

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



Université de Ghardaïa

N° d'ordre :
N° de série :

Faculté des Sciences et Technologies
Département de Génie Civil et Hydraulique

Mémoire présenté en vue de l'obtention du diplôme de

MASTER

Domaine : Sciences et Technologies

Filière : Génie Civil

Spécialité : Structures

Par : Kacem ZEGAOU

Thème

**STABILISATION CIMENTAIRE ET RENFORCEMENT PAR FIBRES
DE POLYPROPYLENE D'UN SABLE DUNAIRE : OPTIMISATION
DES DOSAGE ET ANALYSE DES PROPRIETES MECANQUES**

Soutenu publiquement le : 18/09/2025

Devant le jury :

D^r DAHEUR Hadj Guesmia

MCA

Univ. Ghardaïa

Président

M^r CHERIF Miloud

ingénieur

C T C. Ghardaïa

Examineur

Mr DEMDEUME Abd Allah

MCB

Univ. Ghardaïa

Encadreur

Année universitaire 2024/2025

DÉDICACES

Je dédie ce modeste travail

À la mémoire de mon père, que Dieu lui fasse miséricorde.

À tous les membres de ma grande famille, en particulier ma mère, mes frères et sœurs et leurs familles, chacun par son nom.

Et spécialement à ma petite famille : mon épouse, mes fils

Daoud et Mehsein, et ma fille Maria.

À tous mes collègues d'études et de travail, en particulier mon collègue Salim.

Et à tous mes amis.



REMERCIEMENTS

Avant tout, je remercie Dieu Tout-Puissant de m'avoir accordé le courage et la santé nécessaires pour mener à bien ce modeste projet.

Je remercie mon encadrant, Dr. Abdellah DEMDOUM, qui n'a ménagé aucun effort pour m'apporter une aide précieuse, me permettant ainsi d'avancer dans ce projet malgré les difficultés rencontrées. Il a été un excellent encadrant. Je lui suis également reconnaissant pour toutes les ressources qu'il a mises à ma disposition, ainsi que pour le temps précieux qu'il a consacré à des discussions fructueuses qui ont enrichi mes connaissances sur ce sujet.

Je tiens également à exprimer ma profonde gratitude à mes éminents professeurs du département de génie civil, qui ont été de précieux mentors tout au long de mon parcours universitaire. Leur expérience et leurs connaissances m'ont permis d'acquérir de solides bases théoriques et pratiques, essentielles à la réalisation de ce projet.

Je remercie également sincèrement l'ensemble du personnel du Laboratoire des Travaux Publics du Sud du Pays, du directeur aux agents de sécurité, et en particulier le chef du département des Matériaux, pour les installations mises à ma disposition, ainsi que pour les ressources, les conseils et les connaissances qu'ils m'ont prodigués afin de mener à bien ce projet. Je ne peux pas non plus oublier d'adresser mes remerciements à tous ceux qui m'ont aidé directement ou indirectement à mener à bien ce modeste travail.

Zegaou kacem

ملخص

تبحث هذه الدراسة في استغلال رمل الكثبان من منطقة غرداية بالجزائر من خلال تثبيته بالأسمنت (0 إلى 12%) وتعزيزه بألياف البولي بروبيلين (PP) (0 إلى 0.75%)، بهدف تحسين خصائصه الميكانيكية وقدرته على التحمل. تم إجراء اختبارات قص مباشر (بدون توحيد وبدون تصريف [UU] و مع توحيد و تصريف [CD]) ونسبة التحمل الكاليفورنية (CBR) (فورية ومنقوعة). تُظهر نتائج اختبارات UU أن الرمل غير المعالج يتمتع بزاوية احتكاك ظاهرة ϕ_{UU} تبلغ 30° وتماسك ظاهري C_{UU} يبلغ 1.65 كيلو باسكال، مع سلوك تمددي. إضافة الأسمنت تزيد من أقصى مقاومة القص (τ_{max}) بنسبة 28% عند 6% و 9%، و 29-32% عند 12%، بفضل تعزيز الاحتكاك بين الحبيبات. ألياف PP تُحدث سلوكًا انكماشياً، مما يعزز التماسك بنسبة تصل إلى 100% عند 0.25% PP، مع ϕ_{UU} يصل إلى 38.2° عند 0.50% PP. اختبارات CBR تكشف عن CBR فوري 96% و CBR منقوع 124% لـ (SD12C0.50PP) + 0.50% PP، مع زيادة 902% في الوضع المنقوع مقارنة بالرمل غير المعالج (12.32%). في اختبارات CD على الخلطات المثلى، تتفوق خلطات 6% و 12% C + 0.50% PP ($\phi' \approx 41^\circ$)، $c' \approx 0$ كيلو باسكال) على الرمل النقي ($\phi' = 30-35^\circ$)، بينما يقل أداء 9% C ($\phi' \approx 34.8^\circ$)، $c' = 2.9$ كيلو باسكال). الألياف تُحسن الأداء عند 0.50%، مع انخفاض عند 0.75% بسبب الجرعة الزائدة. تؤكد هذه النتائج فعالية خليط 12% C + 0.50% PP (SD12C0.50PP) للبنية التحتية، مع تحسين المقاومة الهيدروليكية.

المفاتيح

نسبة تحمل كاليفورنيا CBR، القص المباشر، التماسك، زاوية الاحتكاك، رمال الكثبان الرملية.

Résumé

Cette étude explore la valorisation du sable dunaire de la région de Ghardaïa, en Algérie, par une stabilisation au ciment (0 à 12 %) et un renforcement avec des fibres de polypropylène (PP) (0 à 0,75 %), visant à optimiser ses propriétés mécaniques et sa capacité portante. Des essais de cisaillement direct (UU, CD) et de CBR (immédiat, imbibé) ont été réalisés. Les résultats des essais UU révèlent que le sable non traité présente un angle de frottement apparent ϕ_{UU} de 30° et une cohésion apparente C_{UU} de 1.65 kPa, avec un comportement dilatant. L'ajout de ciment augmente la résistance maximale au cisaillement (τ_{max}) de 28 % à 6 % et 9 %, et de 29-32 % à 12 %, grâce à des frottements intergranulaires. Les fibres PP induisent un comportement contractant, avec une augmentation de la cohésion jusqu'à 100% à 0.250 % PP, et ϕ_{UU} atteignant 38.2° à 0.50 % PP. Les essais CBR révèlent un ICBR immédiat de 96 % et un ICBR imbibé de 124% pour 12 % C + 0.50 % PP (avec une augmentation de 902 % en imbibé par rapport à 12.32% pour sable non traité). Dans les essais CD sur les mélanges optimaux, les mélanges à 6 % et 12 %C + 0.50 % PP prévalent ($\phi' \approx 41^\circ$ et $c' \approx 0$ kPa) par rapport au sable pur ($\phi' = 30-35^\circ$), tandis que 9 % C est moins performant ($\phi' \approx 34.8^\circ$ $C' = 2.9$ kPa). Les fibres améliorent à 0.50 %, avec une diminution à 0.75 % en raison d'un surdosage. Ces résultats confirment l'efficacité du mélange 12%C + 0.50 % PP (SD12C0.50PP) pour les infrastructures avec une résistance hydraulique améliorée.

Mots-clés

CBR, Cisaillement direct, Cohésion, Angle de frottement, Sable dunaire.

Abstract

This study investigates the enhancement of dune sand from the Ghardaïa region in Algeria through stabilization with cement (0 to 12%) and reinforcement with polypropylene (PP) fibers (0 to 0.75%), aiming to optimize its mechanical properties and bearing capacity. Direct shear tests (unconsolidated undrained [UU] and consolidated drained [CD]) and California Bearing Ratio (CBR) tests (unsoaked and soaked) were conducted. UU test results indicate that untreated sand exhibits an apparent friction angle ϕ_{UU} of 30° and an apparent cohesion C_{UU} of 1.65 kPa, displaying dilative behavior. The addition of cement increases the maximum shear strength (τ_{max}) by 28% at 6% and 9%, and by 29-32% at 12%, attributed to enhanced intergranular friction. PP fibers induce contractive behavior, boosting cohesion by up to 100% at 0.25% PP, with ϕ_{UU} reaching 38.2° at 0.50% PP. CBR tests reveal an unsoaked CBR of 96% and a soaked CBR of 124% for 12% C + 0.50% PP, reflecting a 902% increase in soaked conditions compared to untreated sand's 12.32%. In CD tests on optimal mixtures, those with 6% and 12% C + 0.50% PP predominate ($\phi' \approx 41^\circ$, $c' \approx 0$ kPa), outperforming pure sand ($\phi' = 30-35^\circ$), while 9% C underperforms ($\phi' \approx 34.8^\circ$, $c' = 2.9$ kPa). Fibers optimize at 0.50%, with a decline at 0.75% due to overdosing. These findings validate the efficacy of the 12% C + 0.50% PP (SD12C0.50PP) mixture for infrastructure, offering improved hydraulic resistance.

Keywords

CBR, Direct shear, Cohesion, Angle of internal friction, Dune sand.

Table des matières

DÉDICACES.....	I
REMERCIEMENTS.....	II
ملخص.....	III
المفاتيح.....	III
RESUME.....	V
MOTS-CLES.....	V
ABSTRACT.....	VI
KEYWORDS.....	VI
LISTE DES FIGURES	IX
LISTE DES TABLEAUX.....	XI
INTRODUCTION GENERALE.....	1
CHAPITRE 1 SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE	3
1.1 INTRODUCTION.....	3
1.2 CONTEXTE SAHARIEN ALGÉRIEN.....	3
1.2.1 Sol support	4
1.3 REGION DE GHARDAÏA.....	4
1.3.1 Contexte géographique et Climatiquement	4
1.3.2 Types de sols.....	5
1.4 SABLES DE DUNES	6
1.4.1 Définition	6
1.4.2 Formation et localisation des sables de dunes	7
1.5 CARACTERISTIQUES DU SABLE DUNAIRE ET SES APPLICATIONS	8
1.5.1 Caractéristiques physicochimiques.....	8
1.5.2 Caractéristiques mécaniques.....	10
1.6 IMPORTANCE DU SABLE DE DUNE	11
1.6.1 Les dimensions financières.....	11
1.6.2 Les subtilités techniques	11
1.7 PRINCIPALES LIMITATIONS EN GEOTECHNIQUE.....	12
1.8 STABILISATION ET RENFORCEMENT DES SOLS.....	13
1.8.1 Stabilisation.....	13
1.8.1.1 Stabilisation au ciment.....	14
1.8.1.1.A Effet Sur les paramètres de compactage.....	14
1.8.1.1.B Effet sur l'indice de portance CBR	15
1.8.1.1.C Effet sur la résistance au cisaillement	16
1.8.2 Renforcement.....	18
1.8.2.1 Renforcement par des fibres	20
1.8.2.1.A Effet Sur les paramètres de compactage.....	20
1.8.2.1.B Effet sur l'indice de portance CBR	21
1.8.2.1.C Effet sur la résistance de cisaillement	22
1.8.3 Combinaison de la stabilisation et du renforcement.....	24
1.9 CONCLUSION	28
CHAPITRE 2 MATERIAUX ET METHODES EXPERIMENTALES	28

2.1	INTRODUCTION.....	28
2.2	MATERIAUX ET EQUIPEMENT	28
2.2.1	<i>Sable de dune</i>	<i>28</i>
2.2.1.1	Analyse granulométrique.....	28
2.2.1.2	Limites d'Atterberg.....	30
2.2.1.3	Équivalent de sable	31
2.2.1.4	Poids volumique des grains solides.....	32
2.2.1.5	Essai Proctor Normal	32
2.2.1.6	Poids volumique apparent.....	33
2.2.1.7	Recapitulatif des essais d'identification	34
2.2.2	<i>Fibres de polypropylène (PP)</i>	<i>35</i>
2.2.2.1	Définition.....	35
2.2.2.2	Avantages spécifiques.....	35
2.2.2.3	Caractéristiques des Fibres Polypropylène (PP) utilisé.....	36
2.2.3	<i>Ciment</i>	<i>36</i>
2.3	METHODES EXPERIMENTALES	37
2.3.1	<i>Préparation du mélange</i>	<i>37</i>
2.3.2	<i>Essais de compactage.....</i>	<i>39</i>
2.3.3	<i>Essais CBR.....</i>	<i>39</i>
2.3.3.1	Principe de l'essai.....	40
2.3.3.2	Exécution du poinçonnement.....	41
2.3.3.3	Matériel de poinçonnement.....	42
2.3.4	<i>Essais de résistance au cisaillement.....</i>	<i>42</i>
2.3.4.1	Description de la Boîte de Casagrande	43
2.3.4.2	Préparation des échantillons.....	44
2.3.4.3	Contraintes verticales.....	44
2.3.4.4	Vitesse de cisaillement.....	44
2.4	CONCLUSION	45
CHAPITRE 3	COMPORTEMENT DE COMPACTAGE	46
3.1	INTRODUCTION.....	46
3.2	CARACTÉRISTIQUES DE COMPACTAGE	46
3.2.1	<i>Effet de la teneur en fibres PP</i>	<i>46</i>
3.2.2	<i>Effet de la teneur en ciment.....</i>	<i>47</i>
3.2.3	<i>Effet des teneurs en ciment et en fibres PP.....</i>	<i>48</i>
3.3	EFFET DU CIMENT ET DE LA FIBRE PP SUR LES PARAMETRES DE COMPACTAGE	49
3.3.1	<i>Poids volumique sec maximal ($\gamma_{d,max}$).....</i>	<i>49</i>
3.3.2	<i>Teneur en eau optimale w_{opt} (%).....</i>	<i>50</i>
3.3.3	<i>Indice des vides et degré de saturation au poids volumique sec maximal.....</i>	<i>51</i>
3.4	CONCLUSION	54
CHAPITRE 4	COMPORTEMENT MECANIQUE DES MELANGES SD_xC_yPP.....	56
4.1	INTRODUCTION.....	56
4.2	LA RESISTANCE AU CISAILLEMENT	56
4.2.1	<i>Résistance au cisaillement du sable de dune (UU)</i>	<i>56</i>
4.2.2	<i>Résistance au cisaillement du sable de dune traité au ciment (UU)</i>	<i>57</i>
4.2.3	<i>Résistance au cisaillement du sable de dune renforcé par fibres PP (UU).....</i>	<i>59</i>
4.2.4	<i>Résistance au cisaillement du sable de dune traité avec 6% de ciment et renforcé (UU)</i>	<i>60</i>
4.2.5	<i>Résistance au cisaillement du sable de dune traité avec 9% de ciment et renforcé (UU)</i>	<i>62</i>
4.2.6	<i>Résistance au cisaillement du sable de dune traité avec 12% de ciment et renforcé (UU).....</i>	<i>64</i>
4.2.7	<i>Recapitulatif des essais de cisaillement UU</i>	<i>65</i>

4.3	LA PORTANCE CBR.....	66
4.3.1	<i>Effet du ciment et des fibres sur CBR immédiat.....</i>	66
4.3.2	<i>Effet du ciment et des fibres sur CBR imbibé.....</i>	68
4.3.3	<i>Recapitulatif des essais CBR.....</i>	69
4.4	RESISTANCE AU CISAILLEMENT (CD)	71
4.5	CONCLUSION	74
CONCLUSION GENERALE		75
REFERENCES.....		77
ANNEXES.....		81

Liste des Figures

Figure 1:1 Topographie du Maghreb (Hadjiat, 1997 cité par (Daheur, 2019)).	4
Figure 1:2 Localisation de la région de Ghardaïa (cartes par Google Earth et Google Map).	5
Figure 1:3 Dépôts éoliens dans un désert : (a) Sable de dune (“Dépôt éolien : définition et explications,” n.d.) ; (b) Grains de sable du désert de Gobi (“Bouillons de Cultures,” 2014)	7
Figure 1:4 Répartition des sables de dune dans le monde (Cherrak Née Boulkhiout, 2003)	7
Figure 1:5 Couches de chaussées (“Vos routes - Un entretien régulier pour des chaussées saines,” n.d.)	13
Figure 1:6 Courbe de compactage Proctor normal (Kutanaei and Choobbasti, 2015).	14
Figure 1:7 Effet de l'ajout de ciment sur l'indice CBR imbibé d'un sol latéritique et d'un sable	15
Figure 1:8 Variation du CBR en fonction de la teneur en ciment 3%.	16
Figure 1:9 Courbe d'évolution du CBR après immersion en fonction de la teneur en Ciment et en Chaux.	16
Figure 1:10 Courbes de contrainte de cisaillement – déplacement de cisaillement et déplacement vertical – déplacement de cisaillement (avec pression de confinement de 150kPa).	17
Figure 1:11 Evolution de la résistance maximale en fonction de la teneur en ciment pour un	18
Figure 1:12 Applications du sol renforcé par des fibres : (a) un mur de soutènement, (b) une	19
Figure 1:13 Mécanisme des interactions mécaniques interfaciales entre les particules du sol et la fibre : (a) orientation perpendiculaire à la surface de cisaillement ; (b) fibre orientée à l'angle (Gray and Ohashi, 1983).	19
Figure 1:14 (a). Mise en place de fibres avec le sol, (b). Répartition et compactage des fibres sur le terrain Projet PGBT situé dans la région de Dallas, Texas (Gregory, 2006).	20
Figure 1:15 Changements de CBR pour des échantillons d'argile renforcée avec différentes teneurs en fibres (Nataraj and McManis, 1997)	21
Figure 1:16 Valeurs CBR du sol sablonneux pour différents pourcentages et longueurs de fibres de coco	22
Figure 1:17 Relations entre la contrainte de cisaillement et le déplacement horizontal pour des éprouvettes sèches non renforcées et renforcées, cisailées sous différentes contraintes normales.	23
Figure 1:18 Évolution de C et ϕ selon la teneur en fibres (Prabakar and Sridhar, 2002).	24
Figure 1:19 Variations de la résistance au cisaillement des sables de Chlef et de Rass renforcés en fonction de la teneur et de la longueur des fibres (Bouaricha et al., 2017).	24
Figure 1:20 Augmentation en pourcentage du CBR en fonction des teneurs en ciment et en fibres (Kalantari et al., 2012)	25
Figure 1:21: Relations contrainte-déformation de 5% de ciment traitée l'argile de Kaolin avec 0% et 0,5% de fibres (Nguyen et al., 2016).	26
Figure 1:22 Image SEM (a) spécimens cimentés avec une teneur en ciment de 6 %, (b) sable cimenté renforcé par des fibres avec 6 % de ciment et 0,6 % de fibres (Kutanaei and Choobbasti, 2015).	27
Figure 2:1 Localisation du dépôt de sable dunaire (Daia Ben Dahoua- Ghardaïa).	28
Figure 2:2 Analyse granulométrique par tamisage	29
Figure 2:3 Courbe de distribution granulométrique du sable.	29
Figure 2:4 Divers états du sol fin (Demdoum, 2019).	30
Figure 2:5 Principe d'essai d'équivalent de sable par piston (BENTASSA and SAADI, 2023).	31
Figure 2:6 Appareillage spécifique pour l'essai Proctor.	32
Figure 2:7 Moule Proctor Normal avec la dame.	33
Figure 2:8 Courbe Proctor normal du sable dunaire	33
Figure 2:9 Types des fibres polypropylène (PP).	35
Figure 2:10 Préparation du mélange sable-fibres (PP).	39
Figure 2:11 Moule de compactage avec échantillon Sable-PP compacté	39
Figure 2:12 Moule CBR et la presse marshall.	40
Figure 2:13 États de rupture et critère de Mohr-Coulomb représentés dans le plan de Mohr.	43
Figure 2:14 Un échantillon coupé	43
Figure 2:15 Dispositif de cisaillement directe	44
Figure 3:1 Courbes Proctor normal des mélange SDyPP.	46
Figure 3:2 Courbes Proctor normal des mélange SDxC.	47

Figure 3:3 Courbes Proctor normal des mélange (a)SD6CyPP, (b)SD9CyPP et (c)SD12CyPP.	49
Figure 3:4 Variation du poids volumique sec maximal du sable dunaire en fonction de la teneur en fibres et en ciment.....	50
Figure 3:5 Teneur en eau optimale selon les teneurs en Ciment et en Fibres PP.	51
Figure 3:6 Variation de l'indice des vides e en fonction des teneurs en ciment et en fibres PP.	52
Figure 3:7 Variation du degré de saturation (S_r) en fonction des teneurs en ciment et en fibres PP.	53
Figure 4:1 Résistance au cisaillement (UU) de sable de dune : (a) Relation Contrainte de cisaillement-déplacement (b) Plan de Mohr-Coulomb.....	57
Figure 4:2 Relation contrainte de cisaillement-déplacement de sable de dune traité au ciment (a) 6%C, (b) 9%C et (c) 12%C	57
Figure 4:3 Courbes intrinsèques du sable traité au ciment.....	58
Figure 4:4 Variation de la cohésion et de l' angle de frottement en fonction de la teneur en ciment	58
Figure 4:5 Relation contrainte de cisaillement-déplacement de sable de dune renforcé par (a) 0.25%PP, (b) 0.50%PP et (c) 0.75%PP.....	59
Figure 4:6 Courbes intrinsèques du sable renforcé par fibre PP	60
Figure 4:7 Variation de la cohésion et de l' angle de frottement en fonction de la teneur en fibre.....	60
Figure 4:8 Relation contrainte de cisaillement-déplacement de sable de dune traité avec 6% ciment	60
Figure 4:9 Courbes intrinsèques du sable traité avec 6% ciment et renforcé par fibre PP	61
Figure 4:10 Variation de la cohésion et de l' angle de frottement en fonction de la teneur en fibre.....	61
Figure 4:11 Relation contrainte de cisaillement-déplacement de sable de dune traité avec 9% ciment	62
Figure 4:12 Courbes intrinsèques du sable traité avec 9% ciment et renforcé par fibre PP	63
Figure 4:13 Variation de la cohésion et de l' angle de frottement en fonction de la teneur en fibre.....	63
Figure 4:14 Relation contrainte de cisaillement-déplacement de sable de dune traité avec 12% ciment	64
Figure 4:15 Courbes intrinsèques du sable traité avec 12% ciment et renforcé par fibre PP	65
Figure 4:16 Variation de la cohésion et de l' angle de frottement en fonction de la teneur en fibre.....	65
Figure 4:17 Évaluation de l'indice CBR immédiat pour sable de dune amélioré	67
Figure 4:18 L'échantillon de sable traité et/ou renforcé	68
Figure 4:19 Évaluation de l'indice CBR imbibé pour sable de dune amélioré	69
Figure 4:20 Relation contrainte de cisaillement-déplacement des mélanges	72
Figure 4:21 Courbes intrinsèques du sable traité avec 12% ciment et renforcé par fibre PP	73
Figure 4:22 Variation de la cohésion et de l' angle de frottement en fonction de la teneur en fibre.....	73

Liste des Tableaux

Tableau 1:1 Caractéristiques physico-chimique de sables dunaires de différentes régions	9
Tableau 1:2 Caractéristiques mécaniques de sables dunaires de différentes régions.....	11
Tableau 1:3 Limitations du sable dunaire en géotechnique	12
Tableau 1:4 Limites des propriétés pour une stabilisation efficace du ciment	14
Tableau 2:1 Résultats de l'analyse granulométrique du sable dunaire de Ghardaia.	29
Tableau 2:2 Classification des sols en fonction des limites d'Atterberg (SETRA-LCPC 1992)	30
Tableau 2:3 Les limites de consistance.	31
Tableau 2:4 Équivalent de sable du sable dunaire	31
Tableau 2:5 Poids volumique apparent du sable dunaire.....	34
Tableau 2:6 Analyse chimique du sable de dune	34
Tableau 2:7 Propriétés physiques du sable dunaire utilisé	34
Tableau 2:8 Propriétés des fibres Polypropylène (PP) utilisé ("EURL SDC Algérie," n.d.).....	36
Tableau 2:9 Caractéristiques techniques du ciment Matin.....	37
Tableau 2:10 Pourcentage de Ciment et de Fibre PP dans le Sable	38
Tableau 4:1 Synthèse des résultats des essais de cisaillement non consolidé non drainé (UU) sur sable traité et renforcé.....	66
Tableau 4:2 Récapitulatif des indices CBR imbibé et immédiat pour sable de dune amélioré....	70
Tableau 4:3 Synthèse des résultats des essais de cisaillement et de	73

Liste des Abréviations, sigles et symboles

Ce document présente la liste des abréviations, sigles et symboles techniques utilisés tout au long de la mémoire pour garantir la clarté et la cohérence de la terminologie employée.

Abréviations et Sigles

le tableau suivant regroupe les principales abréviations et sigles utilisés dans l'étude:

Abréviation / Sigle	Signification Complète
CBR	California Bearing Ratio (Indice Portant Californien)
CD	Consolidé Drainé (Type d'essai de cisaillement)
C-S-H	Silicate de calcium Hydraté
C3A	Aluminate Tricalcique
ESP	Equivalent de sable au piston
ESV	Equivalent de sable visuel
GTR	Guide des Terrassements Routiers
ICBR	Indice California Bearing Ratio
IP	Indice de plasticité
LCPC	Laboratoire central des ponts et chaussées
LTPS	Laboratoire des Travaux Publics du sud
MCB	Maître de conférences, classe B
MF	Module de Finesse
NF	Norme Française
OPN	Optimum Proctor Normal
PCA	Portland Cement Association
PCC	Pâte de Ciment Compacté
PHD	Doctor of philosophy (Doctorat)
PM	Proctor Modifier
PN	Proctor Normal
PP	Polypropylène
SEM	Microscopie Électronique à Balayage
SP	Sable Propre (mal gradué) - classification USCS

les symboles et notations techniques utilisés pour représenter les grandeurs physiques et les paramètres géotechniques sont définis ci-dessous:

symbole	Description
$\gamma_d \text{ max}$	Poid volumique sec maximale
W_{opt}	Teneur en eau optimale
τ_{max}	Résistance maximale au cisaillement
ϕ_{uu}	Angle de frottement apparent (essai UU)
C_{uu}	Cohésion apparente (essai UU)
ϕ'	Angle de frottement effectif (essai CD)
C'	Cohésion effective (essai CD)
G_s	Densité spécifique des grains solides
C_u	Coefficient d'uniformité (granulométrie)
C_c	Coefficient de courbure (granulométrie)
D_r	Densité relative
e	Indice des vides
S_r	Degré de saturation
σ_v	Contrainte normale totale
kpa	Kilopascal (unité de pression/contrainte)

Introduction générale

Lors d'un projet de construction, on peut s'attendre à rencontrer des sols faibles ou inadaptés ; il faut donc trouver les solutions les plus efficaces et les plus rentables dans de telles situations. Plusieurs solutions correctives sont disponibles lorsqu'un projet de construction est planifié dans des endroits où des sols faibles et inadaptés sont rencontrés. L'une des techniques efficaces et fiables pour améliorer le comportement du sol est le renforcement du sol. Cette technique est utilisée dans de nombreuses structures et projets, tels que les structures de soutènement, les travaux de terrassement, les remblais et la stabilisation de la plate-forme sous la semelle et la chaussée.

Le Sahara s'étend sur environ 80 % du territoire Algérien, englobant notamment le Grand Erg, un ensemble de formations dunaires qui, à elles seules, couvrent 20 % de sa superficie. Les sables dunaires, qui constituent une ressource géologique majeure dans ces régions, suscitent un intérêt croissant pour leur exploitation potentielle dans divers projets d'infrastructure. Leur disponibilité à grande échelle et leurs propriétés granulométriques spécifiques en font un matériau de construction stratégique aux stabilisations de sols et aux ouvrages géotechniques en milieu aride. Cette valorisation s'inscrit dans une logique d'optimisation des ressources locales, tout en nécessitant des études préalables sur leur comportement mécanique et leur durabilité face aux contraintes climatiques extrêmes.

