de céramique de 39.43° à 34.07° . Cependant la cohésion augmente significativement de 1kPa pour 0% de poudre de céramique à 23kPa pour 8% d'ajout.

La poudre de céramique agit comme un liant, conférant une résistance cohésive au sable de dune qui, seul, n'en possède pas. Cela peut être dû un effet de remplissage des particules de céramique plus fines qui remplissent les vides entre les grains de sable, augmentant ainsi la densité et les points de contact, ce qui peut renforcer les forces inter-particulaires.

Ces résultats suggèrent que les mélanges de sable de dune et de poudre de céramique pourraient être utilisés comme matériaux de construction Pour les couches de base routières, les sous-couches, ou les matériaux de remblai où une meilleure stabilité et capacité portante sont souhaitées.

IV.4.3.Essai de cisaillement sur le mélange sable de dune + Argile + Céramique

L'essai de cisaillement direct est réalisé sur des échantillons de mélange sable de dune, (4%) argile et poudre de céramique à différents pourcentages (2%, 4%, 6% et 8%). Les résultats des essais sont présentés ci-après :

➤ **Sable de dune + 4% Argile + 2% Céramique**

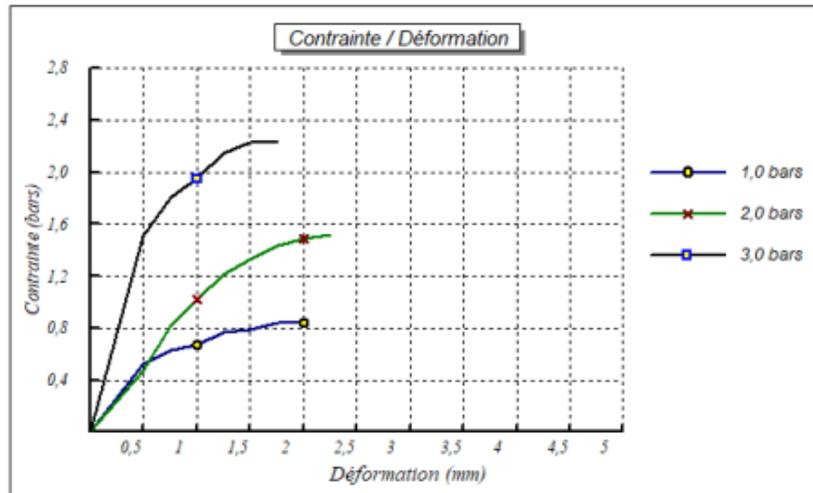


Figure IV.46 Courbe contrainte déformation du mélange sable de dune+ 4% argile + 2% céramique