Ce travail vise à valoriser les sables dunaires dans les infrastructures et les travaux génie civil. Ainsi, la connaissance et le recensement des types de sols disponibles localement permettent de proposer des projets dont les coûts sont compatibles avec les économies des pays en développement.

Organisation du mémoire :

Ce mémoire a été organisé en quatre chapitres :

Le *Chapitre 1* offre une revue bibliographique complète sur les caractéristiques des sables dunaires et les méthodes conventionnelles de stabilisation au ciment et de renforcement par des fibres.

Le *Chapitre 2* décrit les matériaux utilisés (sable de dune, ciment, fibres de polypropylène) et détaille la méthodologie expérimentale adoptée pour la préparation des mélanges et la réalisation des essais.

Le *Chapitre 3* présente et discute les résultats des essais de compactage Proctor normal, en analysant l'effet de la teneur en ciment et en fibres sur les paramètres de compactage.

Le *Chapitre 4* est consacré à l'analyse des essais mécaniques. Il évalue la résistance au cisaillement (UU, CD) et la capacité portante CBR (immédiat, imbibé) des différents mélanges en fonction des teneurs en ciment et en fibres.

La Conclusion Générale synthétise les principaux résultats de l'étude, propose des recommandations et ouvre des perspectives pour des travaux futurs.

Chapitre 1 Synthèse Bibliographique

1.1 Introduction

Les caractéristiques mécaniques inadaptées de sable de dune ont toujours posé des problèmes aux ingénieurs civils lors de la conception des ouvrages géotechniques. Pour éviter ces problèmes de manière rentable, des solutions appropriées et fiables doivent être développées. Le renforcement par fibres et la stabilisation au ciment sont les méthodes les plus efficaces et courantes dans les applications de génie géotechnique lorsque les ingénieurs sont confrontés à des conditions de sol problématiques. Ces méthodes peuvent être utilisées dans différentes applications, telles que les couches de base, les murs de soutènement et les pentes.

Ce chapitre présente les études récentes relatives à l'amélioration des caractéristiques mécaniques des sols sableux à l'aide de ciment et/ou de fibres.

1.2 Contexte Saharien Algérien

L'Algérie se divise, en fonction de la géologie, de la lithologie et de la topographie, en trois grandes unités structurales (Figure 1:1) :

- ❖ ***Le Système Tellien*** : C'est un ensemble constitué par une succession de massifs montagneux, côtiers et sublittoraux, et de plaines.
- ❖ ***Les Hautes Plaines Steppiques*** : Localisées entre l'Atlas Tellien au Nord et l'Atlas Saharien au Sud, à des altitudes plus ou moins importantes de 900 à 1200 m, elles sont parsemées de dépressions salées, chotts ou sebkhas qui sont des lacs continentaux formés au Pléistocène sous l'effet des pluies torrentielles et du ruissellement important qui en découle.
- ❖ ***Le Sahara*** : est un immense espace désertique, aride et peu peuplé, il couvre plus de $\frac{3}{4}$ de la superficie du territoire algérien. Le Sahara forme une large plate-forme qui sépare le domaine méditerranéen au Nord du domaine tropical au Sud. Il est constitué de plateaux (hamadas et tassili) et des boucliers où le massif volcanique du Hoggar culmine à 3 000m d'altitude, de plaines (regs et ergs) et de dépressions (sebkhas et gueltas).

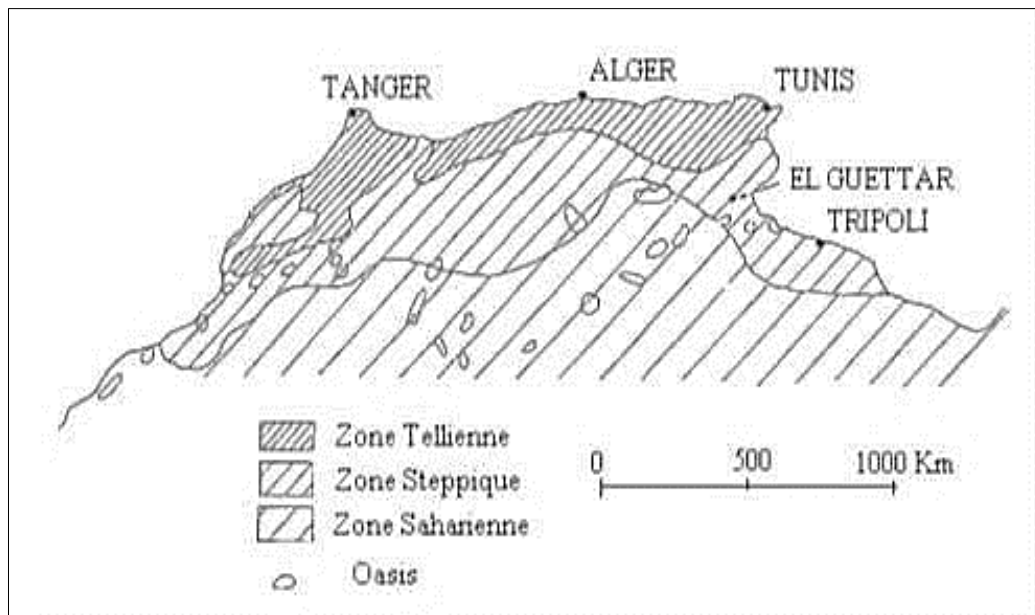


Figure 1:1 Topographie du Maghreb (Hadjiat, 1997 cité par (Daheur, 2019)).

1.2.1 Sol support

La couverture de la zone saharienne est constituée dans sa quasi-totalité de matériaux du Quaternaire. On rencontre essentiellement des roches, des éboulis, des sables, des limons et des argiles (Dhia, 1997).

Les sols sahariens ne se prêtent pas facilement aux classifications internationales et il est difficile de situer un sol plate-forme à l'égard de son comportement dans une classification descriptive précise. Exceptés les sables de dune qui présentent un indice portant relativement faible (compris entre 7 et 15), les sols sahariens sont caractérisés par une portance satisfaisante, l'indice CBR le plus fréquent est situé au voisinage de 40 ; ce qui, si on devait appliquer la méthode de dimensionnement des chaussées par la méthode des abaques CBR, donnerait une structure minimale forfaitaire. En dehors des zones submersibles, les teneurs en eau sous-chaussée sont de l'ordre de 5 %, ce qui ne favorise pas les déformations plastiques (Daheur, 2019).

1.3 Région de Ghardaïa

1.3.1 Contexte géographique et Climatiquement

La région de Ghardaïa (sud de l'Algérie, 32°29'N 3°41'E) se situe au centre de la partie nord du Sahara Algérien, couvre une superficie d'environ 26 165 km² ("Position géographique," n.d.). Elle s'étend sur environ 130 km du nord au sud et 200 km d'est en ouest. Elle est limitée au nord par la daïra de Berriane, au nord-ouest par le grand Erg Occidental, au sud-ouest par la daïra de Metlili et à l'est par Zelfana (Figure 1:2).

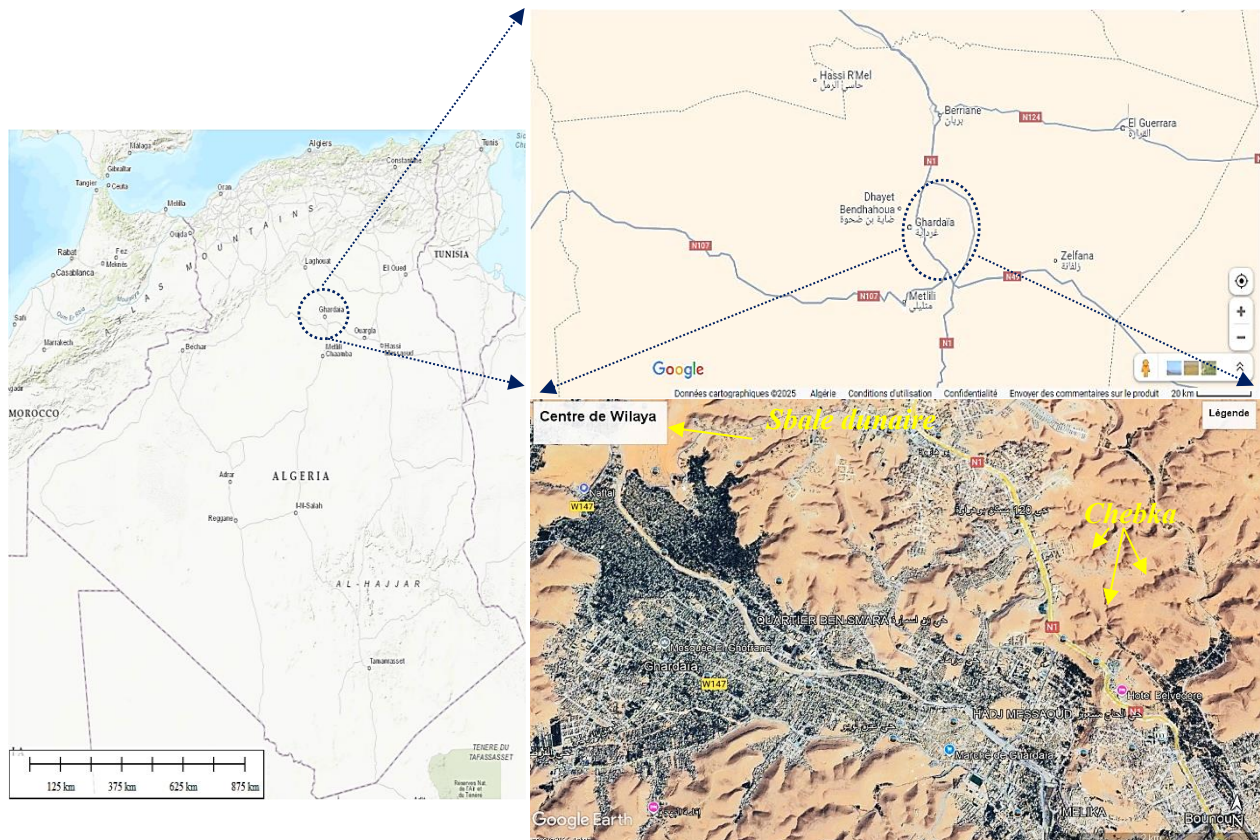


Figure 1:2 Localisation de la région de Ghardaïa (cartes par Google Earth et Google Map).

Consulté le 10/02/2025

Le paysage du centre de Wilaya est dominé par un plateau rocheux appelé la *Hamada*, une vaste étendue pierreuse avec des affleurements de roches brunes et noirâtres. Ce plateau a été fortement érodé par des phénomènes fluviaux au début du Quaternaire, créant des buttes à sommets plats et un réseau de vallées entrelacées appelé la *Chebka* (Figure 1:3), traversé par l'oued M'Zab ("Articles - Présentation générale de la wilaya," n.d.).

Climatiquement, la région de Ghardaïa est soumise à un climat saharien typique, avec des étés très chauds et des hivers doux. La pluviométrie annuelle est faible, autour de 60 mm, tandis que l'évaporation est très élevée, de l'ordre de 2000 à 2500 mm par an. Les précipitations sont sporadiques et souvent sous forme d'averses orageuses. Cette aridité extrême influence fortement les conditions environnementales et la gestion des ressources naturelles (Bensaha et al., 2010).

1.3.2 Types de sols

La répartition des types de sols dans la région de Ghardaïa se caractérise principalement par les éléments suivants (Messaitfa et al., 2024):

- ❖ **Sols loessiques** : La région de Ghardaïa est riche en dépôts de loess, des sols éoliens composés essentiellement de particules fines, avec une granulométrie dominée par 65 à 70 %

de sable fin, 20 à 30 % de limon et moins de 10 % d'argile. Ces sols loessiques, observés notamment dans les sites de Metlili et Daïa Ben Dahoua, contiennent entre 22 % et 44 % de calcite CaCO_3 . Ils sont classés comme sols limoneux peu plastiques et présentent des propriétés géotechniques comparables à celles des loess d'autres régions arides, comme le sud tunisien.

- ❖ **Sols sableux, caillouteux des plateaux et zones désertiques** : Les plateaux autour de Ghardaïa présentent des affleurements de grès et grès-calcaire, avec des sols superficiels composés de cailloux détritiques et de sable dunaire recouverts d'une couche variable de sable éolien. Ces sols sont peu profonds et marqués par l'érosion éolienne.
- ❖ **Sols alluviaux** : Dans les zones de dépression et les bassins fermés, on trouve des sols alluviaux peu évolués, liés aux dépôts récents des cours d'eau. Ces sols sont souvent sableux à texture grossière, avec une faible maturation pédologique, typiques des régions arides et semi-arides du Sahara algérien.
- ❖ **Sols des palmeraies (vallée de Sebseb)** : Les sols dans les palmeraies sont généralement de texture sableuse à structure particulaire, avec un faible taux de matière organique. La qualité physico-chimique de ces sols est influencée par la salinité des eaux d'irrigation, souvent salées, ce qui impacte le pH, la salinité et la capacité d'échange cationique du sol, affectant ainsi la fertilité agricole locale.

Cette répartition reflète l'influence combinée des facteurs climatiques arides, de la géomorphologie locale et des apports éoliens et alluviaux dans la région de Ghardaïa.

1.4 Sables de Dunes

1.4.1 Définition

Les sables, que l'on trouve dans les dunes mouvantes, sont composés de particules siliceuses pratiquement de même taille et de petites dimensions. Ces sables se trouvent dans plusieurs régions du désert accumulés sous forme de dunes mouvantes de hauteur très variable et occupent de vastes territoires dans le Sud algérien (Daheur, 2019). La vitesse et l'intensité des vents sont les deux facteurs responsables du triage granulaire de ces sables, de leur distance de transport et de leur mode d'accumulation (Oldache, 1988) (Figure 1:3).

Le sable est composé de différents minéraux, tels que la silice, les silicates, les carbonates et les argiles (les silicates sont la famille la plus abondante dans la nature, représentant 90% en masse de l'écorce terrestre). Les sables de dunes sont essentiellement des sables siliceux très propres, leur teneur en carbonate et en argile se trouvant sous forme de traces.



Figure 1:3 Dépôts éoliens dans un désert : (a) Sable de dune (“Dépôt éolien : définition et explications,” n.d.) ; (b) Grains de sable du désert de Gobi (“Bouillons de Cultures,” 2014)

1.4.2 Formation et localisation des sables de dunes

Les dépôts de sable éolien couvrent environ 6% de la surface émergée du globe, dont environ 97% se trouvent dans les grandes zones arides. En moyenne, environ 20% des zones arides du monde sont couvertes par des sables éoliens. Les proportions vont de 2% en Amérique du Nord à plus de 30% en Australie, 25% en Afrique et supérieur à 45% en Asie centrale comme montré sur la figure 1:4 (Cherrak Née Boulkhiout, 2003). En Algérie, Les sables de dune se trouvent dans les régions sud et couvrant 60% de la superficie globale (Kettab, 2007).

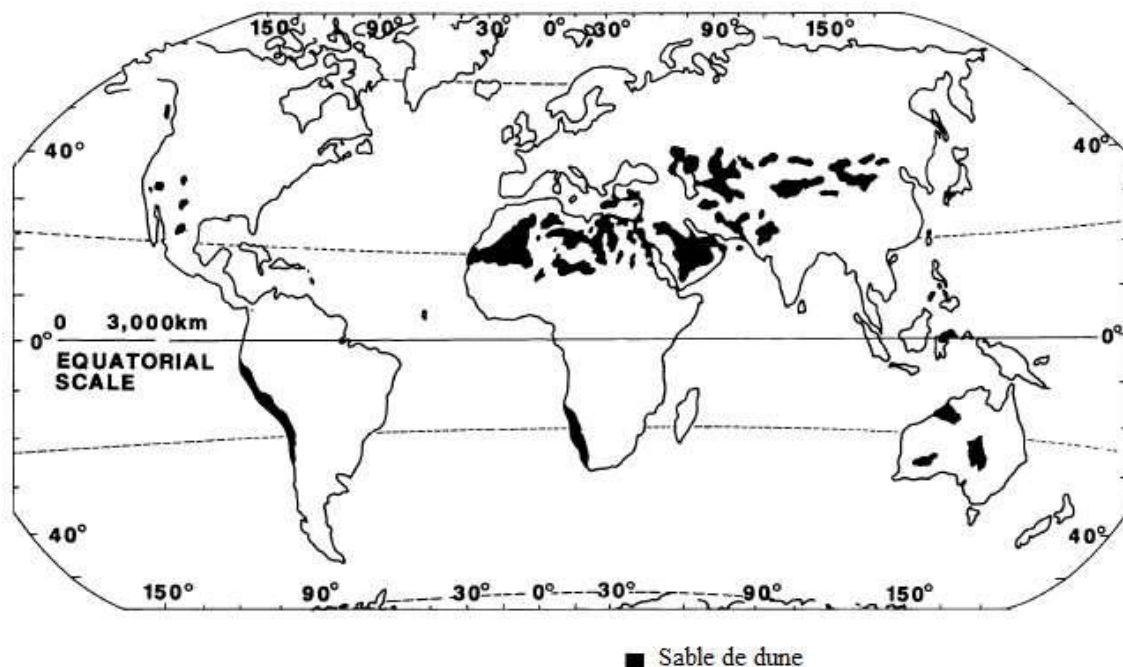


Figure 1:4 Répartition des sables de dune dans le monde (Cherrak Née Boulkhiout, 2003)

D’après plusieurs études réalisées dans les régions sahariennes du pays, les sables de dune ont pour origine la désagrégation des roches sous l’effet conjugué des chocs thermiques et de l’altération des sols constituant les lits d’oueds ou d’anciens fleuves (Lebreton, 1975). L’intensité des

vents de sables et leurs directions ont une action déterminante sur la localisation et l'ampleur des gisements en liaison avec la topographie du terrain.

1.5 Caractéristiques du sable dunaire et ses applications

1.5.1 Caractéristiques physicochimiques

Le Tableau 1:1 compare les caractéristiques physico-chimiques de sables dunaires de six régions algériennes : Hassi Bahbah (El-Masrane), Djelfa (Aïn El-Ibil), Laghouat, Ghardaia, Ouargla et EL Golea. Il montre que :

A. Granulométrie et distribution des particules :

- ❖ La classe granulométrique (0/D) varie de 0/0.3 mm (Ghardaïa) à 0/0.63 mm (Hassibahbah et Laghouat), indiquant des tailles de grains principalement fines à moyennes.
- ❖ Le pourcentage de particules fines ($\Phi \leq 80\mu\text{m}$) est faible, allant de 0% (Djelfa) à 5% (Hassibahbah), ce qui est typique des sables dunaires bien triés par le vent.
- ❖ Les coefficients d'uniformité (Cu) et de courbure (Cc) montrent une certaine variabilité dans la distribution granulométrique. Selon le Guide des Terrassements Routiers (GTR), et du point de vue granulométrique (VBS et % des fines), les sables présentés se classent comme des sables fins à moyens, assimilés aux classes D₁ et B₁. Selon la classification USCS, les sables fournis sont classés comme des sables propres mal gradués (SP).
- ❖ Le module de finesse varie de 0.93 (Ouargla) à 1.47 (Hassibahbah, El Golea), reflétant des différences dans la taille moyenne des grains.

B. Propriétés physiques :

- ❖ La densité apparente s'échelonne de 1400 kg/m³ (Hassibahbah) à 1774 kg/m³ (El Golea). Cela reflète des compacités différentes, liées à la forme des grains et aux conditions de dépôt. La densité absolue reste relativement stable autour de 2600 kg/m³, cohérente avec une composition minéralogique dominée par le quartz.
- ❖ La porosité diminue du nord (Hassibahbah : 46%) au sud (Ghardaïa : 39%), probablement en raison d'une aridité accrue favorisant un compactage naturel. La compacité atteint 61% à Ghardaïa.

C. Les densités sèches maximales et teneurs en eau optimales diffèrent, reflétant des comportements de compactage propres à chaque région. Propriétés chimiques :

- ❖ La composition minéralogique est dominée par le quartz (94-97.6% de SiO₂), avec une proportion variable de carbonate de calcium (1-2.6% de CaCO₃). Teneur maximale de

CaCO₃ à Djelfa (2.6%), liée à des apports calcaires locaux. Un CaCO₃ élevé augmente le pH (alcalinité),

- ❖ Les teneurs en éléments potentiellement "nocifs" (matières organiques, sulfates, chlorures) montrent également des écarts entre les régions.

Tableau 1:1 Caractéristiques physico-chimique de sables dunaires de différentes régions
(Kamel, 2011)(Ghrieb, 2014) (SOUILMI and BEN MOUSSA, 2019) (Daheur, 2019)

Paramètres	Région	Hassibahbah (El-Masrane)	Djelfa (Aïn El-Ibil)	Laghouat	Ghardaïa	Ouargla	EL Golea
Classe (0/D) en mm		0/0.63	0/0.4	0/0.63	0/0.3	0/0.425	0/0.5
% Passant $\Phi \leq 80\mu\text{m}$		5.00	0.00	1.80	2.40	1	1.5
% Passant $\Phi \leq 2\text{mm}$		100	100	100	100	99	99
Coefficient d'uniformité Cu		1.40	1.65	1.7	1.50	1.85	-
Coefficient de courbure Cc		0.71	0.52	1.1	1.33	1.20	-
Valeur de bleu de méthylène VBS		0.09	0.06	0.05	-	0.05	-
Classification USCS		SP	SP	SP	SP	SP	SP
Classification GTR		B ₁	B ₁	B ₁	B ₁	B ₁	-
Module de finesse		1.47	1.28	1.20	1.31	0,93	1.47
Densité apparente (Kg/m ³)		1400	1420	1480	1611	1644	1774
Densité absolue (Kg/m ³)		2580	2600	2630	2645	2627	2570
Porosité (%)		46	45	43	39	42	40
Compacité (%)		54	55	57	61	58	60
Densité sèche max (g/cm ³)		1.67 (PN)	1.63 (PN)	1.92 (PN)	1.67 (PM)	-	-
Teneur en eau optimale (%)		14	17.1	10	7.4	-	-
Propreté	ES _v	74	71	86	97	94	93
	ES _p	57	52	74	89	84	88
Éléments nocifs en (%)	Matière Organiques	1.17	0.76	-	-	-	-
	Sulfates et Sulfures SO ₃	Traces	Traces	0.91	0.39	-	-
	Chlorures	0.85	0.78	0.36	0.036	-	-
Compositions Minéralogique (%)	Quartz SiO ₂	97.63	97.14	95.87	96.25	94.00	95.66
	CaCO ₃	2.50	2.60	2.50	2.4	1.00	1.85

D. Propreté et aptitude à l'utilisation :

- ❖ Les indices de propreté ES_v et ES_p varient largement, de 52-57% (Hassibahbah, Djelfa) à 86-97% (Laghouat, Ghardaïa, Ouargla, El Golea), indiquant des teneurs en fines différents. Ghardaïa (ES_v=97%, ES_p=89%) et Ouargla (ES_v=96%, ES_p=80%) ont les sables les plus "propres", contrairement à Hassibahbah (ES_v=74%).

E. Synthèse par région : Ces variations physico-chimiques auront des conséquences sur les propriétés mécaniques, hydrauliques et la durabilité des sables, devant être prises en compte pour leur application, par exemple :

- ❖ Ghardaia : Meilleur profil global : faible porosité (39%), haute compacité (61%), excellente propreté ($ES_v=97$) et chlorures négligeables (0.036%) → Usage proposé, après vérification des normes et paramètres mécaniques : Bétons de sable et chaussées.
- ❖ EL Golea et Ouargla : Forte densité apparente (1774 kg/m^3) et bonne propreté ($ES_v=93-94$) → Applications proposée, après vérification des normes et paramètres mécaniques : Couches de roulement routières, bétons drainants.
- ❖ Laghouat : Meilleure compactabilité (densité sèche= 1.92 g/cm^3), mais sulfates élevés (0.91%) → Recommandation : Traitement anti-sulfate pour les fondations
- ❖ Hassi Bahbah et Djelfa : Problèmes majeurs : Forts chlorures (0.78-0.85%), faible propreté ($ES_p=52-57$) et granulométrie désavantageuse (Cu trop bas) → Limitations : Inadaptés au béton sans lavage préalable.

Les différences vues dans le tableau 1:1 montrent la variété géologique et environnementale des régions d'où viennent les sables des dunes. Ces variations s'expliquent par plusieurs facteurs clés : La composition minéralogique de la roche-mère varie selon les régions ; L'intensité et la direction des vents dominants dépendent du tri granulométrique et de la forme des grains ; Le climat, les sédiments éoliens et les activités humaines impactent l'altération des sols et la teneur en matières organiques.

1.5.2 Caractéristiques mécaniques

Le tableau 1:2 met en parallèle les caractéristiques mécaniques des sables provenant de trois régions algériennes différentes : Djelfa, Laghouat et Ghardaïa. Il démontre que :

A. Résistance à la compression simple :

- ❖ Les trois régions (Djelfa, Laghouat et Ghardaïa) présentent une résistance à la compression simple nulle (0,00 kPa). Cela indique que ces sables dunaires n'ont pas de cohésion intrinsèque et ne peuvent pas supporter de charges axiales importantes sans se déformer de manière significative.

B. Indice CBR immédiat et imbibé :

- ❖ L'indice CBR (California Bearing Ratio) est un paramètre clé pour évaluer la portance des sols et leur aptitude au compactage pour les applications routières.
- ❖ Le sable de Djelfa a un CBR immédiat de 8,28% et un CBR imbibé (après 4h) de 6,45%. Ces valeurs indiquent une portance limitée, mais acceptable pour des applications routières légères.
- ❖ Les données pour Laghouat sont manquantes, tandis que Ghardaïa présente des CBR plus faibles (6% immédiat, 5% imbibé), révélant une portance encore plus réduite.

Tableau 1:2 Caractéristiques mécaniques de sables dunaires de différentes régions (réalisé par l'étude à partir de Kamel, 2011) (Smaida et al., 2024) (Daheur, 2019)

Région	Djelfa	Laghouat	Ghardaïa
Paramètres			
Compression simple (kPa)	0.00	0.00	0.00
I CBR Immédiat (%)	8.28	-	6.00
I CBR Imbibé (4h) (%)	6.45	-	5.00
Cohésion C_{uu} (kPa)	2.00	13.00	-
Angle de frottement Φ_{uu}° (°)	37	43	-

C. Cohésion apparente (C_{uu}) et l'angle de frottement apparent (Φ_{uu}°) :

- ❖ Le sable de Laghouat a une cohésion non drainée de 13 kPa, ce qui est plus que 2 kPa mesurés pour Djelfa. Cette différence peut s'expliquer par une granulométrie, une compacité ou une cimentation différente.
- ❖ Laghouat présente un angle de frottement (Φ_{uu}°) de 43°, plus élevé que les 37° mesurés pour Djelfa. Cela indique que le sable de Laghouat a une meilleure résistance au cisaillement.

Les propriétés mécaniques, variables entre les régions, reflètent probablement des différences dans la granulométrie, la forme des grains, la minéralogie et la compacité des sables dunaires.

1.6 Importance du sable de dune

L'intérêt d'employer, ce type de sable en génie civil, se manifeste à deux aspects : technique et économique (Sarraf and Imane, 2017) (Daheur, 2019) :

1.6.1 Les dimensions financières

Les avantages sautent aux yeux lorsque l'on considère que l'utilisation du sable de dune permet des économies substantielles dans le transport des matériaux, car il est abondamment disponible en quantité illimitée. De plus, il est quasiment gratuit de l'extraire et il se marie aisément avec les autres matériaux présents sur le chantier, sans occasionner de coûts supplémentaires notables.