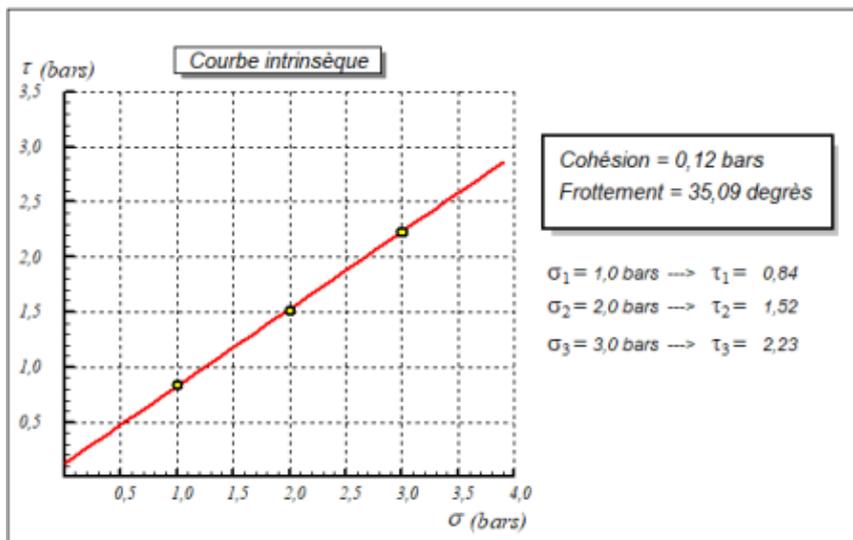


Figure IV.47 Courbe intrinsèque du mélange sable de dune+4% argile+ 2% céramique

➤ **Sable de dune + 4% Argile + 4% Céramique**

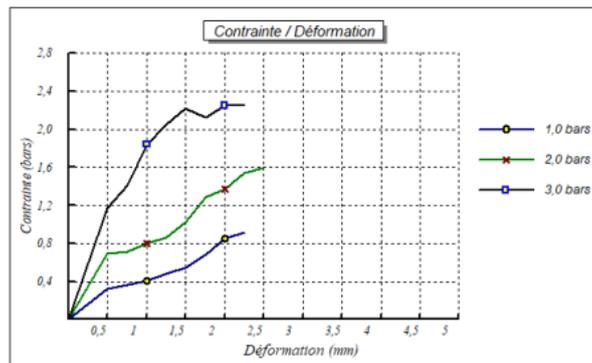


Figure IV.48 Courbe contrainte déformation du mélange sable de dune+ 4% argile + 4% céramique

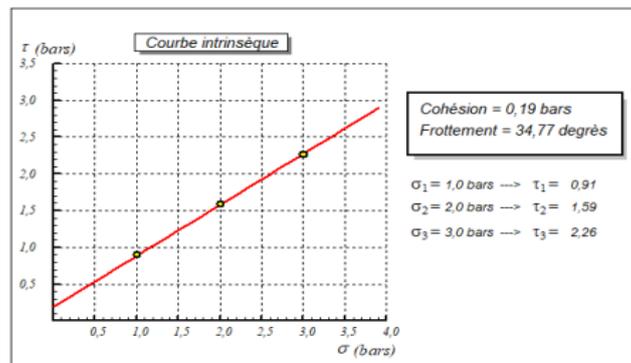


Figure IV.49 Courbe intrinsèque du mélange sable de dune+4% argile+ 4% céramique

➤ **Sable de dune + 4% Argile + 6% Céramique**

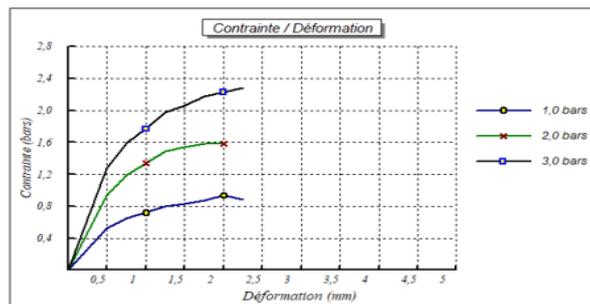


Figure IV.50 Courbe contrainte déformation du mélange sable de dune+ 4% argile + 6% céramique

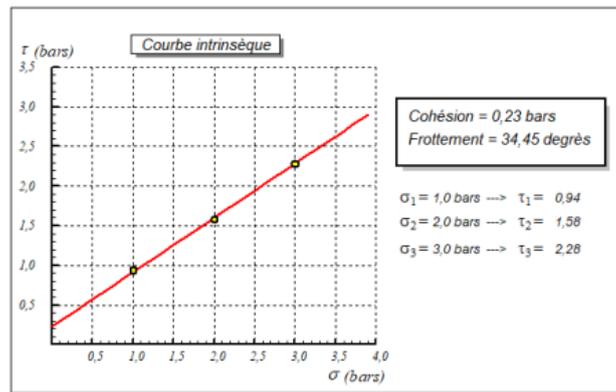


Figure IV.51 Courbe intrinsèque du mélange sable de dune+4% argile+ 6% céramique

➤ **Sable de dune + 4% Argile + 8% Céramique**

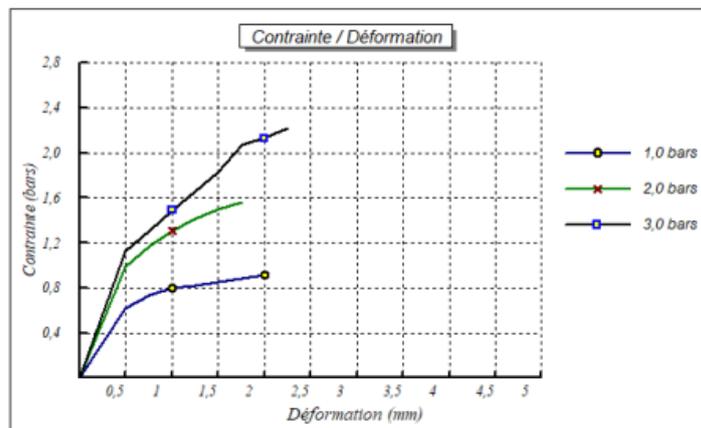


Figure IV.52 Courbe contrainte déformation du mélange sable de dune+ 4% argile + 8% céramique