1.6.2 Les subtilités techniques

Le sable peut jouer un rôle dans le processus de densification des matériaux. Cela conduit également à l'amélioration de leurs propriétés géotechniques (comme stabilisant) en augmentant le coefficient de frottement interne et en renforçant la capacité portante. Il peut être employé afin de réduire la plasticité des sols argileux.

1.7 Principales limitations en Géotechnique

Le sable de dune, bien qu'abondant dans les régions sahariennes, présente plusieurs limitations importantes qui rendent son utilisation directe problématique dans les travaux géotechniques. Ces limitations intrinsèques nécessitent des traitements spécifiques avant toute utilisation en construction. Les principales limitations à l'utilisation sont présentées dans le tableau 1:3.

Tableau 1:3 Limitations du sable dunaire en géotechnique. (réalisé par l'étudion à partir de : feny,1966 ; Boutiers, 1992 ; et les guides/ normes citées en note)

Paramètre	Valeurs observées	Norme	Problèmes induits
Résistance à la Compression simple	0.00MPa	TRS : > 0.15MPa PCA: > 0.7-2.1MPa à 7jours	Insuffisant pour couches de fondation
Résistance à la traction	0.00MPa	("CT-T70.pdf," n.d.) : $R_t > 0.20 \text{ MPa}$	Insuffisant pour couches de fondation
Portance (I CBR)	5-8.28% (immédiat)	TRS : > 40%	Insuffisant pour couches de fondation
Cohésion (Cuu)	0-13 kPa	GTR-Fascicule 1 - §4.2.3 : Une cohésion ($C_u < 20 \text{ kPa}$) avec module de finesse $MF < 1.5$ nécessitent un traitement avant utilisation en remblai porteur.	Risque de tassement dans les remblais (> 20 mm/an).
Angle de frottement	37°-43°	("NF P94-281," n.d.) : un $\Phi > 45^\circ$ est recommandé pour les talus permanents sans soutènement.	Faible stabilité des pentes
Sensibilité à l'eau	Perte CBR: 5-6.45%	-	Dégradation sous pluie/infiltration

*TRS : Technique Routière Saharienn (Fenzy, 1966); GTR : Guide des Terrassements Routiers (Routiers, 1992) ; California Bearing Ratio (CBR) ; PCA : ("Guide to Cement-Stabilized Subgrade Soils," n.d.).

Concernant le compactage, le sable de dune est très incompact. Les grains sont uniformes et ne s'imbriquent pas correctement pour une compacité optimale. Ensuite, l'indice CBR d'un poids Proctor modifié et une teneur en eau est bas, environ 10%. Ces valeurs ne sont pas conformes aux normes de la fondation ou de l'assiette de chaussée directe.

Alors, le sable de dune affiche des performances mécaniques insuffisantes en matière de stabilité, de compacité et de résistances mécaniques à la compression. Cette limitation d'usage direct interdit ses mises en œuvre fréquente en construction routière et en génie civil. Il est essentiel d'utiliser des liants hydrauliques (ciment, chaux..) ou liants hydrocarbonés (purs ou fluidifiés) pour améliorer ses caractéristiques géotechniques (Ghrieb, 2014).

L'utilisation de ciment comme rigidifiant permet d'améliorer significativement la durabilité dans l'eau et les performances mécaniques du sable de dune. D'autre solution, l'amélioration granulaire par ajout d'autres types de sable ou de matériaux correcteurs est nécessaire pour compenser la granulométrie uniforme du sable de dune (Ghrieb, 2014). Cette approche permet d'obtenir une meilleure distribution granulaire et d'améliorer la compacité du mélange final. De plus , pour

un renforcement interne du sable de dune (amélioration de la cohésion, résistance à la traction, réduction des fissurations), l'ajout de fibres de polypropylène est une solution efficace, économique et facile à mettre en œuvre, surtout dans des mélanges stabilisés avec des liants hydrauliques ("Applications et avantages de l'utilisation de fibres de polypropylène," 2021). Leur efficacité dépend de la bonne dispersion dans le matériau et de la compatibilité avec le liant utilisé.

La réussite de ces applications nécessite une approche méthodique intégrant stabilisation chimique, correction granulaire et/ou renforcement géosynthétique selon l'usage final envisagé.

1.8 Stabilisation et renforcement des sols

La stabilisation et le renforcement sont deux des méthodes les plus conventionnelles pour améliorer les propriétés souhaitées du sol.

1.8.1 Stabilisation

La stabilisation peut être définie comme l'amélioration des caractéristiques naturelles importantes du sol au moyen de méthodes spéciales. La stabilisation mécanique (compactage), physique (vibration), chimique (ciment, chaux..), ou la combinaison d'un sol avec un autre sol, ainsi qu'avec du ciment, de la chaux et du bitume, peut optimiser ses caractéristiques comportementales (Ghrieb, 2014). L'emploi de la stabilisation au ciment dans les couches de forme, de base et de fondation est une pratique répandue dans le domaine de la construction routière (Figure 1:5), ainsi que pour les ouvrages de protection et les remblais sélectionnés (Demdoun et al., 2022).

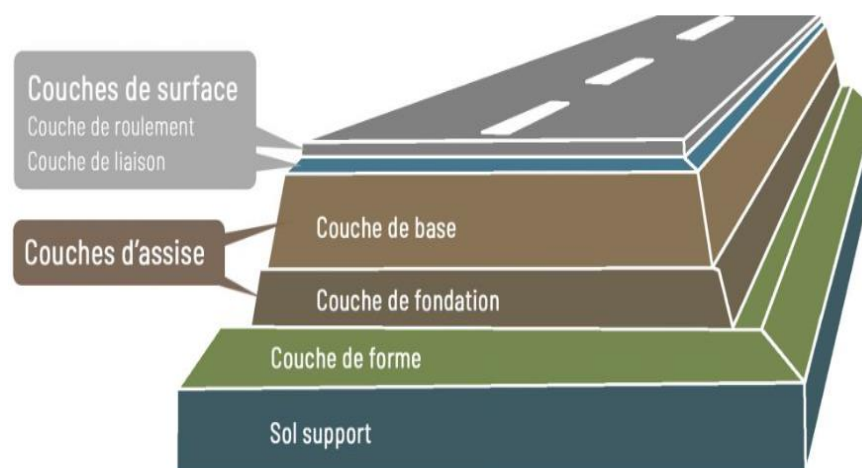


Figure 1:5 Couches de chaussées (source: "Vos routes - Un entretien régulier pour des chaussées saines," n.d.)

1.8.1.1 Stabilisation au ciment

Depuis 1950, des chercheurs ont étudié comment l'ajout de ciment au sol affecte son comportement technique. Le tableau 1.4 présente leurs recommandations relatives des matériaux adaptés à la stabilisation au ciment ("TN-Cement-Stabilisation-Practice.pdf," n.d.).

Tableau 1:4 Limites des propriétés pour une stabilisation efficace du ciment
Source : (TN-cement-stabilisation-practice,s.d)

Propriété	Limite
Taille maximale des grains (mm)	75
Passant 4,75 mm	>50%
Passant 425 μm	>15%
Passant 75 μm	<50%
Plus fines que 2 μm	<30%
Limite de liquidité (%)	<40%
Limite de plasticité (%)	<20%
Indice de plasticité (%)	<20%

1.8.1.1.A Effet Sur les paramètres de compactage

(Kutanaei and Choobbasti, 2015) ont démontré que la densité sèche maximale du mélange sable-ciment augmente proportionnellement à la quantité de ciment présente (Figure 1:6). Cette observation peut être attribuée à la plus petite taille des particules de ciment par rapport à celles du sable, favorisant ainsi le comblement des espaces intergranulaires par le ciment et la formation d'une structure plus compacte et homogène. De plus, il convient de noter que la masse volumique spécifique du ciment est supérieure à celle du sable, ce qui entraîne une augmentation du poids unitaire sec maximal lors de l'incorporation de ciment. En outre, la teneur en eau optimale du mélange sable-ciment a tendance à diminuer avec l'augmentation de la teneur en ciment.

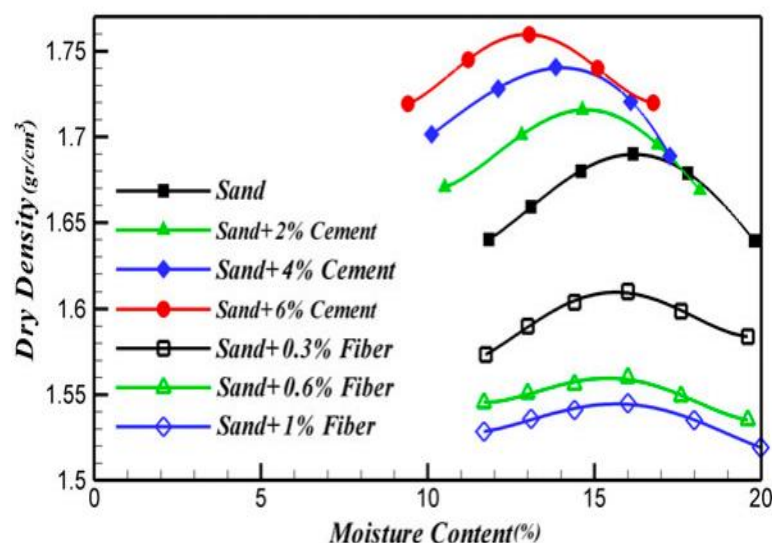


Figure 1:6 Courbe de compactage Proctor normal (Kutanaei and Choobbasti, 2015)

1.8.1.1.B Effet sur l'indice de portance CBR

Le traitement des sols avec du ciment augmente significativement l'indice de portance CBR (California Bearing Ratio), améliorant ainsi la capacité portante des sols pour les applications routières et de fondations (Figure 1:5). Cette amélioration repose sur des mécanismes physico-chimiques complexes qui transforment durablement les propriétés mécaniques des matériaux traités.

(Singh and Kalita, 2013) ont étudié l'indice CBR sur des échantillons de sol non traité, de cendres volantes, de mélanges sol-cendres volantes et de mélanges de sol traités au ciment, dans des conditions non imbibées et imbibées. Deux types de sols ont été utilisés dans l'étude : un sol latéritique résiduel à grain fin et un sable de rive. Ce sable est classé SP (sable fin mal gradué). L'ajout de ciment a varié jusqu'à 3 % du poids sec du sol. L'ajout de ciment a augmenté le CBR de manière continue pour les deux mélanges de sol, par exemple l'ajout de 2% de ciment au sable a fait passer le CBR de 11.0 à 27.4. Ceci est dû au fait que l'hydratation du ciment forme un gel de silicate de calcium hydraté (C-S-H) qui lie les particules du sol et contribue au développement de la résistance (Figure 1:7).

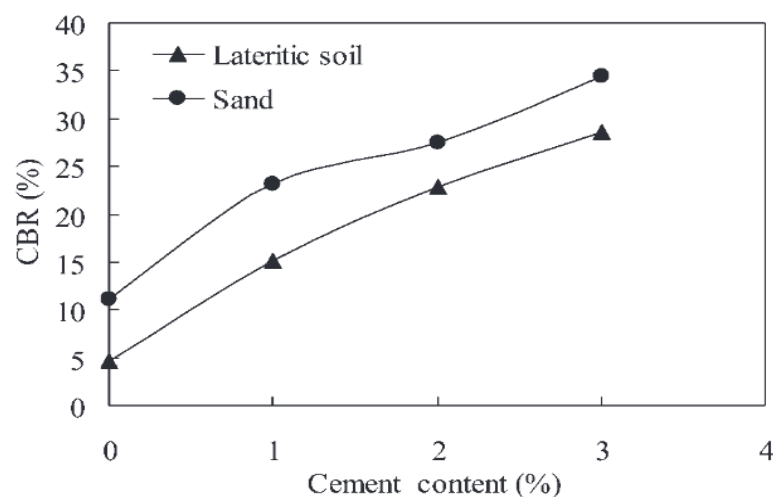


Figure 1:7 Effet de l'ajout de ciment sur l'indice CBR imbibé d'un sol latéritique et d'un sable

Les résultats d'une étude sur sol-ciment révèlent que l'indice CBR passe de 42% pour le sol non traité à 92% avec 2% de ciment, puis 205% avec 2.5% de ciment, 215% avec 3% de ciment et 235% avec 3.5% de ciment (Figure 1:8). Cette progression démontre l'efficacité croissante du traitement avec l'augmentation du dosage ("ETS MSSZ," n.d.).

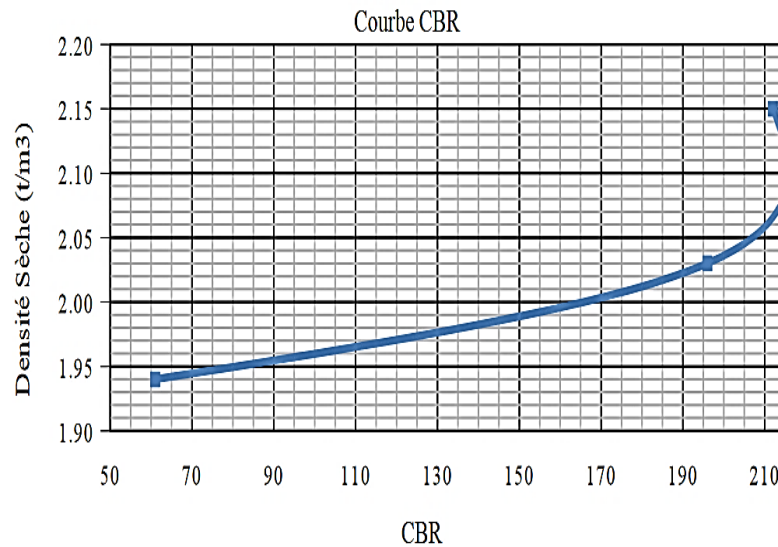


Figure 1:8 Variation du CBR en fonction de la teneur en ciment 3%.

(Paterne et al., 2023) ont montré que l'indice CBR après immersion d'un sable graveleux est de 5.37%, indiquant une portance faible. Ce résultat est cohérent avec les classifications qui considèrent que les sols ayant un CBR compris entre 3 % et 6 % présentent une faible portance, ce qui limite leur utilisation tels quels pour la construction de chaussées. Après traitement, les résultats obtenus ont montré que l'ajout de ciment et de chaux augmente la capacité portante de ce type de sol (Figure 1:9). Ainsi, en ajoutant différentes teneurs en ciment, le CBR a augmenté de 5.37% à 46%.

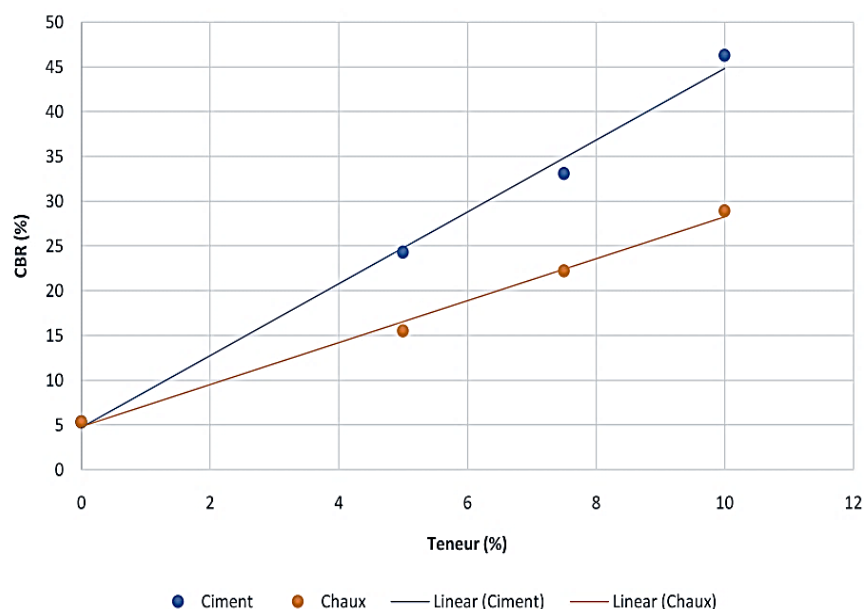


Figure 1:9 Courbe d'évolution du CBR après immersion en fonction de la teneur en Ciment et en Chaux.

1.8.1.1.C Effet sur la résistance au cisaillement

En général, le ciment induit une augmentation importante de la cohésion du sable, qui est initialement très faible ou nulle dans un sable non cimenté. Cette cohésion accrue est due à la liaison

chimique et physique entre les grains par le ciment hydraté (CSH) ou la calcite précipitée dans le cas de biocimentation (Dadda et al., 2019).

Des expérimentations réalisées à l'aide de l'essai de cisaillement, triaxial, ont démontré que la stabilisation au ciment accroît la résistance au cisaillement au pic, entraînant ainsi une augmentation de la cohésion apparente ((BOUTOUBA, 2021).

Dans la Figure 1:10, on présente quelques résultats obtenus lors des essais réalisés par (Schnaid et al., 2001) à l'aide de l'essai triaxial non drainé. Les résultats ont montré une forte augmentation du déviateur sur un mélange de sable –ciment à divers pourcentages de ciment (0,1%, 3% et 5%). On constate aussi que le déviateur augmente jusqu'à un pic de 1400 kPa pour un taux de 5% de ciment. En outre la déformation volumique $\frac{\Delta V}{V}$ des mélanges sable-ciment indique des valeurs négatives pour des déformations de 1% puis légère augmentation au-delà de 2% de déformation.

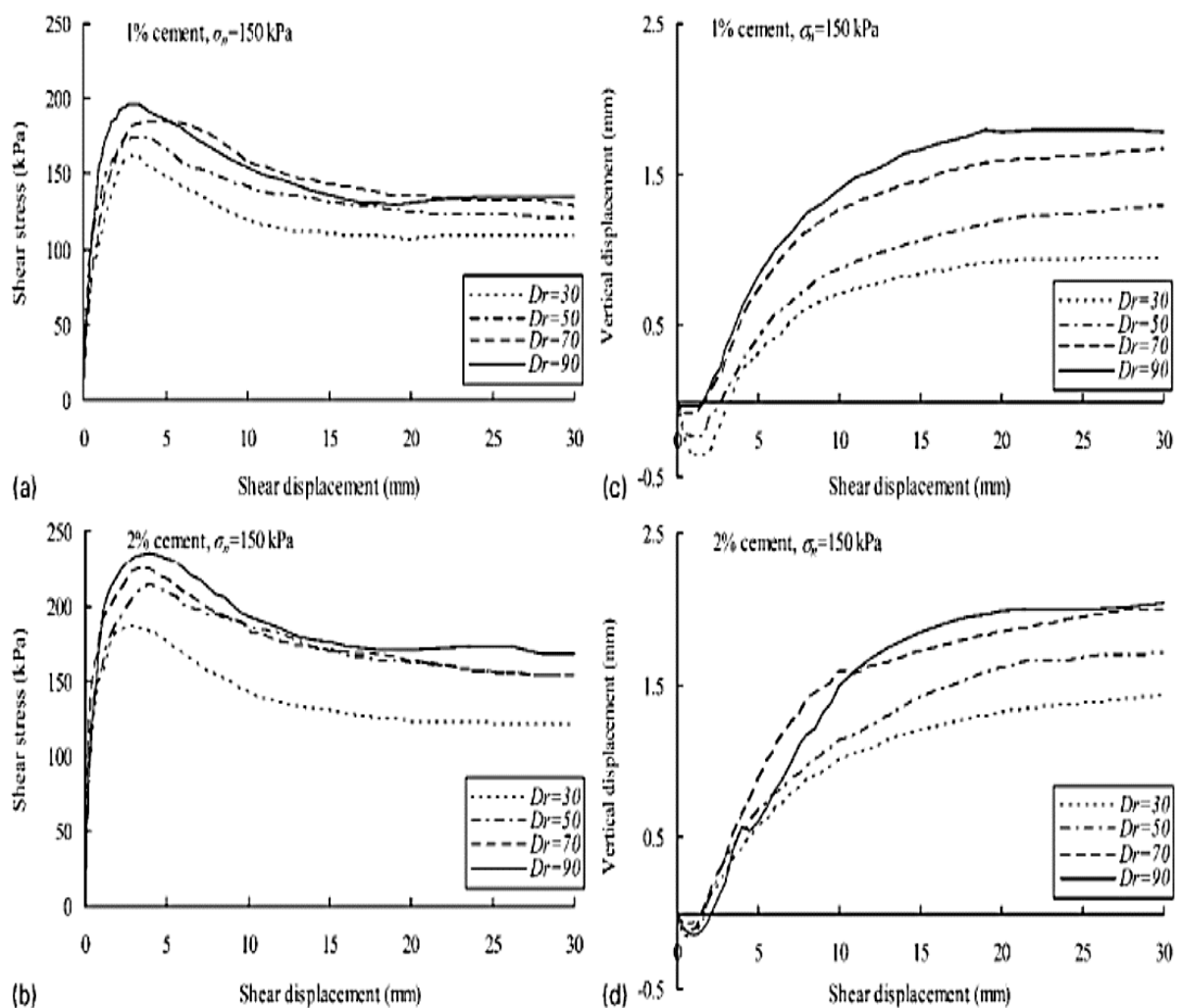


Figure 1:10 Courbes de contrainte de cisaillement – déplacement de cisaillement et déplacement vertical – déplacement de cisaillement (avec pression de confinement de 150kPa).

La Figure 1:11 montre l'évolution de la résistance maximale au cisaillement en fonction de la teneur en ciment, on remarque que l'augmentation de la contrainte normale fait augmenter la résistance au cisaillement d'une manière considérable. On constate aussi que la résistance au cisaillement du mélange sable-ciment augmente avec l'augmentation de la teneur en ciment selon une croissance quasi linéaire (coefficient de corrélation $R^2 = 0.92, 0.98$ et 0.98 pour les trois contraintes normales ($\sigma_n = 100, 200$ et 400 kPa) et $Dr=80\%$). La résistance maximale au cisaillement est plus prononcée pour les plus grandes teneurs en ciment et pour les contraintes normales élevées (Figure 1:11). Pour cette étude en laboratoire, pour la teneur en ciment de 0 à 10% des essais de cisaillement les expressions suivantes sont suggérées pour évaluer l'évolution de la résistance au cisaillement qui est fonction de la teneur en ciment (C_c).

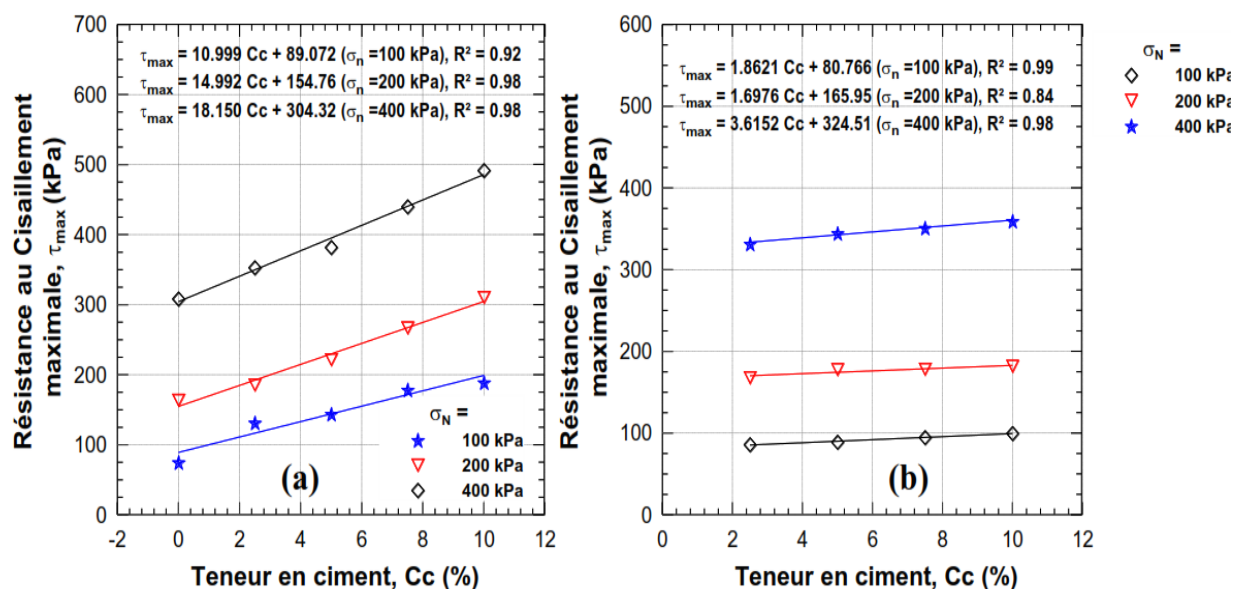


Figure 1:11 Evolution de la résistance maximale en fonction de la teneur en ciment pour un temps de cure de 7 jours : ($W_c=10\%$), a : $Dr = 80\%$, b : $Dr = 50\%$. (BOUTOUBA, 2021)

1.8.2 Renforcement

Le renforcement du sol consiste à ajouter des matériaux naturels ou combinés tels que des fibres, du ciment ou des géosynthétiques au sol pour compenser sa faible résistance à la traction et au cisaillement. Le renforcement du sol est utilisé depuis l'antiquité pour renforcer les briques de terre avec de la paille et du foin (Hejazi et al., 2012).

Le renforcement du sol est une technique largement employée pour améliorer la stabilité et la rigidité du sol in situ, dans le but de stabiliser les pentes artificielles, les murs de soutènement et les remblais (Figure 1:12). L'intégration de fibres, de géosynthétiques ou de clous de sol dans le corps du sol offre une amélioration significative de la stabilité des géostructures. L'interaction

entre le sol et le renforcement constitue un élément crucial qui influe sur les performances des structures en sol renforcé.

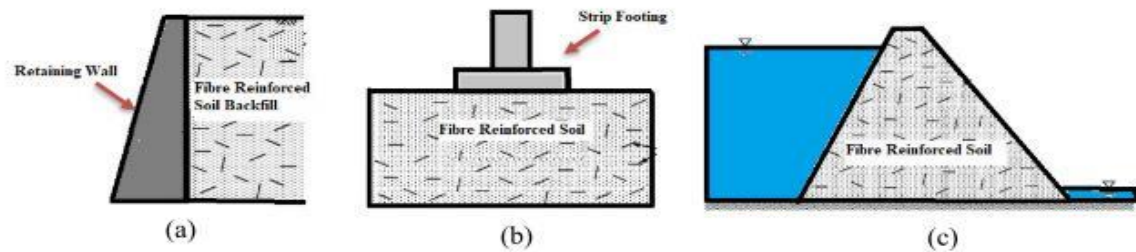


Figure 1:12 Applications du sol renforcé par des fibres : (a) un mur de soutènement, (b) une semelle isolée, (c) un barrage de type « digue » (Safdar et al., 2022)

La figure 1:13 illustre le mécanisme de renforcement, qui fonctionne par la mobilisation des forces de traction dans l'agent de renforcement et, par conséquent, l'amélioration des caractéristiques du sol (Gray and Ohashi, 1983). Ces interactions mécaniques interfaciales *entre la fibre et le sol* dépendent fortement de la *densité sèche du sol* et de la *teneur en fibres*.