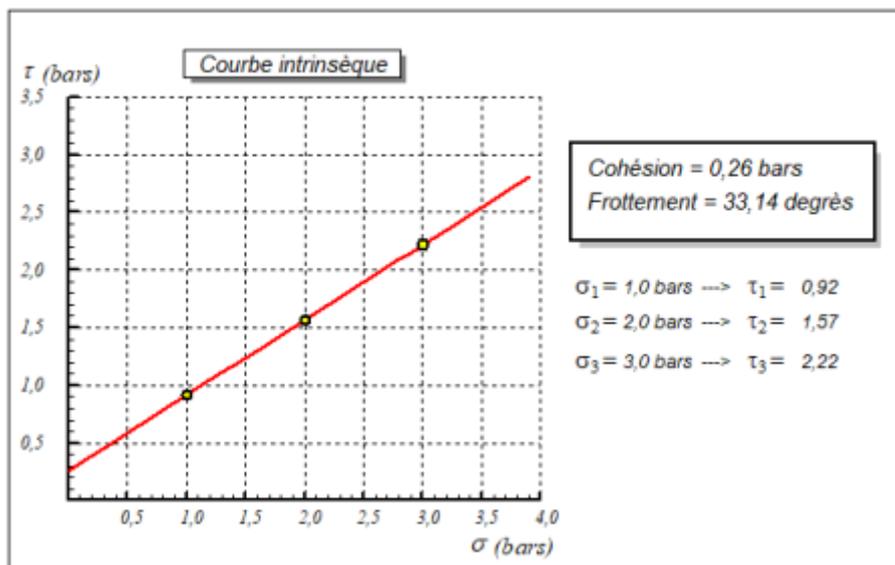


Figure IV.53 Courbe intrinsèque du mélange sable de dune+4% argile+ 8% céramique

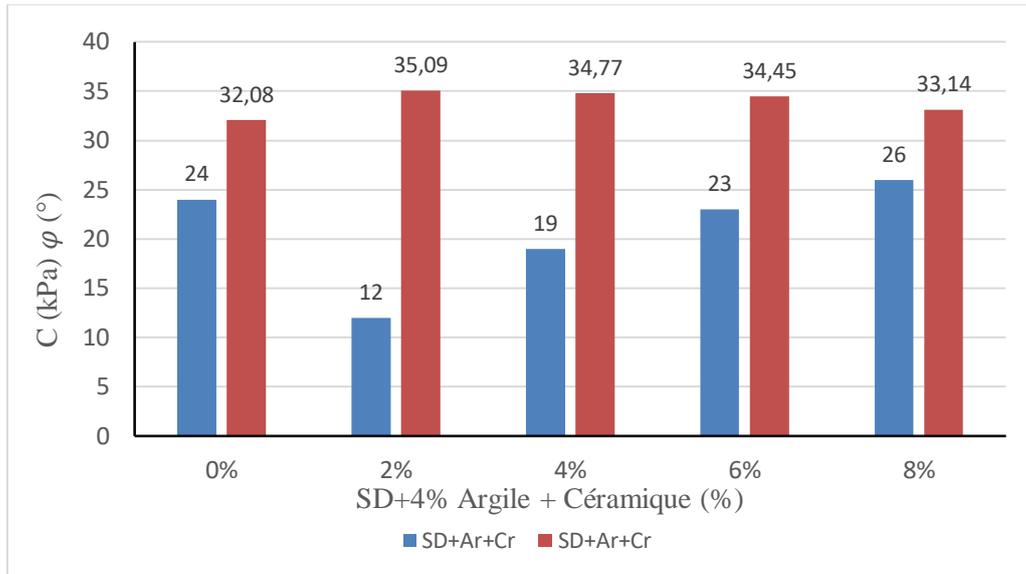


Figure IV.54 Variation des paramètres de résistance du mélange sable de dune + argile + céramique

D'après la Figure IV.54, à 0% de poudre de céramique, la présence de 4% d'argile améliore déjà la cohésion du sable de dune. L'ajout de poudre de céramique à ce mélange continue d'accroître la cohésion, suggérant une association entre l'argile et la céramique pour stabiliser le sable de dune.

L'ajout de poudre de céramique au mélange sable de dune + 4% argile améliore la cohésion (atteignant 26 kPa à 8% de céramique). La combinaison argile + céramique est bénéfique pour la cohésion maximale.

L'ajout de céramique au mélange sable de dune + 4% argile montre une légère variation de l'angle de frottement autour de 33-35°, restant inférieur à celui du sable de dune seul.

L'objectif principal de l'ajout de céramique et d'argile au sable de dune est de lui conférer une cohésion. La cohésion est considérablement augmentée, transformant le sable de dune d'un matériau purement frottant en un matériau cohésif-frottant

IV.5.Synthèse des résultats

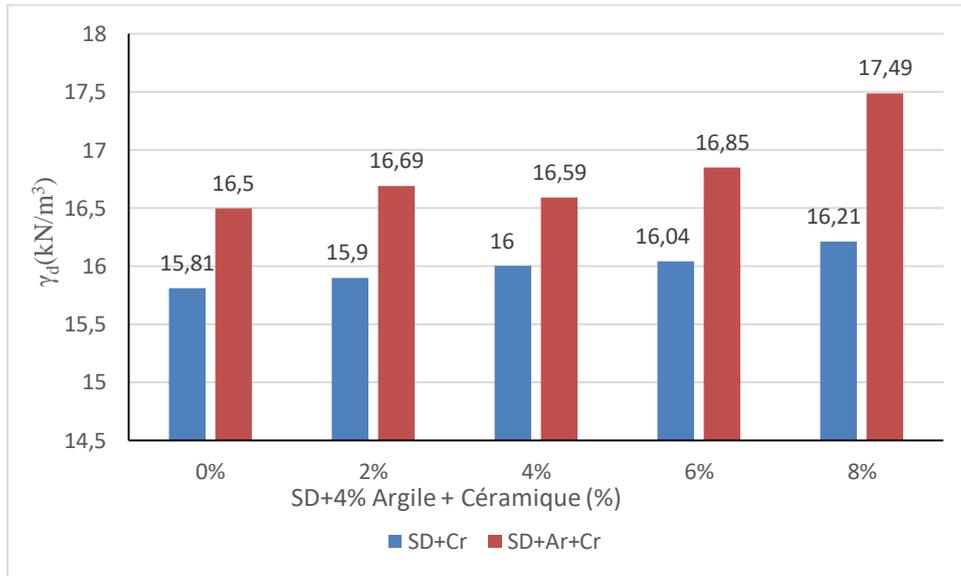


Figure IV.55 Variation de la densité sèche des mélanges (SD+Cr) et (SD+ 4%Ar+%Cr)

D'après la Figure IV.55, l'ajout de poudre de céramique au sable de dune seul tend à augmenter sa densité sèche. Cela est probablement dû au fait que les fines particules de céramique remplissent les vides entre les grains de sable, conduisant à un meilleur empilage et donc à une densité plus élevée du mélange.

L'ajout de 4% d'argile au sable de dune seul augmente la densité sèche de manière significative. L'argile, en tant que matériau fin, est très efficace pour remplir les vides intergranulaires du sable, ce qui conduit à un compactage plus efficace et une meilleure densité. Le mélange optimal en termes de la densité sèche est le mélange (SD + 4% Argile + 8% Céramique) (17,49 kN/m³).

L'argile et la céramique agissent toutes deux comme des fines qui optimisent l'empilage du sable.

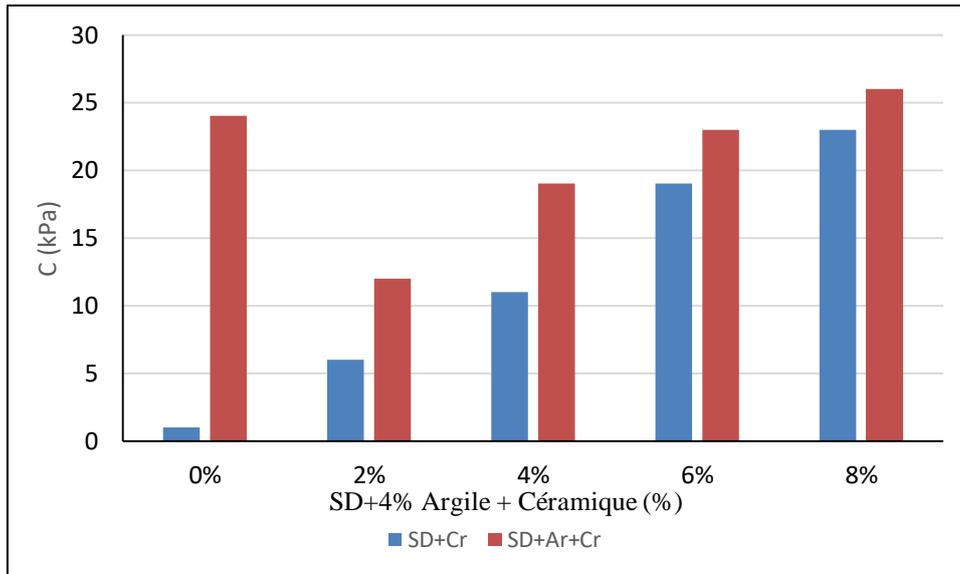


Figure IV.56 Variation de la cohésion en fonction des mélanges (SD+Cr) et (SD+4%Ar+%Cr)

D'après la figure IV.56, L'ajout de poudre de céramique au sable de dune entraîne une augmentation progressive et significative de la cohésion. La poudre de céramique agit comme un agent liant efficace pour le sable de dune. Les fines particules de céramique remplissent les vides entre les grains de sable, augmentant ainsi les forces inter-granulaire. Cela transforme le sable de dune d'un matériau presque purement frottant en un matériau ayant une cohésion mesurable.

L'ajout de 4% d'argile a transformé le sable de dune en un matériau fortement cohésif (24 kPa). Son influence est plus immédiate et plus forte que celle de la céramique à faibles pourcentages.

À faibles pourcentages de céramique (2% et 4%), l'ajout de céramique à un mélange sable-argile a perturbé la cohésion initialement très élevée apportée par l'argile seule.

Cependant, à des pourcentages plus élevés de céramique (8%), la céramique renforce encore la cohésion du mélange sable-argile, atteignant la valeur maximale de 26 kPa.