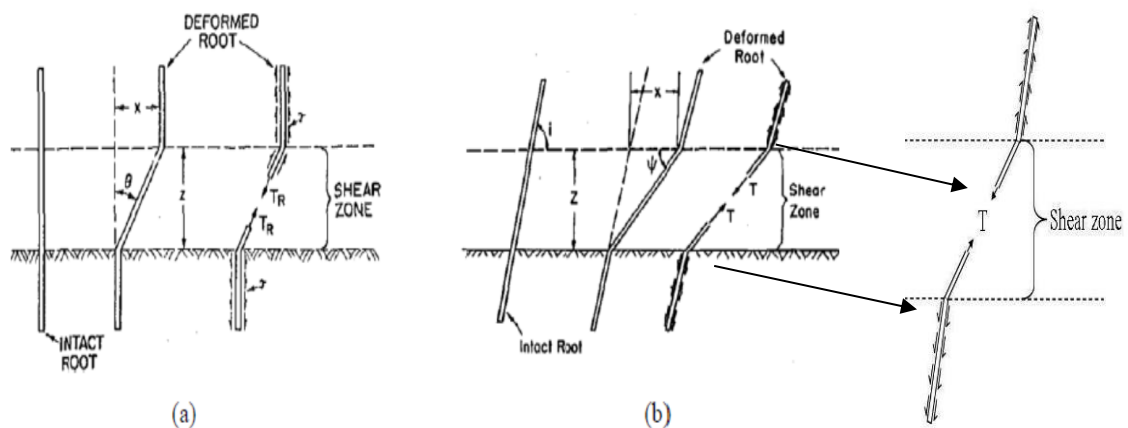


Figure 1:13 Mécanisme des interactions mécaniques interfaciales entre les particules du sol et la fibre : (a) orientation perpendiculaire à la surface de cisaillement ; (b) fibre orientée à l'angle (Gray and Ohashi, 1983)

(Shukla et al., 2009) ont divisé le renforcement des sols en deux catégories : les sols *systématiquement renforcés* et les sols *renforcés par des fibres dispersées* de manière aléatoire. Le premier consiste à placer stratégiquement des feuilles géosynthétiques ou des bandes d'acier galvanisé pour fortifier le sol. Le second consiste à mélanger des fibres discrètes, naturelles ou synthétiques, au sol et à les orienter de manière aléatoire pour le renforcer.

Des fibres de renforcement d'origine naturelles (végétales, animales et minérales) comme la fibre de coco ou de palmier de laine de poils... et des matériaux de renforcement synthétiques comme les géogrilles, les fibres de polypropylène ou les fibres de verre... sont utilisés (Hejazi et al., 2012).

1.8.2.1 Renforcement par des fibres

Le renforcement par des fibres offre des avantages significatifs par rapport aux géotextiles. Les avantages associés à celles-ci incluent une flexibilité accrue, une résistance supérieure aux conditions climatiques, un coût réduit, ainsi qu'une relative facilitée d'installation et de drainage. De la même manière que les fibres discontinues sont incorporées et amalgamées au sol, il en va de même pour le ciment, la chaux ou d'autres agents additifs (BOUTOUBA, 2021).

Selon (Hejazi et al., 2012), les matériaux de renforcement conventionnels dans l'ingénierie géotechnique présentent certaines lacunes. Par exemple, les fibres de renforcement en acier présentent un risque de corrosion dans les environnements pédologiques agressifs. Les fibres végétales, normalement constitués de matériaux organiques, se détériorent également avec le temps. Par rapport à l'acier, les fibres synthétiques présentent un certain nombre d'avantages, tels qu'une meilleure résistance à la corrosion, aux alcalis et chlorures, un poids plus léger, une plus grande facilité de manœuvre sur le chantier et la possibilité de conserver des résistances presque similaires (Figure 1:14).



Figure 1:14 (a). Mise en place de fibres avec le sol, (b). Répartition et compactage des fibres sur le terrain Projet PGBT situé dans la région de Dallas, Texas (Gregory, 2006).

1.8.2.1.A Effet Sur les paramètres de compactage

(Kutanaei and Choobbasti, 2015) ont montré que l'ajout de fibres polyvinylique dans le sable entraîne une diminution de la densité sèche maximale (Figure 1:6). Cette diminution est due à l'interaction entre les particules du sol et les fibres, qui limite le mouvement des particules et réduit la densité unitaire moyenne du mélange. L'introduction de fibres n'affecte pas significativement l'humidité optimale du mélange. Lorsque la teneur en fibres augmente, il est nécessaire de fournir

plus d'énergie de compactage pour atteindre la même densité sèche. De façon générale, le comportement du mélange sable-ciment reste proche de celui du sable seul malgré l'ajout de ciment, tandis que la présence de fibres modifie surtout la densité sèche maximale (Figure 1:6).

1.8.2.1.B Effet sur l'indice de portance CBR

Selon (Nataraj and McManis, 1997), des essais de portance CBR ont été réalisés sur des éprouvettes d'argile renforcée et non renforcée à des densités sèches et des teneurs en eau maximales. Les résultats préliminaires des essais pour les éprouvettes avec différentes teneurs en fibres sont présentés à la figure 1:15. La valeur CBR de 8.44 pour l'éprouvette d'argile non renforcée passe à environ 12.6 pour les éprouvettes avec une teneur en fibres de 0.3 %. Il s'agit d'une augmentation de 48 % de la valeur CBR pour l'échantillon d'argile non renforcée.

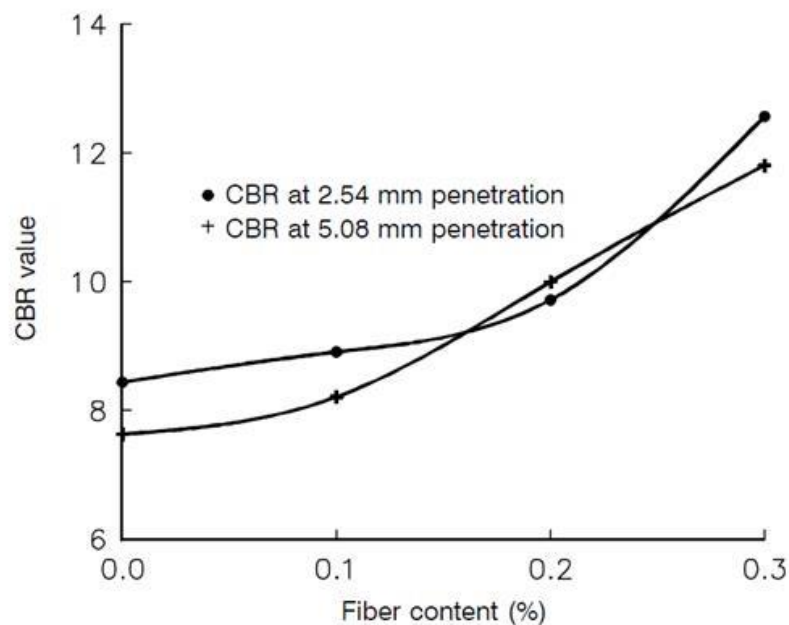


Figure 1:15 Changements de CBR pour des échantillons d'argile renforcée avec différentes teneurs en fibres (Nataraj and McManis, 1997)

(Lawton et al., 1993) ont démontré que le sable renforcé par des géosynthétiques multiorientés présente la résistance ultime la plus élevée en termes de CBR. (Tingle et al., 2002) ont observé que la stabilisation par géofibres d'un sable moyen améliore le CBR d'environ six fois. Cette amélioration a été attribuée au confinement des particules de sable par des fibres discrètes. (Pradani and Wibowo, 2017) ont examiné le CBR du sol de fondation renforcé avec des fibres de coco, de jute et de nylon à différents pourcentages et ont rapporté une augmentation globale du CBR de 60% (Figure 1:16).

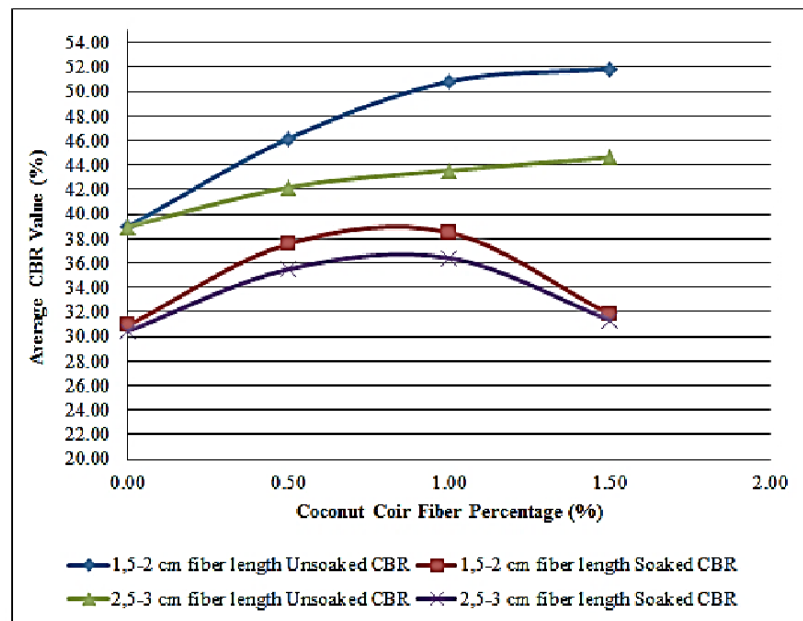


Figure 1:16 Valeurs CBR du sol sablonneux pour différents pourcentages et longueurs de fibres de coco

1.8.2.1.C Effet sur la résistance de cisaillement

L'effet de l'inclusion de fibre sur la résistance de cisaillement direct a été étudié par (Eldesouky et al., 2016), les essais effectués sur un sable sec et humide renforcé à différentes densités relatives et contraintes normales. D'après les résultats ils ont ressort que l'inclusion de fibres améliore la résistance au cisaillement maximal du sable et peut atteindre jusqu'à 50%. De l'autre côté, l'inclusion des fibres augmente la dilatation du sable (Figure 1:17).

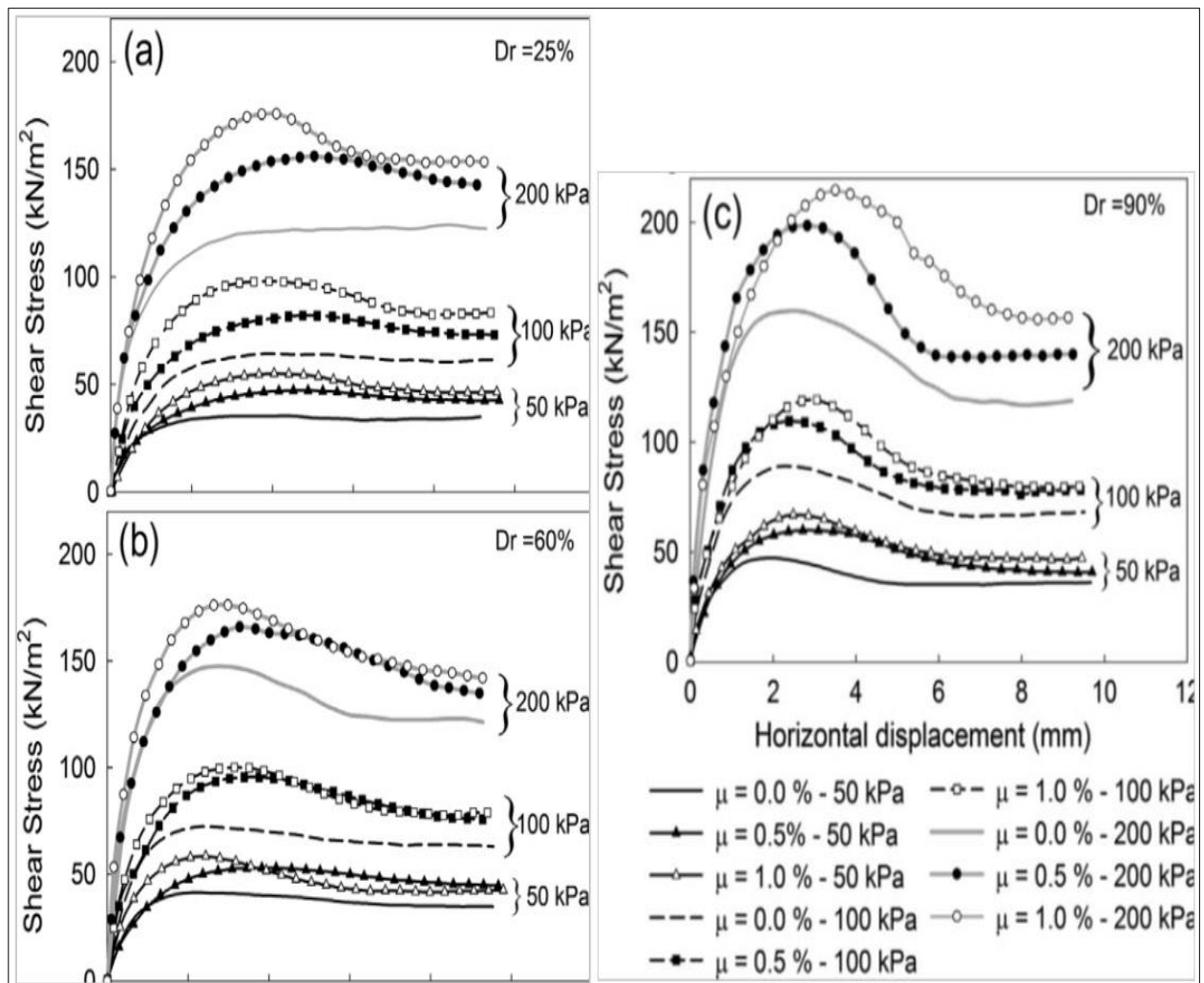


Figure 1:17 Relations entre la contrainte de cisaillement et le déplacement horizontal pour des éprouvettes sèches non renforcées et renforcées, cisailées sous différentes contraintes normales.

(a) $Dr = 25\%$, (b) $Dr = 60\%$ et (c) $Dr = 90\%$ (Eldesouky et al., 2016).

(Prabakar and Sridhar, 2002) ont indiqué que la teneur en fibres de sisal influe sur la résistance au cisaillement, avec une augmentation non linéaire de la contrainte de cisaillement. Cependant, au-delà de 0.75% de fibres, la contrainte de cisaillement diminue avec l'augmentation de la teneur en fibres (Figure 1:18). Les résultats indiquent également que les fibres ayant un diamètre supérieur à 20 μm ont peu d'influence sur les paramètres de cisaillement (C et ϕ).

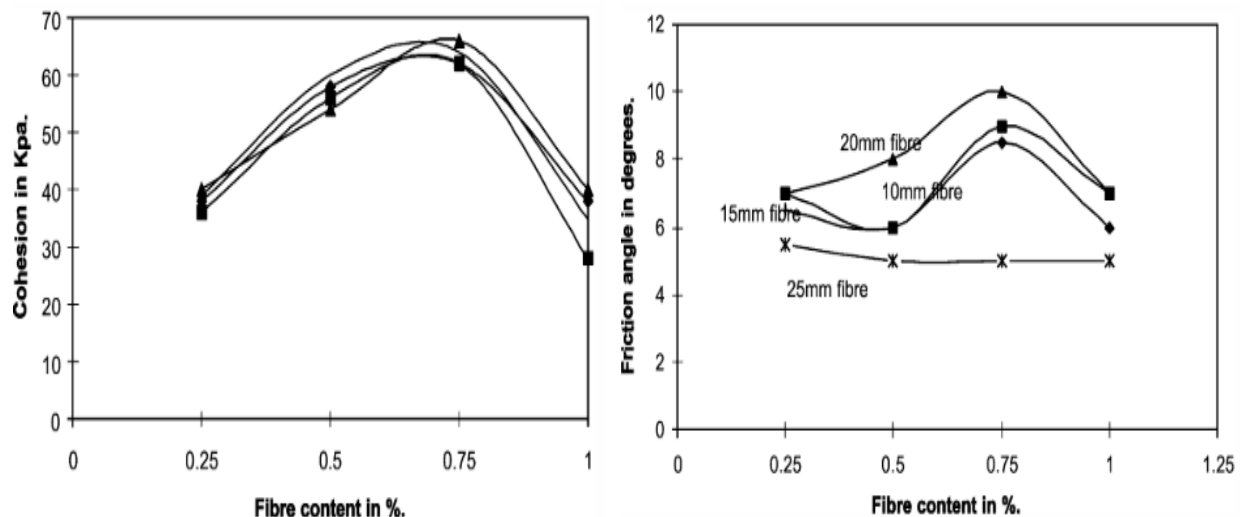


Figure 1:18 Évolution de C et ϕ selon la teneur en fibres (Prabakar and Sridhar, 2002)

Une étude de (Bouaricha et al., 2017) a analysé la résistance au cisaillement de deux types de sables (Chlef et Oued Rass) traités par clinker et renforcés avec des fibres de verre à différentes teneurs ($w_f = 0\%$, 0.2% , 0.4% et 0.6%) et longueurs ($L_f = 10, 15, 20, 25$ et 30 mm) via des tests de cisaillement direct. La figure 1:19 montre que l'ajout de renforcement augmente la résistance au cisaillement par rapport à un sol non renforcé, avec un contenu en fibres critique de 0.2% pour des fibres de 15 mm et une résistance encore plus élevée avec des fibres de 20 mm pour un contenu de 0.2% .

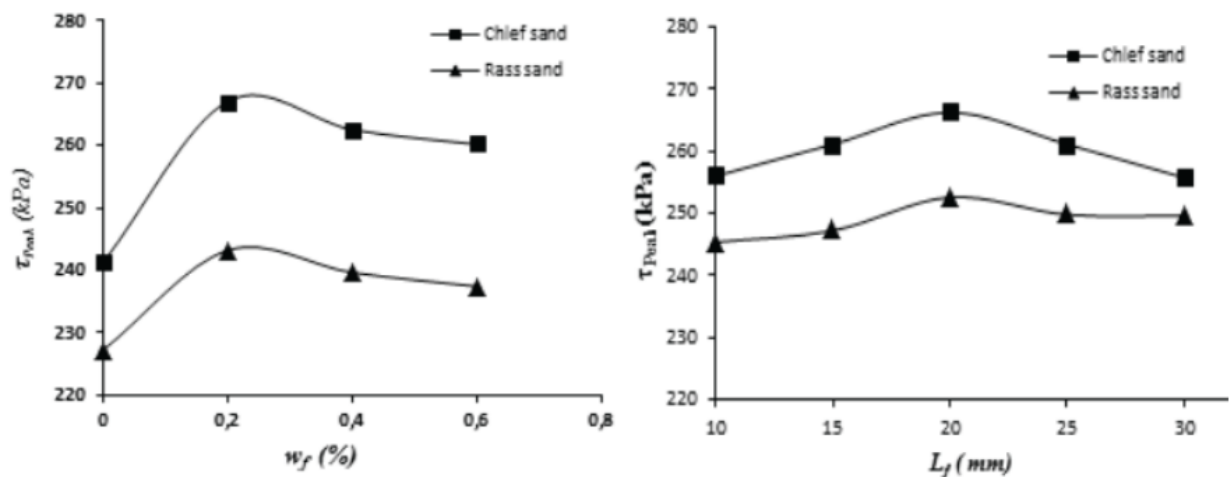


Figure 1:19 Variations de la résistance au cisaillement des sables de Chlef et de Rass renforcés en fonction de la teneur et de la longueur des fibres (Bouaricha et al., 2017).

1.8.3 Combinaison de la stabilisation et du renforcement

L'incorporation de fibres de renfort dans le sol cimenté améliore la résistance à la fois au pic et résiduelle, tout en induisant une transition du comportement fragile vers un comportement plus ductile (Consoli et al., 2003). Le comportement des sables non renforcés, renforcés par des fibres et cimentés a été largement étudié et rapporté dans de nombreux travaux de recherche. Les études

les plus importantes sur les combinaisons de renforcement du sol avec des fibres et de stabilisation avec du ciment sont présentées ici.

Selon (Kalantari et al., 2012), des échantillons de tourbe stabilisés avec du ciment avec/sans fibres ont été testés pour la résistance à la compression simple et l'indice de portance (ICBR). Afin d'évaluer la résistance de la tourbe stabilisée avec du ciment, les essais de compression simple et CBR ont été effectués sur des échantillons de tourbe non perturbés et sur de la tourbe stabilisée avec différentes quantités de ciment. La quantité de ciment utilisée pour l'essai de compression était de 5 et 15%, et pour l'essai CBR, elle était de 5, 10, 15, 20, 30 et 50% du poids de la tourbe pesée à sa teneur en eau optimale. La quantité de fibres à utiliser a été décidée en fonction des résultats de l'essai CBR. La figure 1:20 montre les résultats des tests CBR effectués sur la tourbe stabilisée avec 5, 15 et 25 % de ciment et 0.1, 0.15, 0.2 et 0.5 % de fibres et un séchage à l'air pendant 90 jours. Les résultats montrent que la teneur en fibres de 0.15 % donne les valeurs CBR les plus élevées.

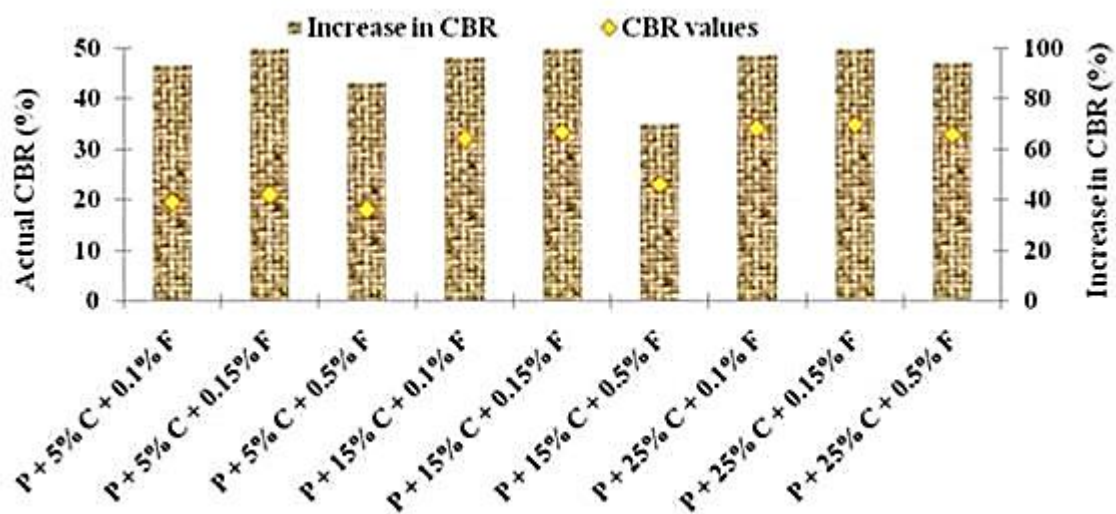


Figure 1:20 Augmentation en pourcentage du CBR en fonction des teneurs en ciment et en fibres (Kalantari et al., 2012)

Les résultats mettent en évidence une augmentation des valeurs CBR avec l'augmentation de la période de conservation. Lorsque la teneur en ciment augmente de 0 à 50 %, on observe également une augmentation des valeurs CBR. De plus, l'incorporation de 0.15 % de fibres dans les échantillons de tourbe stabilisée au ciment entraîne une augmentation des valeurs CBR par rapport aux échantillons ne contenant pas de fibres. Les résultats indiquent une variation du CBR, passant de 0.8 % pour la tourbe non perturbée à 145 % pour la tourbe stabilisée avec un mélange de 50 % de ciment et 0.15 % de fibres. L'augmentation des valeurs de CBR peut être expliquée par la méthode

de compactage des échantillons, ainsi que par l'ajout de ciment et de fibres pour accroître la résistance des échantillons. On observe que le ciment (15 %) et les fibres (0.15 %) ont augmenté de manière significative les valeurs de la résistance à la compression et CBR d'un facteur 13.5 et 79, respectivement, et il est donc évident que les fibres peuvent être utilisées pour augmenter la résistance de la tourbe. Il apparaît que les fibres distribuées de manière aléatoire limitent les plans de faiblesse potentiels et empêchent également la formation et le développement des fissures lors de la mise en charge, augmentant ainsi la résistance à la compression et le CBR. Le ciment et les fibres peuvent être utilisés efficacement pour améliorer la résistance de la couche de base pour la construction de la chaussée (Kalantari et al., 2012).

La résistance au cisaillement maximale du composite d'argile amélioré dépend de l'effet de la cimentation tandis que l'inclusion de fibre facilite l'augmentation de la résistance résiduelle (Nguyen et al., 2016). Cependant, la limite d'élasticité effective moyenne élevée et la contrainte de cisaillement importante entraînent la rupture significative des liaisons de cimentation et défaillance de la fibre, réduisant par conséquent l'efficacité du ciment et de la fibre. En considérant l'effet de la dégradation de la cimentation et du mécanisme de rupture de la fibre (Figure 1:21).

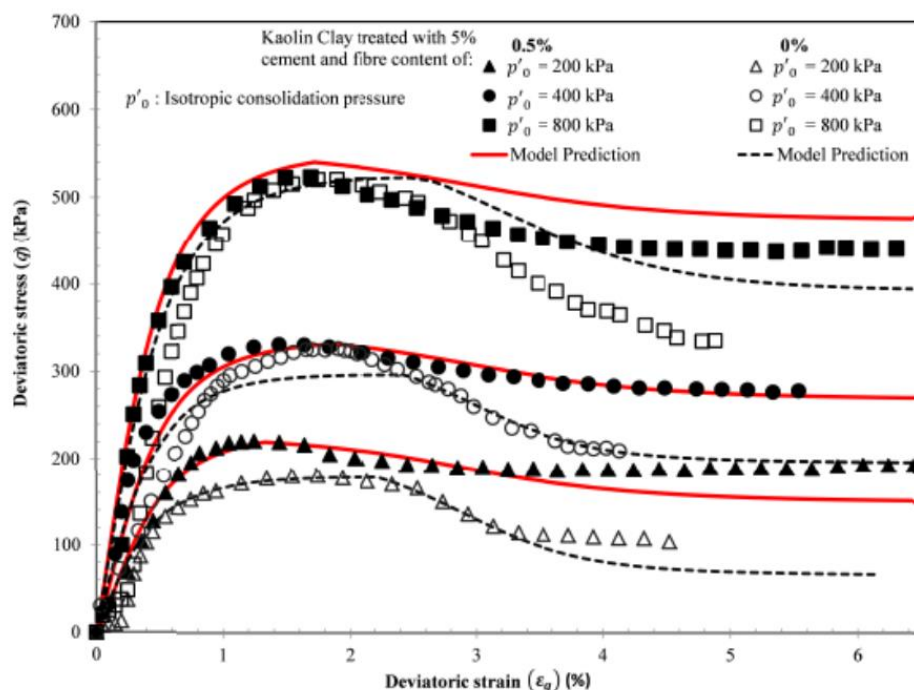


Figure 1:21: Relations contrainte-déformation de 5% de ciment traitée l'argile de Kaolin avec 0% et 0,5% de fibres (Nguyen et al., 2016).

Selon (Consoli et al., 2010), l'angle de frottement maximal varie de 36.5° pour du sable non cimenté à des valeurs comprises entre 30° et 52° en fonction du pourcentage de ciment ajouté, et atteint 48.5° avec l'ajout de fibres au sable. L'incorporation de fibres dans un mélange de sable, de

ciment et de fibres permet d'atteindre un angle de frottement maximal compris entre 44° et 51.5° , ce qui est comparable à celui obtenu avec l'ajout de fibres seules. L'interception de la cohésion augmente proportionnellement à la teneur en ciment pour le sable cimenté, qu'il soit renforcé ou non par des fibres. Néanmoins, l'augmentation du taux de cohésion du sable cimenté renforcé par des fibres est plus élevée que celle du sable cimenté non renforcé, jusqu'à environ 4% de la teneur en ciment, ce qui entraîne un renversement de la tendance pour d'autres valeurs de la teneur en ciment (Consoli et al., 2010).

(Kutanaei and Choobbasti, 2015) ont montré que l'analyse par microscopie électronique à balayage (SEM) a permis d'obtenir les résultats principaux suivants (Figure 1:22). : Les photographies SEM réalisées après cure montrent que, dans les échantillons cimentés (avec 6 % de ciment), les particules de sable sont bien enrobées par le ciment. De plus, pour les échantillons renforcés par fibres (0,6 % de fibres et 6 % de ciment), il a été observé que, même si un mélange homogène semblait être obtenu lors de la préparation visuelle, à l'échelle microscopique, l'homogénéité et la répartition des fibres restent inférieures à ce que laisse penser l'inspection visuelle. La SEM révèle que l'uniformité dans la distribution des fibres dans le sable renforcé n'est pas parfaite au microscopique, malgré un mélange prolongé.

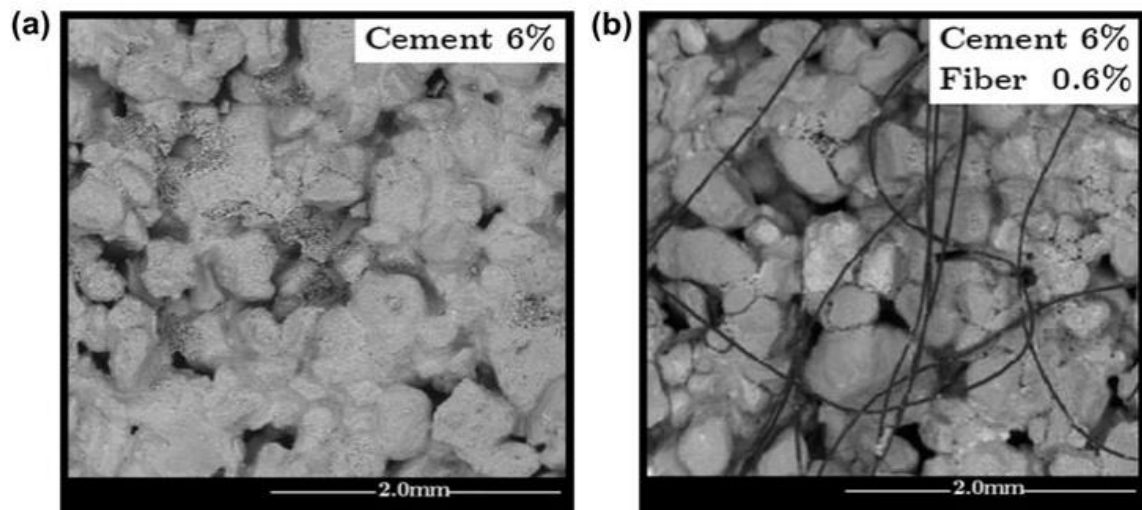


Figure 1:22 Image SEM (a) spécimens cimentés avec une teneur en ciment de 6 %, (b) sable cimenté renforcé par des fibres avec 6 % de ciment et 0,6 % de fibres (Kutanaei and Choobbasti, 2015).

(Wei et al., 2018) ont montré que l'ajout de fibres améliore significativement la cohésion et la résistance à la déformation des sols traités à la chaux, tout en ayant un impact limité sur l'angle de friction interne. Les résultats ont révélé qu'un contenu optimal de fibres se situe entre 0.2 % et 0.25 %, et que la longueur optimale des fibres doit être de 30 % à 40 % du diamètre de l'échantillon. Parmi les fibres testées, les fibres de polypropylène (PP) se sont révélées les plus efficaces pour renforcer le sol.

1.9 Conclusion

La valorisation des sables dunaire, abondants dans les régions désertiques algériennes, représente un enjeu majeur pour le développement durable des infrastructures de génie civil et des ouvrages géotechniques. Malgré leur disponibilité à grande échelle, ces sables présentent des caractéristiques mécaniques intrinsèques souvent insuffisantes pour répondre directement aux exigences des normes de conception. En particulier, leur faible cohésion et leur comportement mécanique limité constituent un frein à leur utilisation sans traitement préalable.

Afin de pallier ces limitations, ce chapitre a mis en lumière l'intérêt de la stabilisation au ciment qui permet d'améliorer significativement la résistance mécanique des sables dunaire. Cette amélioration est renforcée par l'incorporation d'additifs fibrés, notamment les fibres de polypropylène à faible coût.. Ces fibres contribuent à augmenter la ductilité, à limiter la propagation des fissures et à renforcer la cohésion interne du matériau stabilisé.

Dans la suite de notre travail, et afin de permettre l'utilisation effective de ces sables dunaires, nous procéderons à leur traitement par stabilisation au ciment, avec des dosages compris entre 6% à 12%. Parallèlement, nous renforcerons ce matériau stabilisé par l'incorporation de fibres de polypropylène (PP) à faible coût, dosées entre 0.25% à 0.75%, conformément aux recommandations issues de la revue de littérature présentée dans ce chapitre.

Chapitre 2 Matériaux et Méthodes Expérimentales

2.1 Introduction

Ce chapitre contient la description des matériaux utilisés dans cette étude et de leurs caractéristiques. En outre, la méthodologie du travail est également expliquée.

2.2 Matériaux et équipement

2.2.1 Sable de dune

Le sable de dune utilisé dans cette étude provenant d'un dépôt situé au nord de wilaya de Ghardaïa à Daïa Ben-Dhaoua (Figure 2:1). Des essais géotechniques comprenant des analyses granulométriques, des limites d'Atterberg, des paramètres de compactage et équivalent de sable ont été menés pour caractériser les propriétés du sable.

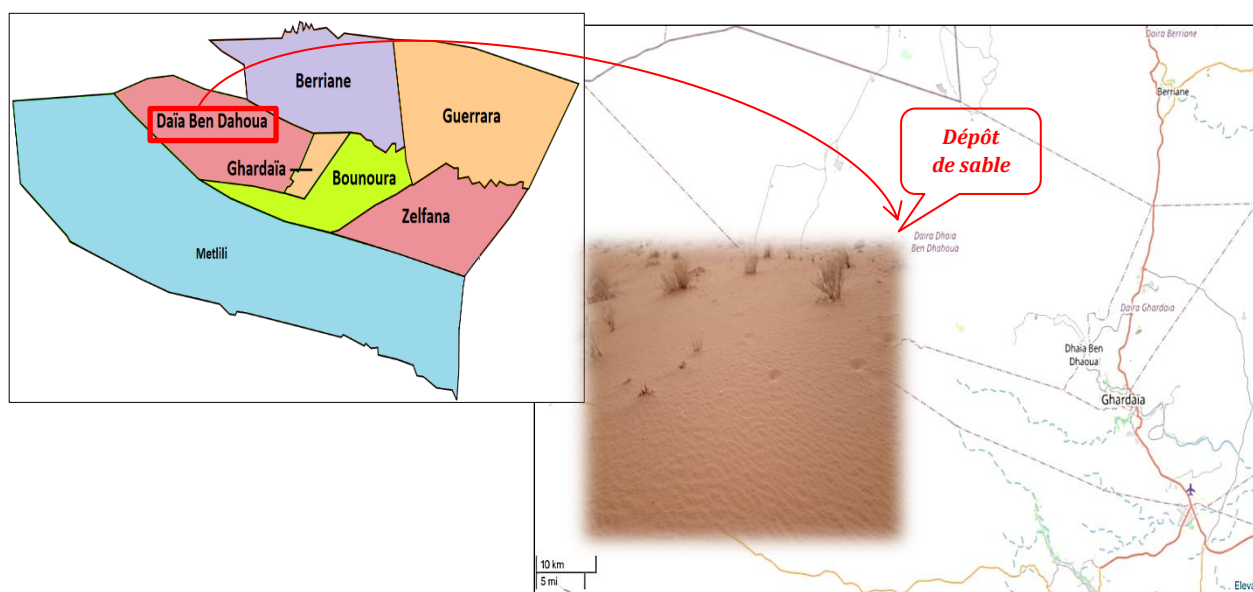


Figure 2:1 Localisation du dépôt de sable dunaire (Daia Ben Dahoua- Ghardaïa).

2.2.1.1 Analyse granulométrique

L'essai a pour but de déterminer en poids, la distribution des particules des sols suivant leurs dimensions. L'analyse granulométrique s'obtient par deux opérations successives et complémentaires :

- ❖ L'analyse granulométrique par tamisage, par voie humide ou sec, pour les particules de dimensions $\geq 80\mu\text{m}$ (0.08mm), l'essai est effectué selon la norme (NF P 94-056).
- ❖ La sédimentométrie pour les particules de dimensions $< 80\mu\text{m}$ qui complète le premier. Elle est effectuée selon la norme (NF P 94-057).

Le tamisage à sec est recommandé pour les sols sableux ou renfermant surtout des cailloux et des graviers. Les analyses granulométriques du sable de dune sont réalisées selon l'essai normalisé (NF P18-560), par voie sèche (Figure 2:2).

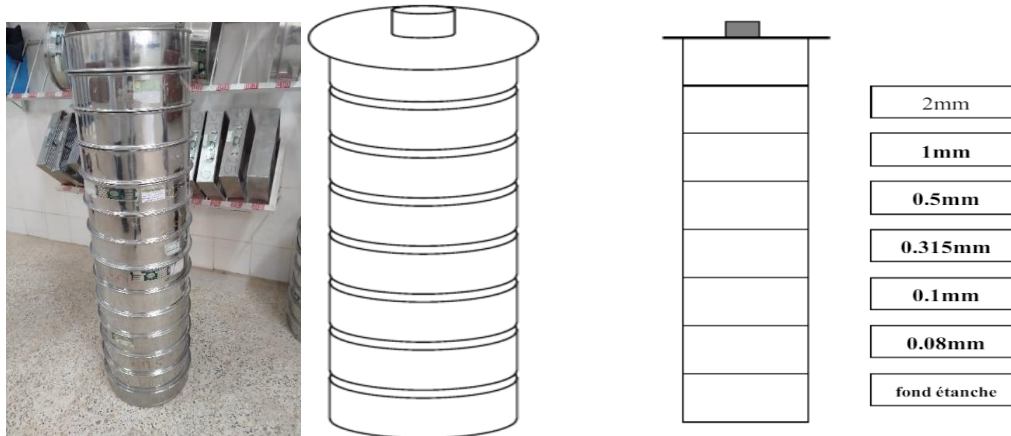


Figure 2:2 Analyse granulométrique par tamisage

Les propriétés du sable sont présentées dans le tableau 2:1, et la distribution granulométrique est illustrée dans la Figure 2:3. Selon le système unifié de classification des sols (USCS) et sur la base des résultats des essais, le sable est classé comme sable mal gradué (SP) ($C_u = 2.47 > 2$ et $C_c = 0.91 < 3$).

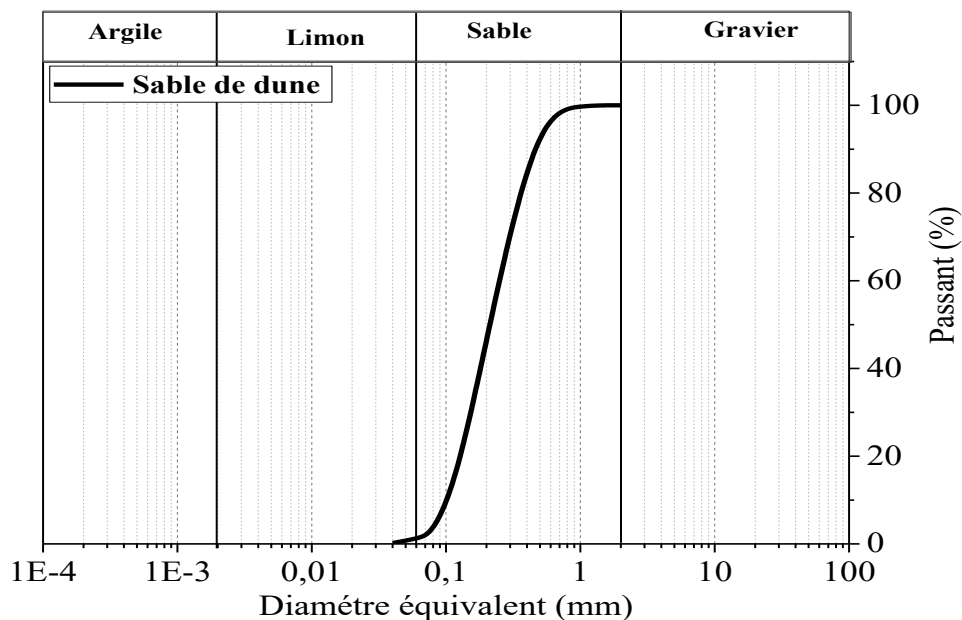


Figure 2:3 Courbe de distribution granulométrique du sable

Tableau 2:1 Résultats de l'analyse granulométrique du sable dunaire de Ghardaia.

Propriétés	Valeur
$\Phi \leq 80\mu\text{m}$ (%)	4
$\Phi \leq 2\mu\text{m}$ (%)	0
$\Phi \leq 2\text{mm}$ (%)	100
Coefficient d'uniformité C_u^*	2.47
Coefficient de courbure C_c^*	0.91

$$* C_u = D_{60}/D_{10}; C_c = (D_{30})^2/D_{60}.D_{10}$$

2.2.1.2 Limites d'Atterberg

Les limites d'Atterberg sont des teneurs en eau pondérales spécifiques du sol qui définissent des comportements mécaniques distincts. Elles sont établies à partir de la fraction du sol qui passe à travers des tamis de 400 μm . Ces limites délimitent le changement de la consistance du sol d'un état à un autre. Les limites utilisées sont :

- ✓ Limite de liquidité notée W_L (NF P 94-051) : teneur en eau d'un sol remanié caractérisant la transition entre un état liquide et un état plastique. Les particules glissent facilement les unes sur les autres.
- ✓ Limite de plasticité notée W_P (NF P 94-051) : teneur en eau d'un sol remanié caractérisant la transition entre un état plastique et un état solide. Le sol a tendance à se niveler davantage lorsqu'il est soumis à de faibles contraintes, se déformant largement sans se rompre.

La figure 2:4 illustre les divers états du sol fin en fonction de la teneur en eau naturelle croissante (w) du sol.

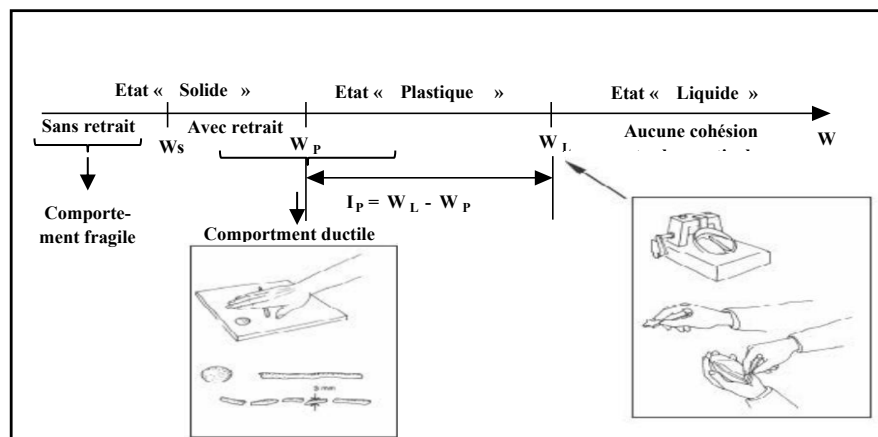


Figure 2:4 Divers états du sol fin (Demdoum, 2019).

L'indice de plasticité I_P est la différence entre la limite de plasticité et la limite de liquidité, il mesure l'étendue du domaine de plasticité du sol. Il s'exprime donc par la relation (Eq. 2 :1):

$$I_P = W_L - W_P \quad (2:1)$$

La classification des sols selon la limite de liquidité et l'indice de plasticité présenté sur le tableau 2:2.

Tableau 2:2 Classification des sols en fonction des limites d'Atterberg (SETRA-LCPC 1992)

Sols	Limite de liquidité W_L	Indice de plasticité I_P	Caractéristique
Sable	$W_L < 35$	$I_P < 15$	Faiblement argileux
Limon	$20 < W_L < 60$	$15 < I_P < 25$	Moyennement argileux
Argile	$W_L \geq 60$	$I_P \geq 25$	Argileux

Les résultats sont présentés dans le tableau 2:3. Il nous a été impossible de déterminer la limite de plasticité du sable dunaire, en raison du fait que les boudins se fragmentaient avant d'atteindre un diamètre de 3 mm. Selon les valeurs de W_L , le sable de dune est classé comme un sable non plastique, caractérisé par une faible teneur en argile.

Tableau 2:3 Les limites de consistance.

Limites de consistance	Valeur
Limite de liquidité: w_L (%)	16.88
Limite de plasticité: w_P (%)	Non mesurable (N.M)
Indice de plasticité: I_p (%)	Non mesurable (N.M)

2.2.1.3 Équivalent de sable

Cet essai effectué selon la norme (NF P 18-598) est utilisé pour évaluer la propreté des sables, il est effectué sur la fraction 0/5 mm du matériau à étudier. On lave l'échantillon et on laisse reposer le tout au bout de 20 minutes on mesure les éléments suivants (Figure 2:5):

- ❖ hauteur h_1 : sable propre + éléments fine (floculant).
- ❖ hauteur h_2 : sable propre seulement.

On déduit l'équivalent de sable où on peut utiliser un piston comme la figure 2:5 montre (Eq. 2:2):

$$ES_V = 100. (h_2/h_1) \quad (2:2)$$

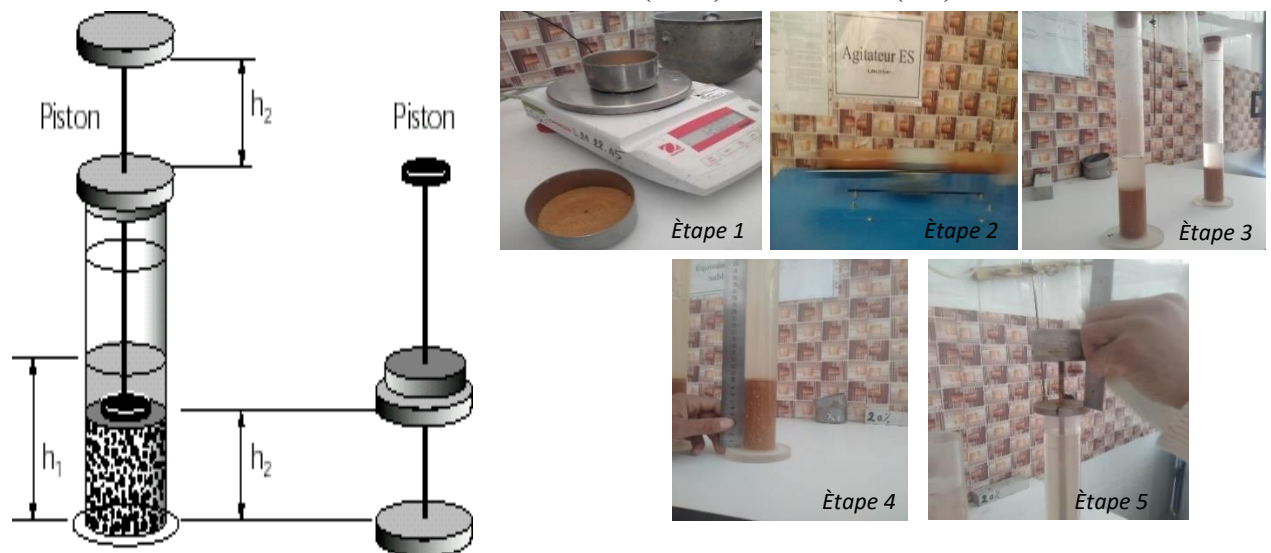


Figure 2:5 Principe d'essai d'équivalent de sable par piston (BENTASSA and SAADI, 2023).

Les résultats de cet essai sont résumés dans le tableau 2:4. D'après la classification LCPC, le sable de dune de Ghardaia est un sable propre.

Tableau 2:4 Équivalent de sable du sable dunaire

Équivalent de sable		
Paramètres	ES_V	ES_P
Sable	73.07	63.20

ES_V : (équivalent de sable visuel) ; ES_P : (équivalent de sable au piston).

2.2.1.4 Poids volumique des grains solides

En général, le sable de dune présente un poids volumique des grains solide γ_s de l'ordre de 26.5 kN/m³ ($G_s = 2.65$) (Kamel, 2011).

2.2.1.5 Essai Proctor Normal

L'essai *Proctor* a pour but de déterminer la teneur en eau optimale, notée w_{opt} , et le poids volumique maximal du sol sec, noté γ_d^{max} , pour réaliser le meilleur compactage d'un sol in situ.

Le principe de l'essai consiste à humidifier un matériau à différentes teneurs en eau et à le compacter, pour chacune des teneurs en eau, selon un procédé et une énergie conventionnelle. Il est effectué généralement selon deux modes de compactage d'intensités différentes : par l'essai Proctor Modifié à énergie plus intense et par l'essai Proctor Normal (à énergie moyennement poussée), ce dernier a été choisi pour mener cette étude (Figure 2:6). L'essai est réalisé selon la norme NF P 94-093.

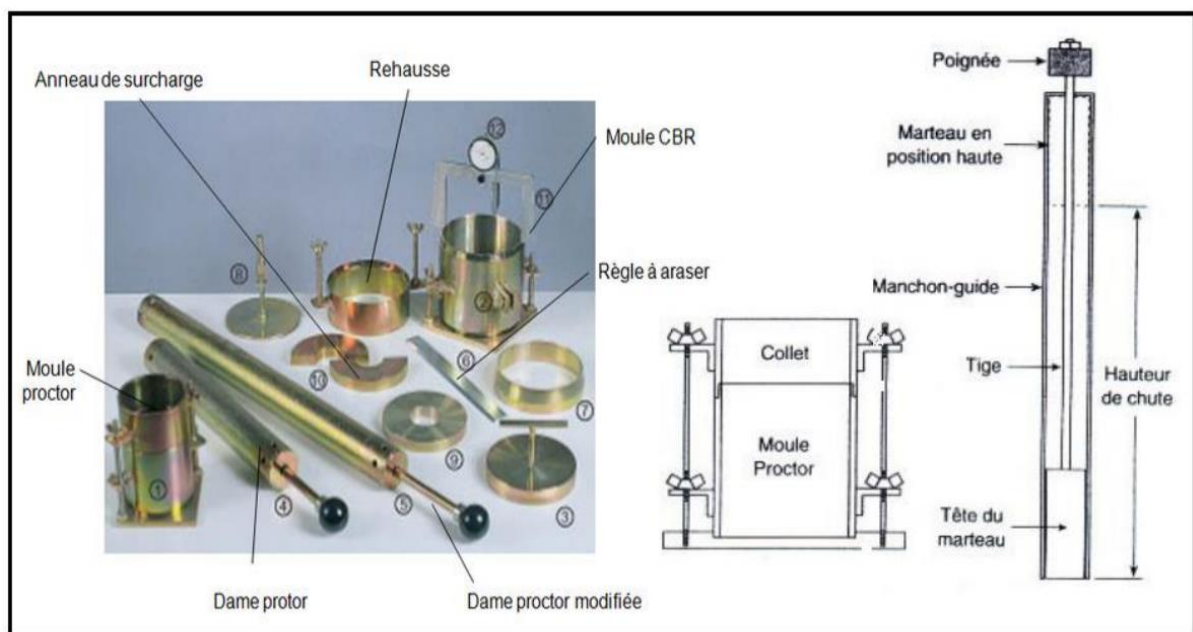


Figure 2:6 Appareillage spécifique pour l'essai Proctor.

Le sol est mis à l'étuve pendant 24 heures. On ajoute un poids déterminé d'eau. On compacte l'échantillon dans un moule Proctor ($h = 11.7$ cm ; $D = 10.2$ cm) avec une énergie fournie par une dame (25 coups/couche), d'un poids déterminé (2.5 kg), tombant d'une hauteur constante (30.5 cm). On adjoint au moule une hausse mobile pour permettre de compacter jusqu'à 13 cm. On arase ensuite l'échantillon à 11,5 cm après enlèvement de la hausse. On détermine la teneur en eau du matériau, ce qui permet de calculer le poids volumique sec (Figure 2:7).



Figure 2:7 Moule Proctor Normal avec la dame.

La figure 2:8 présente la courbe Proctor Normal du sable de dune. Le sable de dune présente un poids volumique sec maximal de l'ordre de 17.1 kN/m^3 correspondant à une teneur en eau optimale de l'ordre de 11.15%.

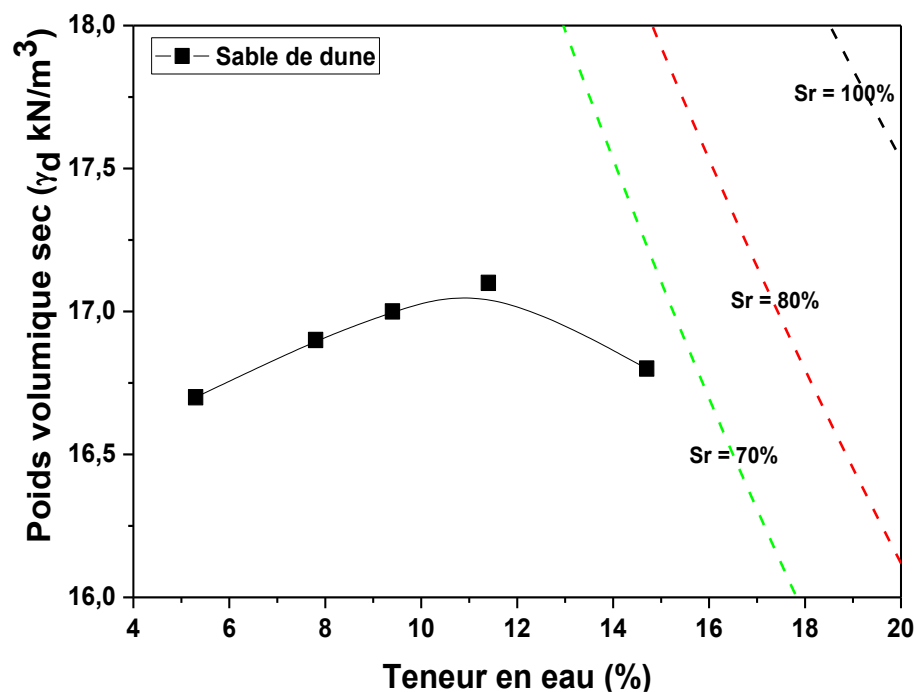


Figure 2:8 Courbe Proctor normal du sable dunaire

2.2.1.6 Poids volumique apparent

La masse volumique apparente d'un matériau est la masse volumique d'un mètre cube du matériau pris en tas, comprenant à la fois des vides perméables et imperméables de la particule ainsi que les vides entre particules. L'essai est réalisé selon la norme NF EN ISO 11272 (Voir Annexe 1).

Nous avons mesuré le poids volumique apparent du sable dunaire étudié, par la détermination de la masse d'un remplissage d'une mesure de 1 litre, qui doit être effectué sans aucun tassement. Trois essais ont été effectués. La précision de la balance utilisée est de 0.1 grammes. La valeur moyenne obtenue est représentée sur le tableau 2.5.