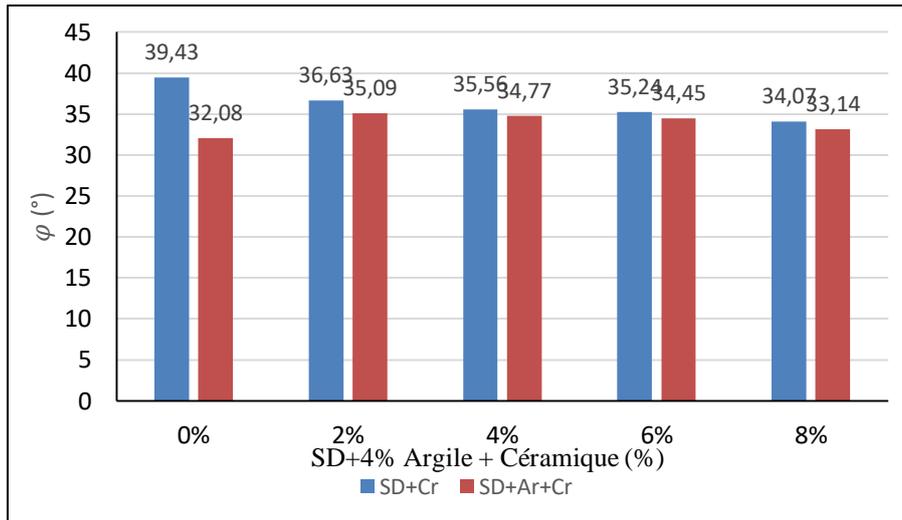


Figure IV.57 Variation de l'angle de frottement en fonction des mélanges (SD+Cr) et (SD+4%Ar+%Cr)

D'après la figure IV.57, L'ajout de poudre de céramique au sable de dune entraîne une diminution progressive et régulière de l'angle de frottement. L'ajout de 4% d'argile au sable de dune réduit l'angle de frottement initial (de 39,43° à 32,08°).

L'ajout de 2% de céramique au mélange sable-argile fait augmenter légèrement l'angle de frottement (de 32,08° à 35,09°). A faible dosage, la céramique aide à optimiser le remplissage des vides dans la matrice sable-argile, améliorant l'efficacité du frottement.

Pour le mélange (SD+4% Ar+%Cr), une légère amélioration initiale de l'angle de frottement à 2% de céramique par rapport au mélange sable-argile sans céramique.

L'argile à 4% a un impact plus significatif sur la réduction de l'angle de frottement que la céramique seule à faibles pourcentages.

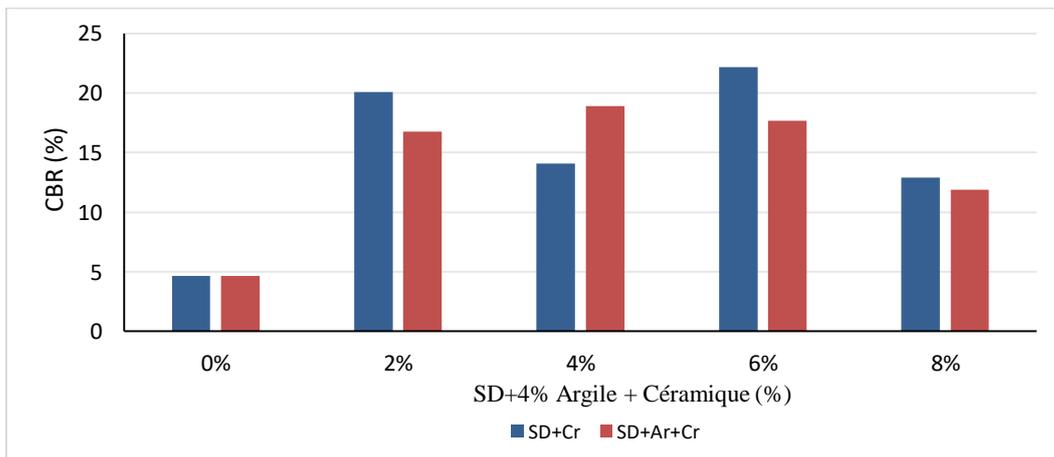


Figure IV.58 Variation de la valeur CBR en fonction des mélanges (SD+Cr) et (SD+4%Ar+%Cr)

D'après la Figure IV.58, À 0% de céramique (sable de dune seul), le CBR est faible, environ 4,5%. C'est une valeur typique pour un sable non cohésif et indique une faible capacité portante.