Tableau 2:5 Poids volumique apparent du sable dunaire

Paramètres	valeur
γ_{app} (kN/m ³)	15.47
* e_{max}	0.66

$$*e_{max} = (\gamma_s / \gamma_{app}) - 1$$

2.2.1.7 Analyse chimique

Pour compléter les analyses physiques du sable de dune, des analyses chimiques ont été effectuées par le LTPS de Ghardaia (Voir Annexe 2), et qui ont donné les résultats illustrés dans le tableau 2:6. La constatation importante à signaler est la présence d'un fort pourcentage en silice qui est supérieur à 95 %, et par conséquent, le sable de dune de Ghardaia est un sable siliceux.

Tableau 2:6 Analyse chimique du sable de dune

Composition	Unité	Sable de dune
Résidu insolubles (SiO ₂ +Silice)	%	95,7
CaCO ₃ %	%	3
SO ₄ ⁻² %	%	0

2.2.1.8 Récapitulatif des essais d'identification

Le tableau 2:7 englobe les propriétés du sable dunaire étudié. Le sable présente une granulométrie mal graduée. La teneur négligeable en particules fines (4% ≤ 80µm, 0% ≤ 2µm) explique l'absence de limite de plasticité mesurable (IP = N.M)) et une sensibilité limitée à l'eau.

Tableau 2:7 Propriétés physiques du sable dunaire utilisé

Propriétés	Valeur
$\Phi \leq 80\mu m$ (%)	4
$\Phi \leq 2\mu m$ (%)	0
$\Phi \leq 2mm$ (%)	100
Coefficient d'uniformité C_u^*	2.47
Coefficient de courbure C_c^*	0.94
W_L (%)	16.88
IP (%)	N.M
ES_p	65.70
G_s	2.65
γ_s (kN/m ³)	26.5
γ_{dmax} (kN/m ³)	17.1
W_{opt} (%)	11.15
γ_{app} (kN/m ³)	15.47
e_{max}	0.66
e_{min}	0.549

2.2.2 Fibres de polypropylène (PP)

2.2.2.1 Définition

Le polypropylène est un matériau polymère hydrocarboné synthétique, il est l'un d'un groupe de fibres synthétiques, de polymères (Y compris, mais sans s'y limiter, le nylon, le polyester et le polyéthylène) adapté de l'industrie textile, qui ont été ajoutés à la Pâte de Ciment Compactée (PCC) dans une tentative d'améliorer performance. Actuellement polypropylène est le plus largement utilisé de la synthèse des fibres pour les applications géotechnique (Zollo, 1985). Il y a plusieurs types de polypropylène comme montre la figure 2:9.



Monofilament



Fibre de base avec ondulation

Figure 2:9 Types des fibres polypropylène (PP).

2.2.2.2 Avantages spécifiques

L'utilisation des fibres PP dans le renforcement de notre sable dunaire présente plusieurs avantages déterminants :

- ❖ Facilité de mise en œuvre : Les fibres s'incorporent directement dans le mélange sol-liant sans nécessiter d'équipement spécialisé, contrairement aux géotextiles ou aux armatures métalliques (SEDDIKI Aymen and Abdelaziz, 2023).
- ❖ Renforcement tridimensionnel : Contrairement aux armatures conventionnelles, les fibres créent un renforcement uniforme dans toutes les directions de l'espace, améliorant le comportement global du sol traité (Imene, 2022).
- ❖ Résistance à la corrosion : L'absence de sensibilité à la corrosion garantit une durabilité supérieure aux armatures métalliques, particulièrement importante dans les environnements agressifs (Imene, 2022).

- ❖ Rapport coût-efficacité : Le faible coût des fibres PP et leurs dosages optimaux réduits en font une solution économiquement attractive pour les projets géotechniques de grande envergure (Chawki, 2019).

2.2.2.3 Caractéristiques des Fibres Polypropylène (PP) utilisé

Les fibres de polypropylène se distinguent par leurs propriétés physiques exceptionnelles qui les rendent particulièrement adaptées au renforcement des sols. Leurs caractéristiques intrinsèques sont présentées dans le tableau 2:8. Ce type de fibre en polypropylène a été acquis auprès de la société SDC BLIDA (“EURL SDC Algérie,” n.d.).

Tableau 2:8 Propriétés des fibres Polypropylène (PP) utilisé (“EURL SDC Algérie,” n.d.)

Propriété	Valeur
Densité (g/cm ³)	0.91
Longueur (mm)	12mm
Diamètre (um)	100
point de fusion (°)	160°
Résistance à la traction (MPa)	550
Module d'élasticité (MPa)	3500
Allongement à la rupture (%)	20

Les fibres utilisées se présentent généralement sous forme de *monofilaments*, avec une surface longitudinale droite et une section transversale circulaire. Cette morphologie favorise une dispersion uniforme dans la matrice de sol et une bonne adhérence avec les particules (Bouguerra et al., 2022). Elles sont naturellement hydrophobes, ce qui signifie qu'elles n'absorbent pas ou très peu d'eau lorsqu'elles sont en contact avec un milieu humide ou le sol (“FIBRE DE POLYPROPYLENE 6MM,” n.d.) (EDDIN, n.d.). Notre choix de la longueur de 12 mm est justifié par la littérature scientifique comme étant la plus efficace pour améliorer le comportement mécanique des sols, grâce à un ancrage optimal, une dispersion homogène et une maniabilité préservée (Consoli et al., 2003).

2.2.3 Ciment

Le ciment à usage général (MATIN) (NA422 CEM II/B-L 42.5 N), destiné à la construction des ouvrages d'art et bâtiment, a été utilisé dans ce travail. Ses temps de prise initiale et finale étaient respectivement de 150 et 230 minutes (“fiche-produit-ciment-matine-tm-en-francais.pdf,” n.d.). Le tableau 2:9 présente les caractéristiques techniques du ciment utilisé.

Tableau 2:9 Caractéristiques techniques du ciment Matin
 (“fiche-produit-ciment-matine-tm-en-francais.pdf,” n.d.).

Propriété	Valeur
<i>Analyse chimique</i>	
Perte de feu (%)	10.00
Teneur en sulfates (%)	2.50
Teneur en oxyde de magnésium (%)	Max5%
Teneur en Chlorures	<0.1
<i>Composition minéralogique du Clinker</i>	
C3S (%)	60.00
C3A (%)	8.0
<i>Résistance à compression</i>	
à 28jours (MPa)	>42.50
Allongement à la rupture (%)	
<i>Propriété physique</i>	
Consistance normale (%)	26.50
Retrait à 28j	<1000.00
Finesse (cm ² /g)	3700-5200
Densité relative G _s	3.1

Conformément à la NF P 94-100 §5.2.4, le compactage doit être réalisé dans un délai maximal de **2 heures** après le mélange sol-ciment-eau, afin d'éviter le début de prise du liant qui altérerait la compacité (la portance chute de 20-30% (ASTM D806)). De plus, au-delà de 2h, l'hydratation du ciment réduit la maniabilité du mélange et compromet l'homogénéité.

2.3 Méthodes Expérimentales

Afin d'analyser l'effet de la teneur en ciment et des fibres PP sur les paramètres de compactage, la résistance à la compression simple, la résistance à la traction et la résistance au cisaillement du sol sableux, les valeurs ont été mesurées en changeant la teneur en ciment et les fibres PP, et tous les résultats expérimentaux ont été illustrés par des tableaux et des figures pour une compréhension facile et une discussion critique.

2.3.1 Préparation du mélange

L'effet de différents paramètres tels que la teneur en ciment (C%) et la teneur en fibres (PP%) est l'un des objectifs de cette étude. Par conséquent, 75 échantillons pour l'essai de compactage, 16 échantillons pour CBR, 57 échantillons pour la résistance au cisaillement ont été préparés avec différentes teneurs en ciment (C%) et en fibres PP (PP%). La gamme des teneurs en ciment (C%) dans le sable est de 0, 6, 9 et 12% sur la base de la masse sèche du sable. Elle est définie comme suit (Eq. 2:3) :

$$C (\%) = W_c \cdot 100 / W_s \quad (2:3)$$

Où : W_c = poids du ciment, et W_s = poids du sol séché.

Dans le mélange final, 100 % du matériau doit passer le tamis de 38 mm et au moins 60 % doit passer le tamis n° 4 (4,75 mm), à l'exclusion de tout gravier ou pierre retenu sur le tamis n° 4 (4,75 mm) ("Guide to Cement-Stabilized Subgrade Soils," n.d.). Le ciment présente de grands avantages en termes d'amélioration de la résistance, mais sa production pose des problèmes environnementaux et économiques. Par conséquent, l'utilisation du ciment doit être contrôlée pour être à faible teneur si les exigences du projet le permettent.

Selon (Prabakar and Sridhar, 2002), la présence de fibres PP de plus de 0.75 % dans les mélanges d'additifs de fibres Sand-PP a entraîné une réduction de la résistance au cisaillement. Par conséquent, dans la présente étude, les fibres PP dans les mélanges de sol sont de 0 et 0.75% de la masse sèche du sol. Il est défini comme suit (Eq. 2:4) :

$$PP (\%) = W_f \cdot 100 / W_s \quad (2:4)$$

Où : W_f = poids des fibres PP, et W_s = poids du sol séché.

Le tableau 2:10 présente les différents mélanges, avec différentes compositions de sol, de ciment et de fibres de pneu, qui ont été préparés pour les essais.

Tableau 2:10 Pourcentage de Ciment et de Fibre PP dans le Sable

Sable et Mélange	*Name	x _C (%)	y _{PP} (%)	Durée de conservation
Sable de dune	SD	0	0	3, 7, 14 et 28 jours
Sable+Ciment	SDxC	6C, 9C, 12C	0	3, 7, 14 et 28 jours
Sable+Fibre PP	SDyPP	0	0.25PP, 0.50PP, 0.75PP	3, 7, 14 et 28 jours
Sable+Ciment+Fibre PP	SDxCyPP	6C, 9C, 12C	0.25PP, 0.50PP, 0.75PP	3, 7, 14 et 28 jours

*x et y représentent les proportions de ciment et de fibres, respectivement.

Pour préparer les mélanges de sable avec des additifs avant le compactage dans des moules, une masse spécifique de sable séché à l'étuve a été prélevé, puis le pourcentage requis de fibre PP et/ou de ciment, basé sur la masse sèche du sable, a été pesé et mélangé au sable (Figure 1:10). Le ciment a été passé à travers un tamis de 1,18 mm afin d'éliminer les éventuels grumeaux existants.

Pour les échantillons cimentés, l'eau a été ajoutée au mélange et mélangée jusqu'à l'obtention d'un mélange uniforme, puis durcie pendant 15 ± 1 min (max) dans des sacs en plastique, conformément à la norme NF P 94-93 pour les essais de compactage. Les échantillons renforcés de fibres sont laissés 24 heures dans un sac plastique hermétique avant les compacter (Figure 1:10).



Figure 2:10 Préparation du mélange sable-fibres (PP).

2.3.2 Essais de compactage

Le poids volumique sec maximal (γ_{dmax}) et la teneur en eau optimale (W_{opt}) ont été étudiés par des essais de compactage normalisés et l'effet de l'ajout de ciment et de fibres de pneu sur ces paramètres a également été pris en compte (Figure 1:11). Les essais de compactage standard ont été réalisés conformément à la norme NF P 94-093.



Figure 2:11 Moule de compactage avec échantillon Sable-PP compacté

2.3.3 Essais CBR

L'essai CBR est principalement utilisé pour l'évaluation des matériaux granulaires dans les couches de base, de fondation et d'infrastructure des chaussées routières et des aérodrômes. Bien que les valeurs de l'indice ICBR n'aient pas été couramment utilisées récemment dans la conception mécanique, elles constituent de bons indicateurs de la résistance et de la capacité portante d'un sol d'infrastructure. Les essais ont été réalisés conformément aux directives des normes NF P 94-078 et NF P 94-093. Les échantillons ont été préparés sur la base des résultats des essais de compactage

PN (γ_{dmax}) et (W_{opt}) de chaque mélange. Après que les mélanges ont été préparés, comme décrit précédemment, ils ont été placés dans une fente de 152 mm par 152 mm (Figure 2:12).

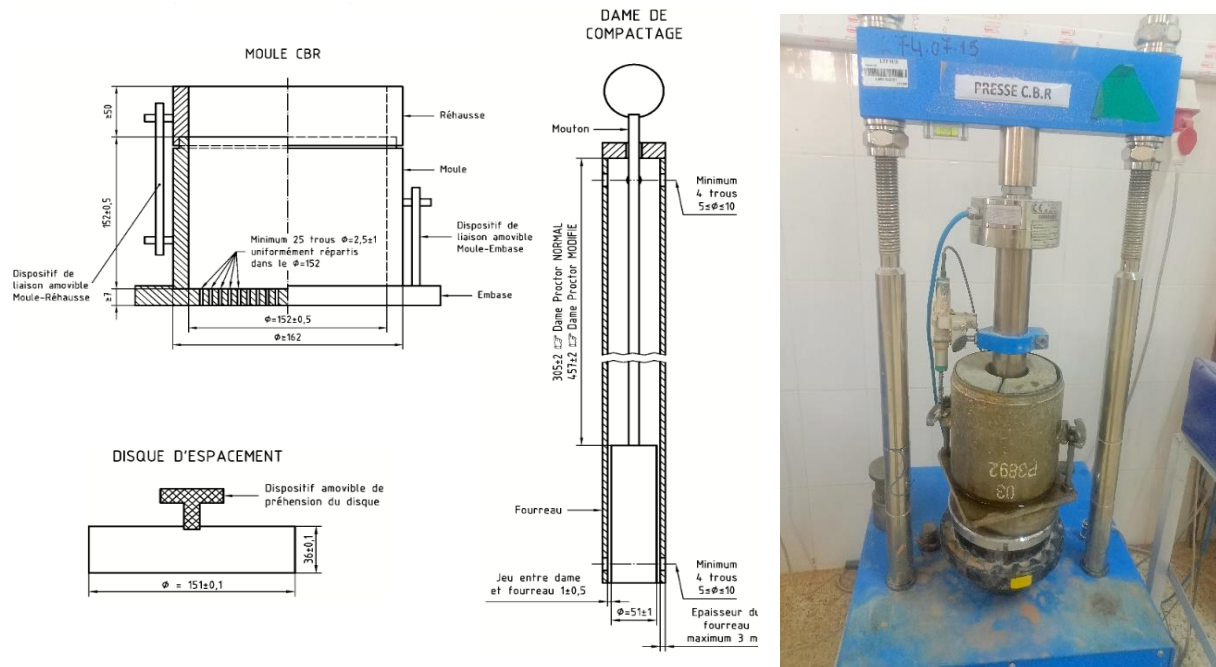


Figure 2:12 Moule CBR et la presse marshall.

2.3.3.1 Principe de l'essai

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

Le principe général de l'essai consiste à mesurer les forces à appliquer sur un poinçon cylindrique pour le faire pénétrer d vitesse constante dans une éprouvette de matériau. Les valeurs particulières des deux forces ayant provoqué deux enfoncements conventionnels sont respectivement rapportées aux valeurs des tomes observées sur un matériau de référence pour les mêmes enfoncements. L'indice recherché est défini conventionnellement comme étant la plus grande valeur, exprimée en pourcentage, des deux rapports ainsi calculés. Les valeurs des paramètres sont normalisées et précisées comme les suivants (Eqs. 2:5, 6):

$$\frac{\text{Effort de pénétrtion à 2.5mm d'enfoncement(en kN)}}{13.35} \times 100 \quad (2:5)$$

$$\frac{\text{Effort de pénétrtion à 5mm d'enfoncement(en kN)}}{19.93} \times 100 \quad (2:6)$$

L'indication de toute valeur d'un indice CBR ou IPI d'un matériau n'a donc de sens que si elle est assortie des caractéristiques d'état du sol prises en considération dans la confection de l'éprouvette c'est-à-dire

- ❖ Sa masse volumique à l'état sec exprimée en pourcentage de la valeur de $\gamma_{d\text{ OPN}}$ du sol;
- ❖ Sa teneur en eau exprimée en pourcentage de la valeur de w_{OPN} du sol ;
- ❖ Son état de saturation défini qualitativement par le fait que l'éprouvette est poinçonnée - soit immédiatement, après sa confection, et l'on parle alors d'indice CBR immédiat ou IPI, suivant le processus opératoire suivi ;
- ❖ Soit après avoir été immergée durant quatre jours et l'on parle alors d'I.CBR après immersion.

2.3.3.2 Exécution du poinçonnement

Les modalités d'exécution du poinçonnement diffèrent selon que l'on détermine l'indice CBR immédiat ou l'I.CBR immersion.

Pour la détermination de ***l'I.CBR immédiat***, interposer deux surcharges dans le volume libéré par le disque d'espacement. S'il est prévu que la contrainte apportée par la chaussée sur le sol soit supérieure aux 4.6 kg des surcharges ainsi constituées, il y a lieu d'ajouter autant de surcharges que nécessaire. L'ensemble moule plaque de base et surcharges est alors posé sur la presse. Exécuter ensuite le poinçonnement comme indiqué précédemment.

Pour la détermination de ***l'I.CBR immersion*** :

- ❖ Positionner le disque de gonflement sur l'éprouvette avant de mettre en place les surcharges comme indiqué précédemment ;
- ❖ Mettre en place et initialiser le dispositif de mesure de gonflement ;
- ❖ Immerger l'ensemble de sorte que l'éprouvette soit recouverte par une hauteur d'eau d'au moins 20 mm et qu'une lame d'eau d'au moins 10 mm de hauteur soit présente sous le moule.

Après quatre heures d'immersion (4 h), relever la valeur de gonflement total atteint. Retirer le moule et l'éprouvette du bac à immersion et après égouttage, exécuter le poinçonnement comme indiqué précédemment.

2.3.3.3 Matériel de poinçonnement

Il comprend une presse d'une capacité efficace d'au moins 50 kN et possédant une course d'au moins 10 mm.

Cette presse doit être équipée : d'un poinçon cylindrique en acier de $49.6 \text{ mm} \pm 0.1 \text{ mm}$ de diamètre, soit une section circulaire de $19.32 \text{ cm}^2 \pm 0.08 \text{ cm}^2$, et d'une dizaine de centimètres de longueur minimum ; d'un dispositif permettant l'enfoncement du poinçon dans le matériau à une vitesse de $1.27 \text{ mm/min} \pm 0,1 \text{ mm/min}$; d'un dispositif de mesure de l'enfoncement du poinçon garantissant la mesure avec une incertitude absolue maximum de 0.1 mm ; d'un dispositif de mesure des efforts de poinçonnement. La capacité de ce dispositif doit être adaptée à l'effort mesuré. Sa précision doit garantir la mesure avec une incertitude relative maximum de 1 %.

2.3.4 Essais de résistance au cisaillement

Au cours de l'objectif de caractérisation mécanique du sable traité et/ou renforcé, on a estimé rapidement la résistance au cisaillement par l'essai de cisaillement direct à la boîte de Cassagnarde (AFNOR NF P 94-071-1, 1994). L'objectif de cette partie expérimentale, dans un premier temps, est la détermination des paramètres de résistance au cisaillement pour les différents mélanges SDxCyPP, qui sont l'angle de frottement apparent et la cohésion apparente.

L'essai utilisé pour la détermination de ces paramètres est l'essai de cisaillement direct non consolidé non drainé (Essai noté U.U) à l'état non saturé (par w_{opt}). Cet essai permet d'étudier le comportement à court terme des mélanges en place. Les deux paramètres, cohésion apparente C_{uu} et angle de frottement apparent φ_{uu} dépendent de l'état du sol non saturé au début du cisaillement (e, S_r), et permettent d'écrire la résistance au cisaillement en contraintes totales (σ_v) sous la forme (Éq. 2:7):

$$\tau_{\text{max}} = C_{\text{uu}} + \sigma_v \text{tg}(\varphi_{\text{uu}}) \quad (2:7)$$

Le plan de Mohr est une représentation plane de l'état de contrainte dans des axes liés à la facette. L'axe des abscisses ($O\sigma$) est confondu avec la normale à la facette, l'axe des ordonnées est ($O\tau$) (Figure 2:13). Chacun des états de rupture dans un sol peut être caractérisé par un couple τ_r et σ_r représenté par un point sur le plan de Mohr.

Suite aux essais CBR, nous procéderons à la sélection des mélanges renforcés et traités optimaux afin de réaliser un essai de longue terme par cisaillement **consolidé drainé (CD)**.

L'ensemble des points représentant différents états de rupture forme une courbe à peu près rectiligne qui sépare le plan de Mohr en deux domaines :

- ❖ Le domaine sous cette courbe représente l'ensemble des états de contrainte que peut « supporter » le sol,
- ❖ Le domaine au-dessus de la courbe représente l'ensemble des états de contrainte non accessibles par le sol (le sol entre en rupture avant).

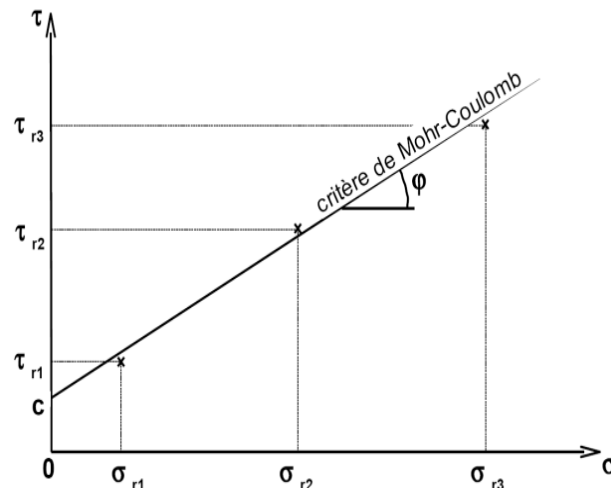


Figure 2:13 États de rupture et critère de Mohr-Coulomb représentés dans le plan de Mohr.

Cette courbe est correctement approximée par une droite appelée critère de rupture de Mohr-Coulomb et définie par l'équation 2:5.

2.3.4.1 Description de la Boîte de Casagrande

L'échantillon de sol est placé à l'intérieur de demi-boîtes qui peuvent se déplacer horizontalement l'une par rapport à l'autre. Un piston permet d'exercer sur le sol un effort normal N constant pendant toute la durée de l'essai (Figure 2:14).

Une demi-boîte est entraînée horizontalement à vitesse constante. À tout instant, on mesure la force de cisaillement T . Un second comparateur vertical permet de mesurer la variation de hauteur Δh de l'échantillon.

On exerce sur le plan de séparation AB des deux demi-boîtes une contrainte dont les composantes normale et tangentielle ont pour valeur moyenne (Eq.2:8):

$$\sigma = \frac{N}{A_c} \quad \tau = \frac{T}{A_c} \quad (2:8)$$

Où A_c est la section corrigée de l'éprouvette (cette section variant en fonction du déplacement relatif Δl). Un schéma global du bâti de chargement sur lequel est fixée la boîte de Casagrande est présenté dans le suivant.

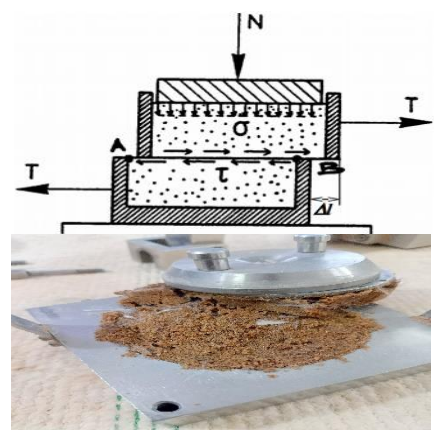


Figure 2:14 Un échantillon coupé

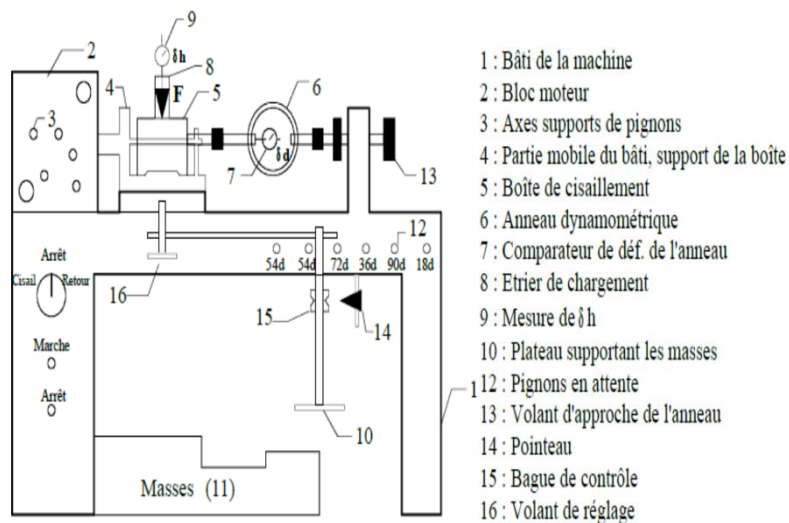


Figure 2:15 Dispositif de cisaillement directe

2.3.4.2 Préparation des échantillons

En premier temps, pour chaque mélange, on procède à la préparation de l'échantillon suivi d'un compactage statique à des teneurs en eau et densité sèche correspondant à l'optimum de Proctor normal (OPN). Puis, l'échantillon est découpé à l'aide d'une trousse coupante, qui possède les mêmes dimensions que celles de la boîte de cisaillement (forme circulaire, de $D=6$ cm et de hauteur 2 cm). Pour s'assurer que la surface de contact est planée, on procède à l'arrosage et au lissage de l'échantillon dans les deux côtés, supérieur et inférieur, avec remplissage des vides. Après la phase de préparation de l'échantillon, il est mis dans la boîte de cisaillement appelée aussi boîte de Casagharde.

2.3.4.3 Contraintes verticales

Au cours de la séance de T.P. vous travaillerez sur un sable sec. Vous réaliserez trois essais pour les valeurs de contraintes normales suivantes : Essai n°1 : $\sigma = 106$ kPa, Essai n°2 : $\sigma = 210$ kPa et Essai n°3 : $\sigma = 318$ kPa.

Les masses à disposer sur le plateau de l'étrier (n° 10) sont fonction de la contrainte verticale σ souhaitée, de la section initiale de l'échantillon de sable (6 cm de Diamètre) et du bras de levier qui permet de multiplier par un facteur 10 la force créée par la mise en place des masses.

2.3.4.4 Vitesse de cisaillement

La vitesse de cisaillement est conditionnée par le type d'essai que l'on veut réaliser. Pour un essai non consolidé non drainé, ou sur sol grenu, nous pouvons travailler avec une vitesse relativement élevée de 1 mm/min.

2.4 Conclusion

Un programme expérimental a été entrepris pour étudier les changements dans le comportement d'un sol sableux affecté par l'inclusion de différentes quantités de ciment et/ou de fibres PP. Les essais réalisés étaient des essais de compactage normal, de cisaillement direct (UU et CD) et de CBR..

Chapitre 3 Comportement de Compactage

3.1 Introduction

Pour obtenir la meilleure performance du matériau sur le terrain en termes de résistance, on a besoin de deux paramètres essentiels, le poids volumique sec maximal (γ_{dmax}) et la teneur en eau optimale (W_{opt}), qui résultent d'un essai de compactage normal dans le domaine géotechnique. Selon (Consoli et al., 2016), l'un des paramètres les plus importants affectant les propriétés des sols cimentés est le taux de compactage.