L'ajout de poudre de céramique améliore considérablement la capacité portante du sable de dune.

Le dosage optimal de la céramique est 6% pour maximiser la valeur CBR, suggérant qu'au-delà de ce point, un excès de fines pourrait avoir un effet négatif sur la compacité ou le comportement sous charge.

Le mélange (SD+Cr) atteint un CBR maximal de 22% à 6% de céramique et le mélange (SD+Ar+Cr) atteint un CBR maximal de 18,8% à 4% de céramique.

Le mélange (SD+Cr) attend des valeurs CBR maximales légèrement supérieures à celles du mélange (SD+Ar+Cr).

L'argile, bien qu'elle améliore la cohésion, n'a pas contribué positivement ou même limiter légèrement la capacité portante maximale que la céramique seule peut atteindre avec le sable.

L'augmentation de la valeur CBR de 4,5% à 22% (SD+Cr) ou 18,8% (SD+Ar+Cr) est d'une importance capitale en génie routier. Un CBR de l'ordre de 20% ou plus est souvent requis pour les couches de forme de qualité ou les couches de fondation de chaussées.

Un CBR plus élevé signifie que le matériau a une meilleure capacité à répartir les charges, ce qui peut potentiellement permettre de réduire l'épaisseur des couches supérieures de la chaussée, conduisant à des économies de coûts

IV.6. Conclusion

Ce chapitre a permis d'évaluer l'influence de l'incorporation de déchets recyclés, notamment de la céramique broyée et du sol argileux, sur les propriétés physiques et mécaniques du sable de dune.

La densité sèche maximale s'est améliorée pour certaines proportions de céramique, tandis que la teneur en eau optimale a globalement augmenté. L'augmentation de la densité sèche indique une meilleure compacité du matériau. Un matériau plus dense est généralement plus stable, moins compressible et a une capacité portante plus élevée.

En résumé, la poudre de céramique agit comme un agent stabilisant pour le sable de dune, principalement en induisant et en augmentant la cohésion, améliorant ainsi ses propriétés de résistance au cisaillement. Cela indique que de tels mélanges pourraient être adaptés à un éventail plus large d'applications dans le génie civil.

Ces mélanges deviennent des matériaux bien plus appropriés pour des applications d'ingénierie civile telles que les couches de forme routières, les remblais, les fondations, où une meilleure stabilité, une meilleure résistance au cisaillement et une diminution de l'érodabilité sont requises. La combinaison sable-argile-céramique offre une solution prometteuse pour valoriser les sables de dune.

En résumé, l'argile et la céramique sont toutes deux efficaces pour améliorer la cohésion du sable de dune.

L'argile fournit une base de cohésion élevée à faible pourcentage. La céramique, en plus de sa propre capacité à augmenter la cohésion, peut, à des dosages plus élevés, combiné avec l'argile pour atteindre des niveaux de cohésion encore supérieurs, rendant le matériau très stable et adapté à diverses applications d'ingénierie où la cohésion est un facteur clé de performance.

En conclusion, l'incorporation de céramique broyée présente un potentiel intéressant pour améliorer les propriétés géotechniques du sable de dune, notamment sa résistance au cisaillement et sa portance. L'ajout de sol argileux, en revanche, nécessite une attention particulière : bien qu'il améliore la cohésion.

Conclusion Générale

Conclusion Générale

Le sable de dune, généralement présent dans de vastes régions désertiques de l'Algérie représente une ressource géologique abondante mais traditionnellement sous-utilisée, voire considérée comme un matériau problématique, dans le domaine du génie civil. Ses caractéristiques intrinsèques, souvent liées à sa granulométrie fine et uniforme et à l'absence de cohésion, limitent son emploi direct dans de nombreuses applications structurelles.

Cependant, face aux défis croissants liés à l'épuisement des agrégats classiques et à la nécessité d'une gestion durable des ressources, la valorisation du sable de dune est devenue un axe de recherche et de développement majeur.