Dans ce chapitre, les résultats des essais de compactage normal sur différents mélanges de 0, 6, 9 et 12% de teneur en ciment (C%) avec ou sans 0.25%, 0.50% et 0.75% (PP%) de teneur en fibres PP et le changement de l'indice de vides (e) et du degré de saturation (S_r) sont discutés.

3.2 Caractéristiques de compactage

3.2.1 Effet de la teneur en fibres PP

La figure 3:1 illustre les courbes Proctor normales du sable de dunes, renforcé par diverses teneurs en fibres de polypropylène, dans le but de déterminer les valeurs du poids volumique maximal (γ_{dmax}) et de la teneur en eau optimale (W_{opt}) pour chaque mélange.

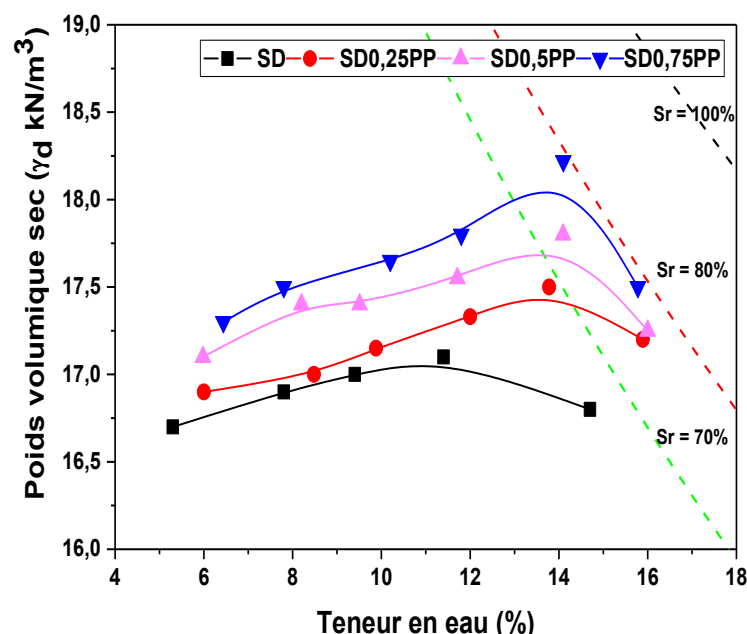


Figure 3:1 Courbes Proctor normal des mélange SDyPP.

Les résultats montrent que l'ajout de fibres de polypropylène au sable a eu un impact significatif sur les paramètres du test Proctor normal. On observe une augmentation significative du poids volumique sec maximal, qui est passé de 17.1 kN/m^3 pour le sable pur à 18.03 kN/m^3 en présence de 0.75% de fibres PP (gain de +5.44%). Ceci suggère que l'incorporation de fibres a conduit à une amélioration de la compacité du mélange sable-fibres. De plus, la teneur en eau optimale a également augmenté, passant de 11.15% pour le sable pur à 13.90% avec l'ajout de 0.75% de fibres PP (gain de +2.74%). Ceci implique que la combinaison de sable et de fibres requiert une quantité d'eau plus importante afin d'atteindre sa densité sèche maximale.

Les fibres créent un réseau d'armature 3D qui peut favoriser un réarrangement granulaire plus efficace et une augmentation de la surface spécifique totale du mélange.

3.2.2 Effet de la teneur en ciment

La figure 3:2 présente les résultats d'essais Proctor normal réalisés sur du sable dunaire stabilisé avec différents pourcentages de ciment.

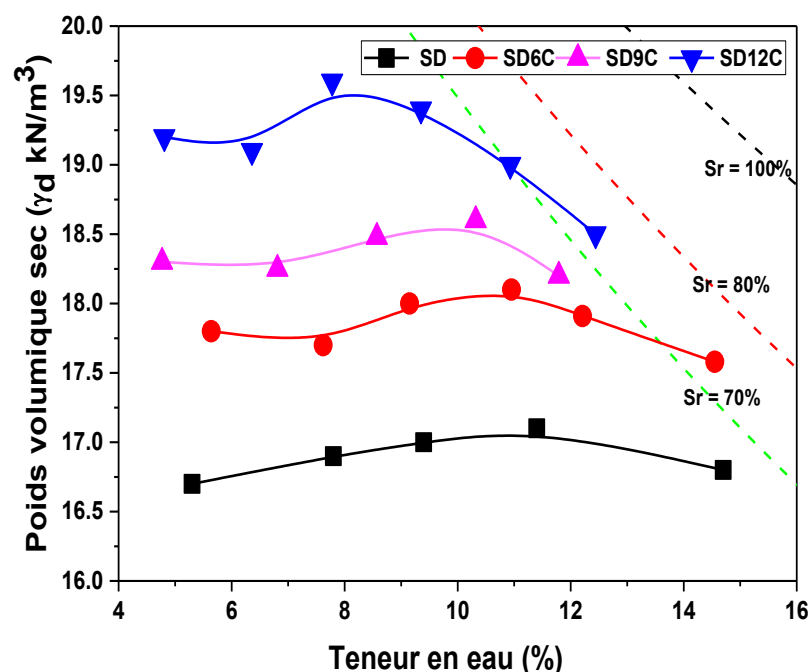


Figure 3:2 Courbes Proctor normal des mélanges SDxC.

Ces résultats montrent que l'ajout de ciment au sable a eu un impact significatif sur les paramètres du test Proctor normal :

- ❖ Le poids volumique sec maximal a augmenté de manière importante, passant de 17.1 kN/m^3 pour le sable seul à 19.49 kN/m^3 avec 12% de ciment (ex : $+0.49 \text{ kN/m}^3$ entre 6-9%

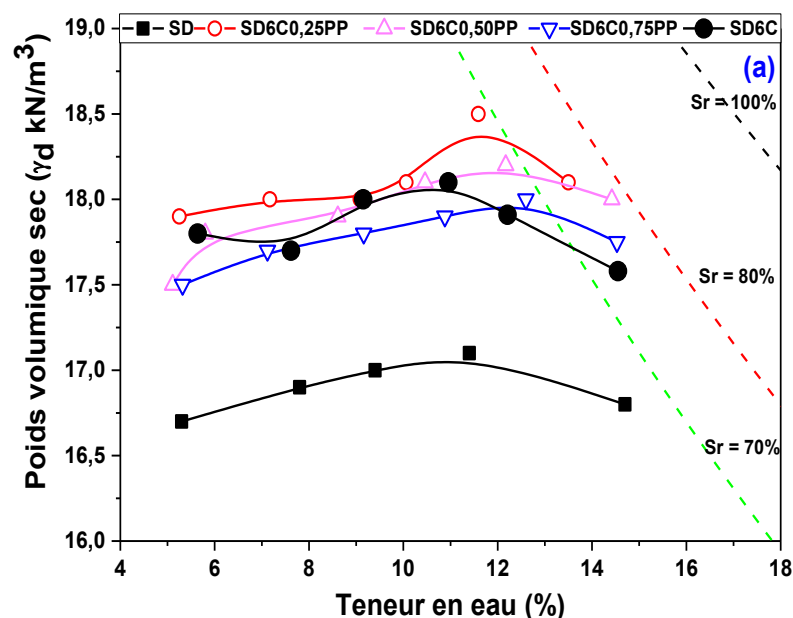
vs $+0.96 \text{ kN/m}^3$ entre 9-12%). Cela indique que l'ajout de ciment a permis d'améliorer considérablement la compacité du mélange sable-ciment.

- ❖ La teneur en eau optimale a diminué, passant de 11.15% pour le sable seul à 8.13% avec 12% de ciment (-27% du besoin en eau à 12% ciment). Cela signifie que le mélange sable-ciment nécessite une plus faible quantité d'eau pour atteindre sa densité sèche maximale.

On constate que l'ajout de 6% de ciment au sable a permis d'atteindre un poids volumique sec maximal de 18.04 kN/m^3 , tandis que l'ajout de 0.75% de fibres de polypropylène a donné un poids volumique sec maximal très proche, à 18.03 kN/m^3 .

3.2.3 Effet des teneurs en ciment et en fibres PP

Les figures 3:3(a), 3(b), 3(c) présentent les résultats d'essais Proctor normal réalisés sur le sable dunaire stabilisé avec 6%, 9% et 12% de ciment et renforcé avec 0.25%, 0.50% et 0.75% de fibres PP. L'ajout de fibres PP à faible dose (0.25%) permet d'améliorer encore le poids volumique sec maximal, grâce à l'effet de renforcement des fibres. La teneur en eau optimale augmente généralement avec l'ajout de fibres, du fait de l'absorption d'eau par ces dernières. De plus, à des teneurs en fibres plus élevées (0.50% et 0.75%), le poids volumique sec maximal diminue par rapport au mélange avec 0.25% de fibres. Cela suggère qu'il existe une teneur optimale en fibres pour maximiser la compacité.



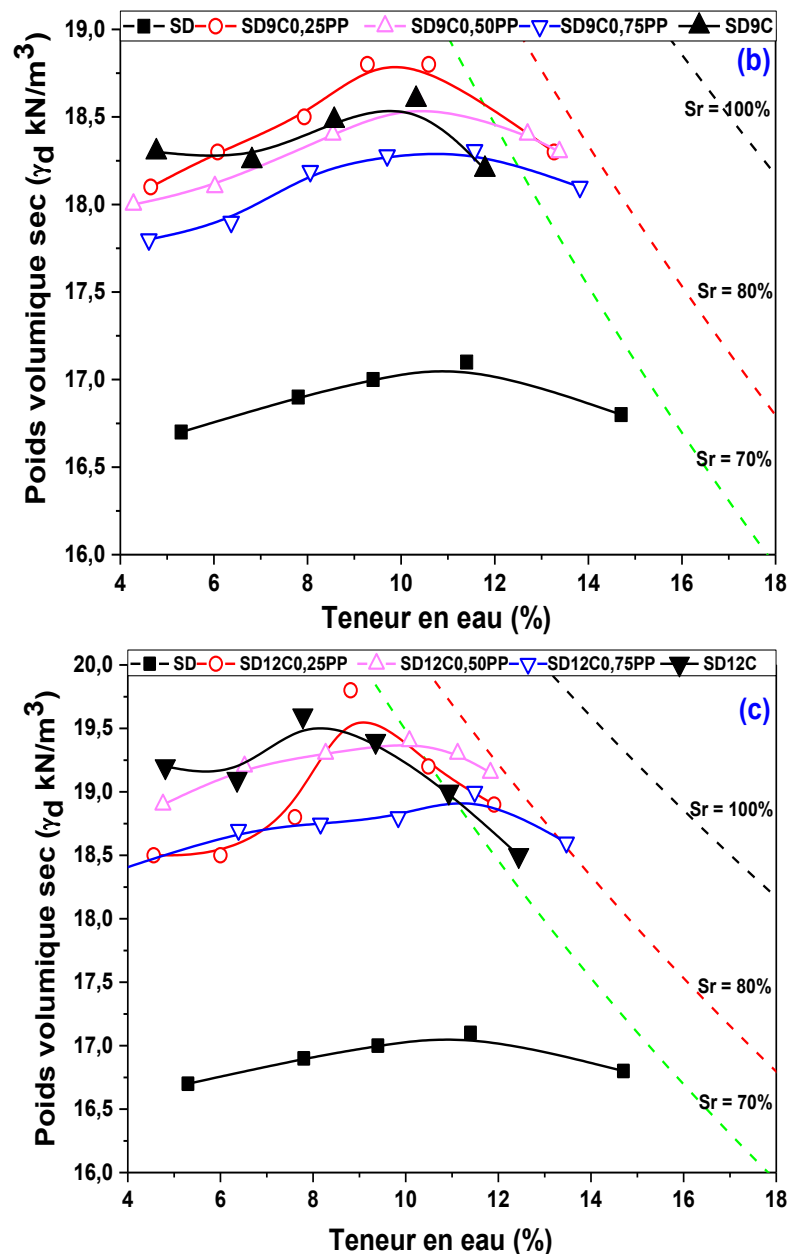


Figure 3:3 Courbes Proctor normal des mélanges (a)SD6CyPP, (b)SD9CyPP et (c)SD12CyPP.

3.3 Effet du ciment et de la fibre PP sur les paramètres de compactage

3.3.1 Poids volumique sec maximal ($\gamma_{d,max}$)

D'après la figure 3:4, une augmentation du pourcentage de ciment de 0% à 12% entraîne une augmentation significative du poids volumique sec maximal ($\gamma_{d,max}$), passant de 17.1 kN/m³ à 19.49 kN/m³. Cette variation est due au fait que le ciment est constitué de particules beaucoup plus fines et a une G_s plus élevée que le sable et les fibres PP, ce qui donne un mélange dense, le ciment occupant plus de vides au départ, puis, avec une teneur plus élevée, contribuant davantage au poids volumique du mélange en raison d'une G_s plus élevée. Une tendance similaire de variation a été

rapportée par certains chercheurs dans le cas de sols stabilisés avec du ciment (Al-Aghbari et al., 2009).

Sans ciment, l'ajout de fibres PP a un impact plus modéré sur le poids volumique sec maximal. Avec 0.75% de fibres PP, la densité atteint 18.03 kN/m^3 , soit une augmentation d'environ 5% par rapport au sable seul.

Lorsqu'on ajoute à la fois du ciment et des fibres PP, on observe un effet synergique. Avec 6% de ciment et 0.25% de fibres PP, le poids volumique sec maximal atteint 18.37 kN/m^3 , soit la valeur la plus élevée. Cependant, à des teneurs en fibres plus importantes (0.50% et 0.75%), le poids volumique diminue légèrement par rapport au maximum obtenu à 0.25% de fibres. Ce phénomène indique qu'il existe une teneur optimale en fibres, au-delà de laquelle leur effet positif sur la compacité commence à s'estomper.

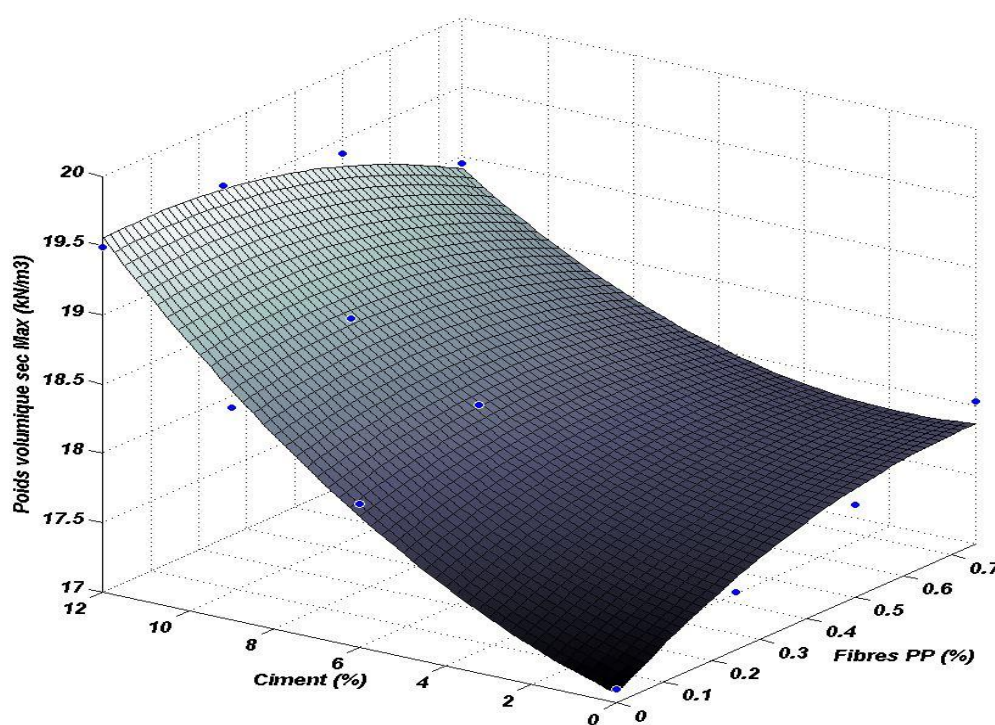


Figure 3:4 Variation du poids volumique sec maximal du sable dunaire en fonction de la teneur en fibres et en ciment

3.3.2 Teneur en eau optimale w_{opt} (%)

La figure 3:5 illustre que l'augmentation du pourcentage de ciment de 0% à 12% entraîne une diminution significative de la teneur en eau optimale, qui passe de 11.15% à 8.13%. Cette diminution s'explique par le fait que le ciment consomme une partie de l'eau pour son hydratation, par surface spécifique, réduisant ainsi la quantité d'eau nécessaire pour une compaction optimale du mélange.

Lorsqu'on ajoute à la fois du ciment et des fibres PP, on observe un effet combiné sur la teneur en eau optimale. Avec 6% de ciment et 0.25% de fibres PP, la teneur en eau optimale est de 11.69%, soit une légère augmentation par rapport au ciment seul (10.77%). Cependant, à des teneurs en fibres plus importantes (0.50% et 0.75%), la teneur en eau optimale continue d'augmenter, atteignant respectivement 12.05% et 12.47%. Ce phénomène indique qu'il existe une teneur optimale en fibres, au-delà de laquelle leur effet hydrophile devient prédominant, nécessitant une quantité d'eau plus importante pour la compaction.

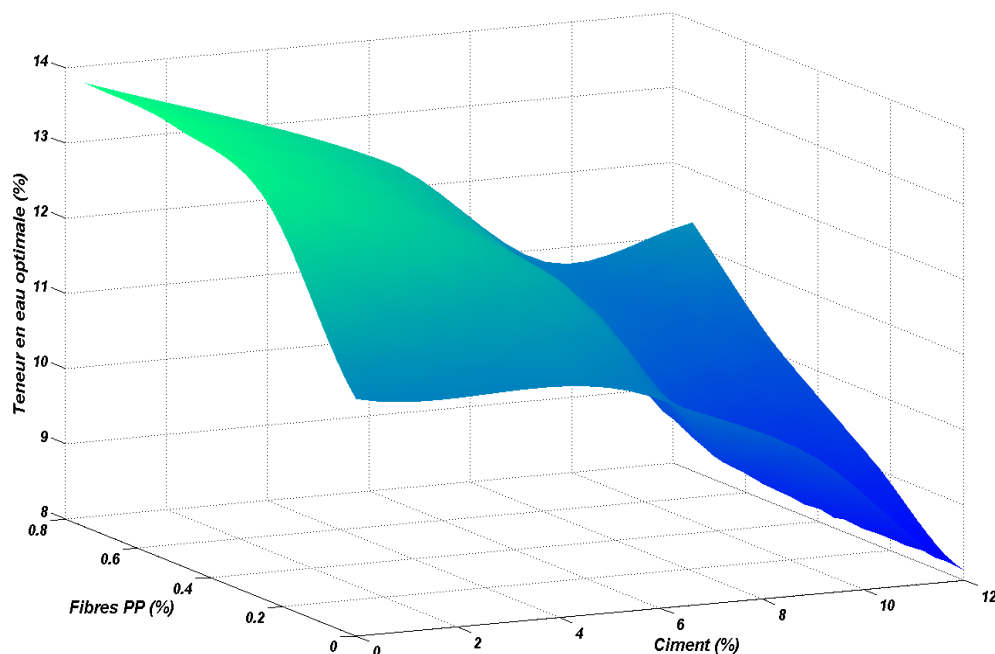


Figure 3:5 Teneur en eau optimale selon les teneurs en Ciment et en Fibres PP.

Généralement, les particules de fibres PP sont plus fines que les particules de sable ; par conséquent, l'ajout de fibres PP au sable modifie la granulométrie de manière à créer plus de vides qui seront occupés par l'eau. Ces facteurs se neutralisent mutuellement et affectent (Consoli et al., 2010).

3.3.3 Indice des vides et degré de saturation au poids volumique sec maximal

Selon (Edil and Bosscher, 1994), le comportement mécanique des mélanges de sol-fibre peut dépendre plus du volume des vides dans le mélange que ($\gamma_{d,max}$). L'indice des vides est un facteur important de l'adhérence du ciment qui peut être une indication du niveau de contact entre les particules (Consoli et al., 2010). En outre, la quantité d'eau entourant les particules joue un rôle important dans le comportement général des mélanges, en particulier lorsque du ciment est ajouté.

Afin d'obtenir les valeurs e à $(\gamma_{d,max})$ pour les mélanges, leurs valeurs de densité relative (G_s) ont été calculées en obtenant la moyenne pondérée des valeurs (G_s) des mélanges à partir de l'équation suivante (Éq. 3:1):

$$G_s = \frac{SD(\%) G_{ss} W_s + PP_f(\%) G_{sf} W_s + C_c(\%) G_{sc} W_s}{SD(\%) W_s + PP_f(\%) W_s + C_c(\%) W_s} \quad (3:1)$$

où : W_s : poids du sol séché ; G_{ss} = densité relative du sable ; G_{sf} = densité relative des fibres PP ; et G_{sc} = densité relative du ciment.

Les valeurs $(\gamma_{d,max})$ et γ_s des mélanges ont permis de calculer les valeurs (e) à l'aide de l'équation suivante (Éq. 3:2):

$$e = \frac{\gamma_s}{\gamma_{dmax}} - 1 \quad (3:2)$$

où : $\gamma_{d,max}$ = poids volumique sec max; et γ_s = poids volumique des graines solide.

La figure 3:6 montre la variation de e en fonction de la teneur en fibres PP (PP%), respectivement, pour une teneur en ciment (C%) variant de 0 à 12 %. Lorsque le pourcentage de ciment augmente de 0% à 12%, l'indice des vides (e) diminue de manière significative. Pour le sable de dune seul (0% PP), e passe de 0.50 à 0.387 pour sable traité avec 12% de ciment. Cette diminution importante de l'indice des vides s'explique par l'effet liant du ciment, qui comble les espaces vides entre les grains de sable et crée une structure plus dense.

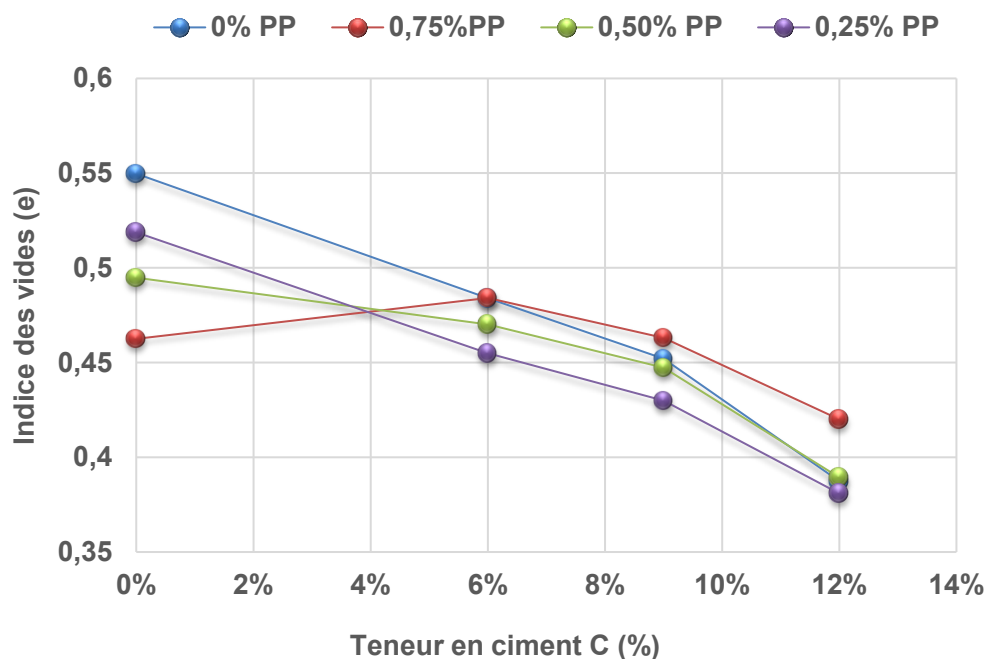


Figure 3:6 Variation de l'indice des vides e en fonction des teneurs en ciment et en fibres PP.

Pour le sable renforcé par les fibres PP (sans ciment 0% ciment), l'ajout de fibres PP permet également de réduire l'indice des vides (avec 0,75% de fibres PP, e diminue de 0.50 à 0.462). Cet effet s'explique par la création d'un réseau tridimensionnel de fibres qui limite le déplacement des grains de sable, améliorant ainsi la compacité du mélange. Selon (Youwai and Bergado, 2003), le réarrangement des particules ainsi que la compressibilité de la fibre de pneu peuvent modifier les valeurs de e.

Dans le sable traité avec ciment et renforcé par fibres PP, on observe un effet synergique (avec 6% de ciment et 0.25% de fibres PP, l'indice des vides atteint sa valeur la plus faible : 0.455. À des teneurs en fibres plus importantes (0.50% et 0.75%), l'indice des vides augmente légèrement par rapport au maximum obtenu à 0.25% de fibres. Ce phénomène indique qu'il existe une teneur optimale en fibres, au-delà de laquelle leur effet bénéfique sur la compacité commence à s'estomper.

Les valeurs du degré de saturation (S_r) au $\gamma_{d,max}$ ont été calculées à l'aide de l'équation suivante (Éq. 3:3):

$$e \cdot S_r = w_{opt} \cdot G_s \quad (3:3)$$

La figure 3:7 met en évidence une augmentation du degré de saturation (S_r) en fonction de la variation du pourcentage de ciment, passant de 0% à 6%. Au-delà de 6%, le S_r passe de 59% à 56.75% pour une teneur en ciment de 12%. Cette augmentation de la saturation, par rapport le S_r de sable de dune, est due au phénomène d'absorption d'une fraction de l'eau par le ciment lors de son hydratation, ce qui entraîne une diminution l'indice des vides dans le mélange.

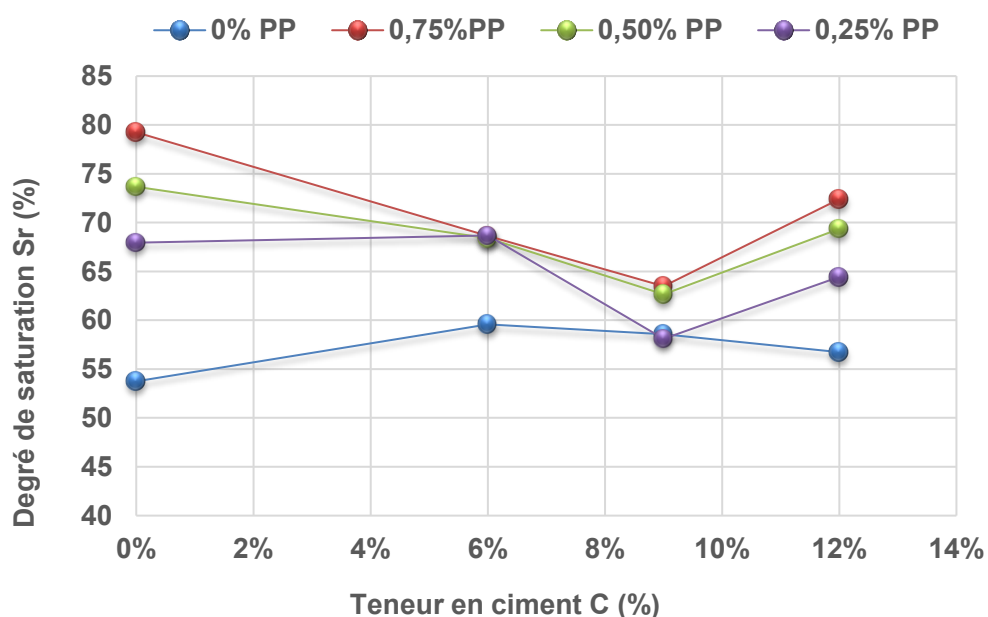


Figure 3:7 Variation du degré de saturation (S_r) en fonction des teneurs en ciment et en fibres PP

En l'absence de ciment (0 % de ciment), l'incorporation de fibres PP conduit à une augmentation significative du degré de saturation (avec une teneur de 0.75 % en fibres PP, S_r atteint 79.25 %). Cette observation peut être attribuée à la capacité des fibres de retenir une fraction de l'eau, ce qui conduit à une amélioration de la saturation du mélange.