Contrairement aux sables de carrière ou de rivière qui peuvent présenter une certaine angularité et une meilleure gradation, les grains de sable de dune sont souvent arrondis et lisses, réduisant l'inter-engrènement et conférant une cohésion quasi nulle à l'état sec. Sa distribution granulométrique étroite et fine conduit à une faible compacité et à une perméabilité élevée, ce qui affecte directement sa capacité portante et sa stabilité sous charge.

Historiquement, le sable de dune a été utilisé dans des applications très spécifiques ou avec des traitements coûteux. En remblais généraux où la capacité portante n'est pas critique, ou pour le nivellement de terrains. En raison de sa perméabilité, il peut servir de couche drainante ou de filtre.

Le sable de dune, autrefois relégué à des usages très limités, est en passe de devenir une ressource stratégique pour le génie civil. Grâce à des techniques de stabilisation innovantes, notamment l'utilisation de déchets recyclés comme la poudre de céramique et l'argile, il est possible de surmonter ses lacunes intrinsèques.

Ces approches permettent de transformer ce matériau en une ressource précieuse pour la construction de remblais, de couches de chaussée, et d'autres infrastructures, ouvrant la voie à des pratiques plus durables, économiques et respectueuses de l'environnement dans le secteur du bâtiment et des travaux publics.

L'objectif principal de ce travail est d'évaluer l'effet de l'ajout de déchet de céramique (sous forme de poudre) et de l'argile sur les propriétés géotechniques de sable de dune.

L'ensemble des essais réalisés démontre que l'incorporation de poudre de céramique issue de déchets recyclés, seule ou en combinaison avec une faible proportion d'argile, constitue une méthode très efficace pour améliorer significativement les propriétés géotechniques du sable de dune.

Les résultats obtenus à travers la campagne expérimentale ont mis en évidence plusieurs points importants :

- L'ajout de poudre de céramique confère une cohésion substantielle au sable de dune, agissant comme un liant.
- La présence de 4% d'argile apporte une cohésion très élevée au sable de dune.
- La combinaison argile et poudre de céramique a légèrement perturber cette cohésion initiale à faibles pourcentages de céramique et la renforcer davantage à des dosages plus élevés de céramique, atteignant les valeurs de cohésion maximales observées. Cette

capacité à attribuer de la cohésion est fondamentale pour la stabilité des remblais et des fondations.

- L'introduction de fines (argile et céramique) a réduit légèrement l'angle de frottement en modifiant l'engrènement des grains.
- L'ajout de poudre de céramique au sable de dune entraîne une diminution progressive de l'angle de frottement et l'ajout de 4% d'argile au sable de dune réduit l'angle de frottement initial
- L'incorporation de pourcentages minimal (2%) de céramique au mélange sable-argile a amélioré légèrement l'angle de frottement en optimisant le remplissage des vides.
- Une augmentation significative de la cohésion compense largement cette perte en termes de résistance au cisaillement globale, surtout sous faibles contraintes.
- L'ajout de céramique au sable de dune, et encore plus au mélange sable-argile, a permet d'atteindre des densités sèches plus élevées
- L'incorporation de poudre de céramique entraîne une augmentation de la valeur CBR. Cet indice, décisifs pour la conception des chaussées et la stabilité hydromécanique, atteignent des valeurs très significatives

L'étude a également montré que la combinaison entre la poudre céramique et l'argile permettait de tirer parti des avantages de chacun: la céramique améliorant la structure granulaire, et l'argile jouant un rôle de liant actif qui comble les vides et améliore la liaison entre les grains de sable. Ces matériaux fins agissent comme des liants augmentant la cohésion, la densité et la capacité portante (CBR),

En conclusion, l'utilisation de la poudre de céramique, un déchet industriel, en combinaison avec l'argile, offre une solution durable et économiquement viable pour la valorisation du sable de dune. Cette alliance entre les deux types de fines permet d'atteindre des propriétés mécaniques et hydriques qui transforment un matériau local de faible valeur en un matériau performant, adapté à une large gamme d'applications en génie civil, notamment pour les couches de forme routières, les remblais et les fondations.