Lorsque du ciment et des fibres PP sont ajoutés simultanément, on constate un effet combiné sur le degré de saturation. Avec une teneur de 6% en ciment et de 0.25% en fibres PP, le degré de saturation (S_r) atteint 68.68%, ce qui représente une valeur intermédiaire entre l'utilisation exclusive de ciment (59.58%) et celle des fibres seules (67.93%). Pour des teneurs en fibres plus élevées (0.50% et 0.75%), on observe une augmentation du degré de saturation, atteignant respectivement 68.39% et 68.62%. La raison de cette augmentation est que, en ajoutant des fibres PP, comme nous l'avons vu précédemment, l'indice des vides e diminue (jusqu'à 0.5%PP), tandis que la teneur en eau (w) augmente, ce qui entraîne une augmentation de S_r , car S_r est le rapport entre la teneur en eau et l'indice des vides. A partir d'une teneur en fibres de 0.75 %, la capacité de rétention d'eau des fibres devient prépondérante, ce qui permet de maintenir un degré de saturation élevé malgré la présence préalable de ciment.

3.4 Conclusion

Ce chapitre a étudié l'effet de l'ajout de ciment et de fibres de polypropylène (PP) sur les paramètres de compactage (poids volumique sec maximal γ_{dmax} et teneur en eau optimale w_{opt}) du sable de dune. Les principaux résultats sont les suivants :

- L'ajout de ciment seul a permis d'augmenter significativement le γ_{dmax} , passant de 17.1 kN/m³ pour le sable seul à 19.49 kN/m³ avec 12% de ciment. Cela s'explique par l'effet liant du ciment qui comble les vides.
- L'ajout de fibres PP seules a également permis de réduire l'indice des vides, mais dans une moindre mesure, atteignant 18.03 kN/m³ avec 0.75% de fibres PP.
- L'effet combiné du ciment et des fibres PP à faible dose (0.25%) a conduit à la valeur de γ_{dmax} la plus élevée (18.37 kN/m³), montrant un effet synergique.
- Concernant la w_{opt} , elle diminue de 11.15% à 8.13% avec l'ajout de 12% de ciment, le ciment consommant une partie de l'eau. Avec les fibres PP, la w_{opt} augmente, les fibres ayant un effet hydrophile.

- L'analyse de l'indice des vides (e) et du degré de saturation (S_r) a permis de mieux comprendre les mécanismes de compactage et les interactions complexes entre le ciment, les fibres et l'eau.

Pour compléter cette étude sur le comportement du mélange sable-ciment-fibres, il serait intéressant de présenter les résultats des essais de compression simple et de traction par fendage dans le chapitre 4. Cela permettrait d'évaluer l'impact du ciment et des fibres sur la résistance mécanique du sable de dune.

Chapitre 4 Comportement méca- nique des mélanges SD_xC_yPP

4.1 Introduction

L'essai de cisaillement direct est une méthode d'essai en laboratoire simple permettant d'évaluer les propriétés de résistance au cisaillement des sols. Il fournit des mesures de la résistance drainée et non drainée et des caractéristiques contrainte-déformation du sol. Cet essai est souvent inclus dans le programme d'essais en laboratoire des études géotechniques. Selon plusieurs chercheurs, tels que Consoli et al. (2010), Park (2011) et Szymkiewicz et al. (2012), l'essai de cisaillement direct est de loin la méthode la plus populaire pour tester la résistance au cisaillement des sols, car c'est l'une des méthodes les plus rapides et les moins coûteuses pour mesurer la résistance au cisaillement. Les échantillons ont été préparés sur la base du poids volumique sec maximal (γ_{dmax}) et de la teneur en eau optimale (W_{opt}) conformément à la norme NF P 94-093.

L'essai CBR (California bearing ratio) est un essai de résistance simple qui compare la capacité portante d'un matériau. Il est principalement destiné à évaluer la résistance des matériaux cohésifs dont la taille maximale des particules est inférieure à 19 mm, mais son utilisation ne se limite pas à cela. Il a été mis au point par la California Division of Highways vers 1930, puis adopté par de nombreux États, comtés, agences fédérales américaines et à l'échelle internationale.

Ce chapitre présente la procédure et les résultats des essais de cisaillement direct et de CBR réalisés sur différents mélanges de sols contenant 0, 6, 9 et 12 % de ciment (C%) et 0, 0.25%, 0.50% et 0.75% de fibres Polypropylène (PP%), à l'état saturé et non saturé.

4.2 La résistance au cisaillement (Essai UU)

4.2.1 Résistance au cisaillement du sable de dune

Les résultats de l'essai cisaillement direct du sable de dune sont présente dans la figure 4:1(a). Ils montrent que les courbes contraintes-déplacement croisent vers un pic de contraintes et les contraintes se relâchent pour se stabiliser sur le palier de l'état critique (appelé résistance résiduelle) (Figure 4:1(a)). Dans ce cas , le sable est appelé ‘dilatant’ et moyennement dense (Dhouib, 2016) . Au pic, les grains sont bien serrés sur le palier de l'état critique, les laissions entre grains commencent à diminuer jusqu'à se disloquer sur sur le palier de la résistance résiduelle (Dhouib, 2016). Ce comportement est similaire à celui d'un échantillon surconsolidé.

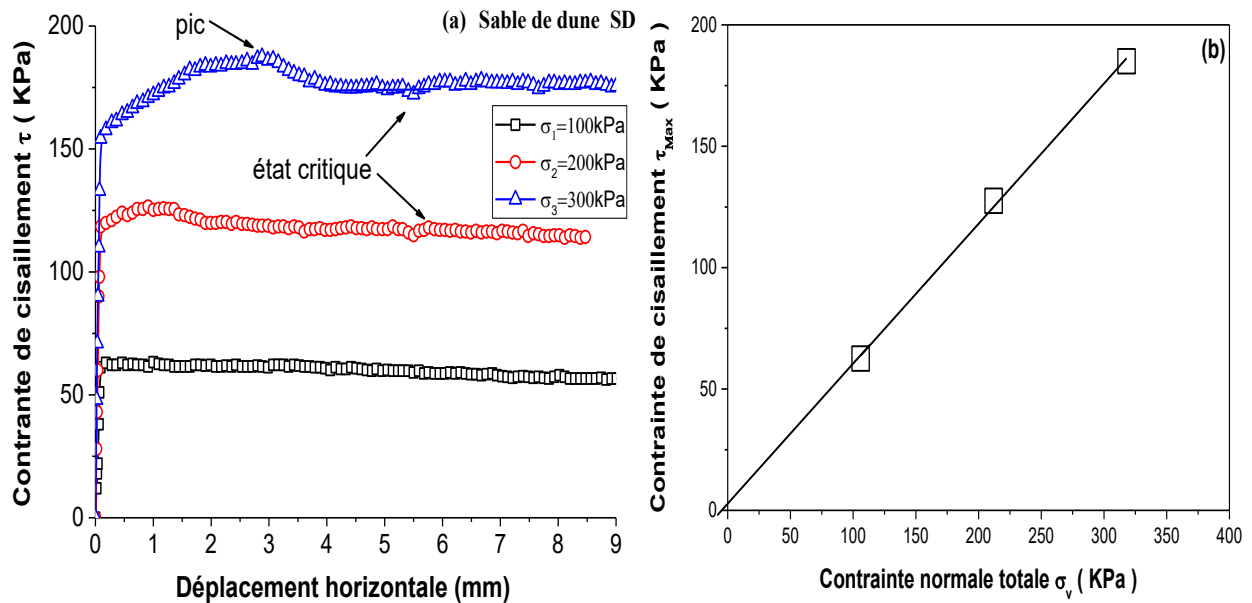


Figure 4:1 Résistance au cisaillement (UU) de sable de dune : (a) Relation Contrainte de cisaillement-déplacement (b) Plan de Mohr-Coulomb

Les caractéristiques mécaniques de sable traité au ciment s'obtient en traçant les droites de Coulomb (courbes intrinsèques) dans un repère orthonormé qui présente, en abscisses les contraintes normales (σ_v) et en ordonnées les contraintes de cisaillements maximales (τ_{max}) (Figure 4:1b). La courbe intrinsèque dans le plan de Mohr-Coulomb, établie sur la figure 4:1(b), conduite aux paramètres de cisaillement apparents suivants : angle de frottement apparent ϕ_{uu} de 30° et cohésion apparente C_{uu} de 1.65kPa.

4.2.2 Résistance au cisaillement de sable de dune traité avec ciment

Les figures 4:2(a), 2(b), 2(c) illustrent la relation entre la contrainte de cisaillement et le déplacement pour le sable de dune traité respectivement avec 6 %, 9 % et 12 % de ciment.

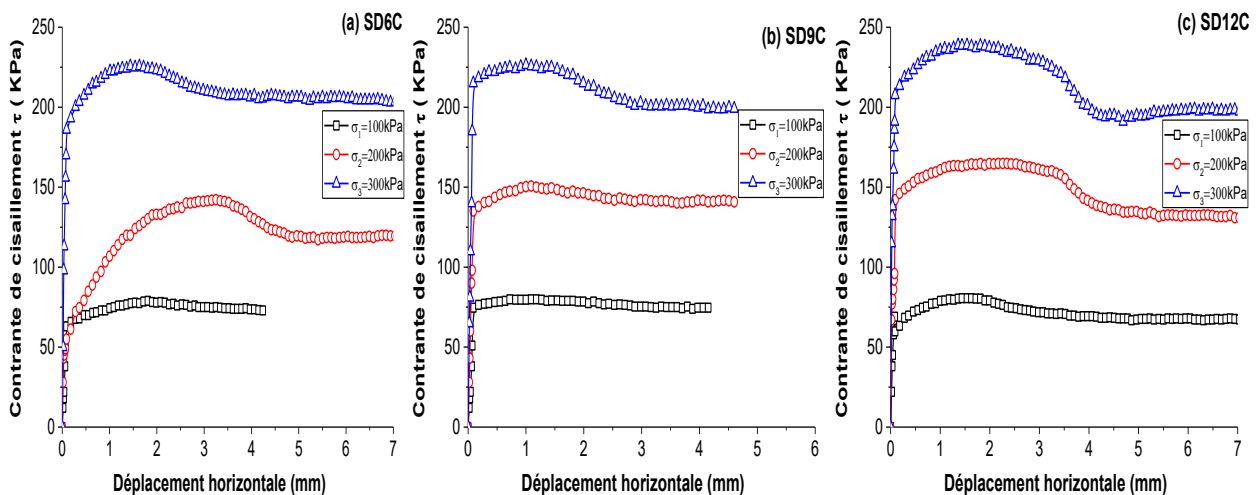


Figure 4:2 Relation contrainte de cisaillement-déplacement de sable de dune traité au ciment (a) 6%C, (b) 9%C et (c) 12%C

Les échantillons traités au ciment présentent un comportement semblable à celui du sable seul (figure 4:1). Ce comportement s'apparente à celui d'un échantillon surconsolidé. D'après la figure 4:2, on constate que la résistance au cisaillement maximale augmente avec le pourcentage du ciment. De plus, la résistance au cisaillement sous une contrainte normale de 50 kPa demeure quasiment constante pour les différentes teneurs en ciment. Cela indique que l'effet de la teneur en ciment est négligeable pour des contraintes inférieures à 50 kPa.

En utilisant le sable de dune comme référence pour la comparaison de la résistance maximale au cisaillement, nous constatons une augmentation de 28 % avec des proportions de ciment de 6 et 9 %. Pour une teneur en ciment de 12 %, cette augmentation varie entre 29 et 32 % pour toutes les contraintes verticales (Figure 4:3). Les pentes des droites représentent les tangentes des angles de frottement ϕ_{uu} des mélanges sable-ciment, d'une part, d'autre part, les cohésions C_{uu} s'obtiennent par l'intersection de ces droites avec l'axe des ordonnées. Les résultats sont présentés graphiquement dans la figure 4:4.

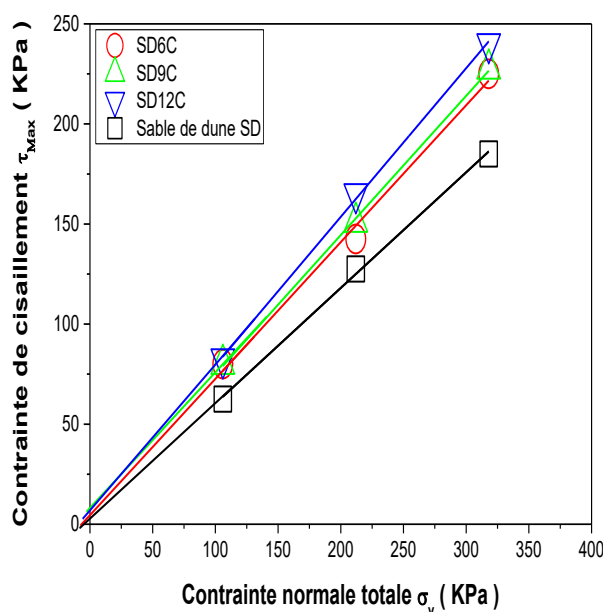


Figure 4:3 Courbes intrinsèque du sable traité au ciment

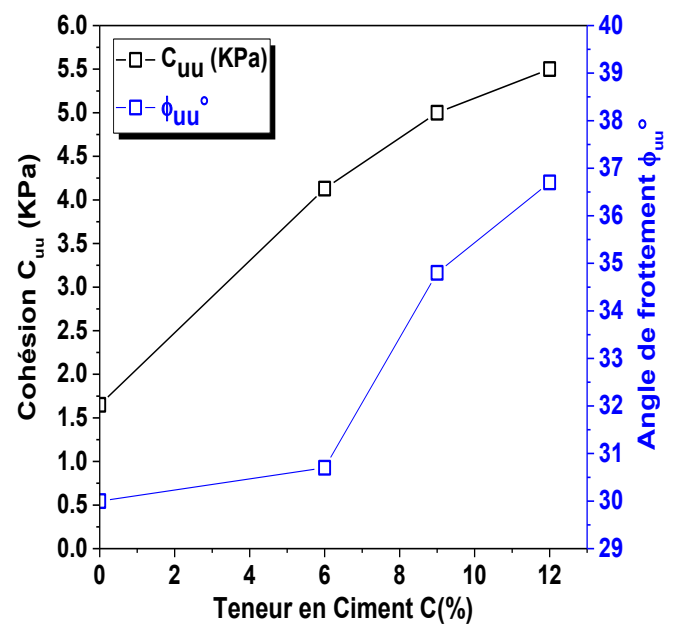


Figure 4:4 Variation de la cohésion et de l'angle de frottement en fonction de la teneur en ciment

D'après la figure 4:4, on observe que l'angle de frottement apparent (ϕ_{uu}) et la cohésion apparente (C_{uu}) du sable traité croissent avec le dosage en ciment. Cette augmentation est particulièrement significative pour le sable traité à 12 % de ciment. Ce phénomène s'explique par la formation de liaisons intergranulaires de cimentation entre les particules. Ces liaisons, renforcées par des durées de durcissement prolongées, entraînent une hausse de la cohésion. Elles augmentent la résistance

des particules au déplacement, nécessitant ainsi une force de cisaillement plus élevée pour provoquer la rupture. Ces résultats sont similaires à ceux rapportés par (Schnaid et al., 2001).

4.2.3 Résistance au cisaillement de sable de dune renforcé par des fibres PP

Les figures 4:5(a), 5(b) et 5(c) illustrent la relation entre la contrainte de cisaillement et le déplacement pour un sable de dune renforcé respectivement par 0.25 %, 0.50 % et 0.75 % de fibres de polypropylène (PP). On observe que les courbes contrainte-déplacement présentent une stabilisation progressive vers un palier de contrainte de cisaillement (τ), correspondant à l'état critique. Ce comportement est caractéristique d'un sable lâche, désigné dans ce cas comme un "sable contractant". De plus, les déplacements (déformation) dans l'échantillon de sable renforcé sont plus importants que les déplacements mobilisés dans l'échantillon de sable cimenté. En effet, le pic de contraintes est atteint pour seulement 1 à 1.5 mm de déplacement dans le sable traité, alors que le palier de stabilisation n'est observé que pour 3 à 5 mm de déplacement dans le sable renforcé.

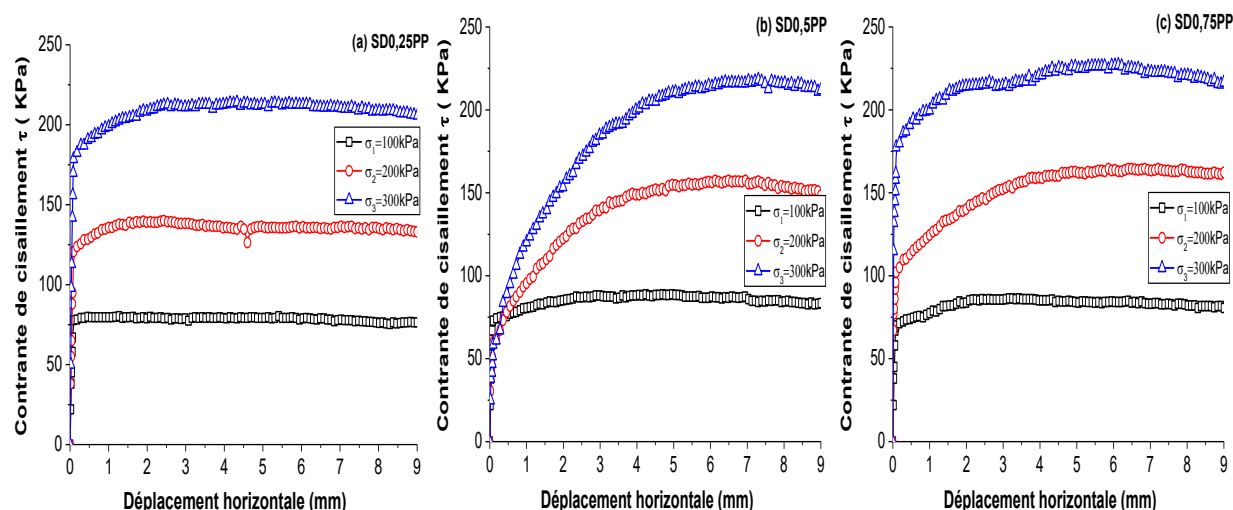


Figure 4:5 Relation contrainte de cisaillement-déplacement de sable de dune renforcé par (a) 0.25%PP, (b) 0.50%PP et (c) 0.75%PP

D'après la figure 4:6, on observe que l'ajout de fibres de polypropylène (PP) au sable de dune entraîne une augmentation significative de la contrainte de cisaillement maximale. Cela démontre que l'ajout de fibres PP améliore significativement la résistance au cisaillement du sable de dune, avec un optimum autour de 0.50 %PP. L'ajout de fibres de polypropylène au sable de dune permet d'augmenter significativement sa cohésion apparente et son angle de frottement (Figure 4:6). Ces améliorations sont maximales pour un dosage en fibres de l'ordre de 0.50 %. L'ajout de fibres provoque une augmentation modérée, mais constante de l'angle de frottement (de 30.4° à 33.6°). Ce renforcement fibreux est donc une technique prometteuse pour stabiliser le sable de dune. Le sable renforcé se comporte comme un matériau cohérent frottant. Sa résistance dépend à la fois de la contrainte

normale (frottement) et d'une cohésion importante indépendante de cette contrainte (apport des fibres).

L'amélioration des caractéristiques de cisaillement est principalement due à l'apparition d'une cohésion apparente significative induite par le réseau de fibres, complétée par une augmentation modérée de l'angle de frottement.

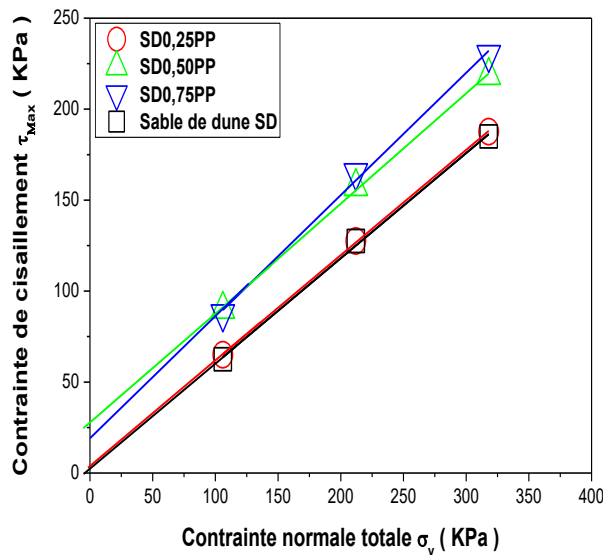


Figure 4:6 Courbes intrinsèque du sable renforcé par fibre PP

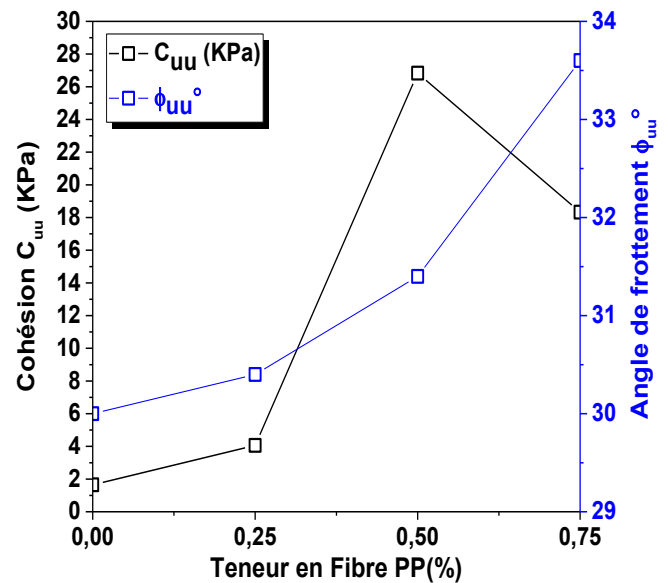


Figure 4:7 Variation de la cohésion et de l'angle de frottement en fonction de la teneur en fibre

4.2.4 Résistance au cisaillement de sable de dune traité avec 6% de ciment et renforcé par des fibres PP

Les figures 4:8(a), 8(b) et 8(c) illustrent la relation entre la contrainte de cisaillement et le déplacement pour un sable de dune traité avec 6% ciment et renforcé respectivement par 0.25 %, 0.50 % et 0.75 % de fibres de polypropylène (PP).

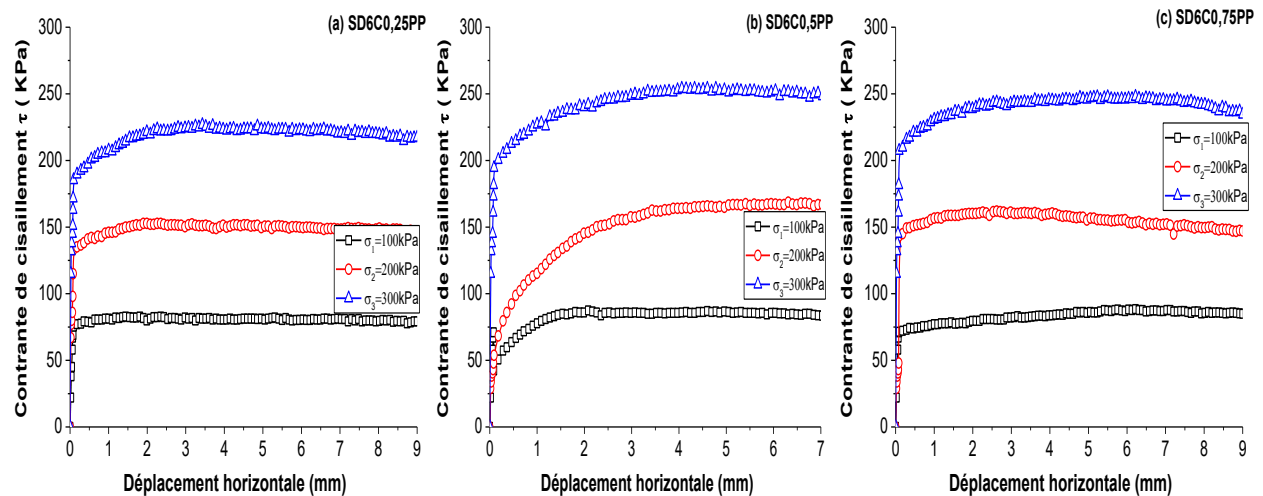


Figure 4:8 Relation contrainte de cisaillement-déplacement de sable de dune traité avec 6% ciment et renforcé par (a) 0.25%PP, (b) 0.50%PP et (c) 0.75%PP

Le comportement est caractéristique d'un sable lâche, désigné dans ce cas comme un "sable contractant". Le sable de dune traité uniquement au ciment (SD6C) présente une amélioration notable de la résistance au cisaillement par rapport au sable naturel. Par exemple, à une contrainte normale de 318 kPa, la contrainte de cisaillement maximale passe de 185 kPa (sable naturel) à environ 187.65 kPa (SD6C0.25PP), ce qui montre une légère amélioration liée à l'ajout de fibres. À 0.50 % (SD6C0.50PP) de fibres, on observe une augmentation significative de la contrainte de cisaillement maximale (p. ex. 218.5 kPa à 318 kPa de contrainte normale), indiquant un effet synergique entre le ciment et les fibres (Figure 4:9). Le renforcement par fibres PP, combiné au traitement au ciment, améliore la résistance au cisaillement du sable de dune, avec une tendance à l'augmentation de la résistance en fonction de la teneur en fibres, jusqu'à 0.5 %.

Les améliorations sont maximales pour un dosage en fibres de l'ordre de 0.50 %, qui semble constituer un optimum en termes de résistance. Au-delà de 0.75 % de fibres, on observe une légère baisse des performances due à la saturation du mécanisme d'ancrage des fibres dans la matrice sablo-cimentaire.

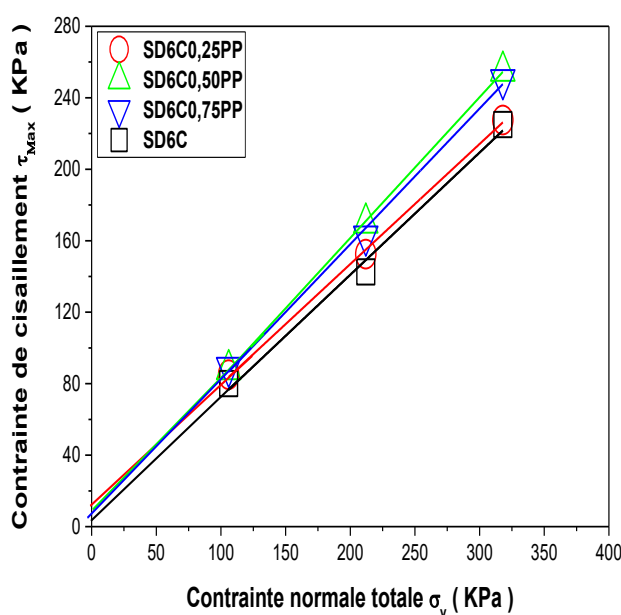


Figure 4:9 Courbes intrinsèque du sable traité avec 6% ciment et renforcé par fibre PP

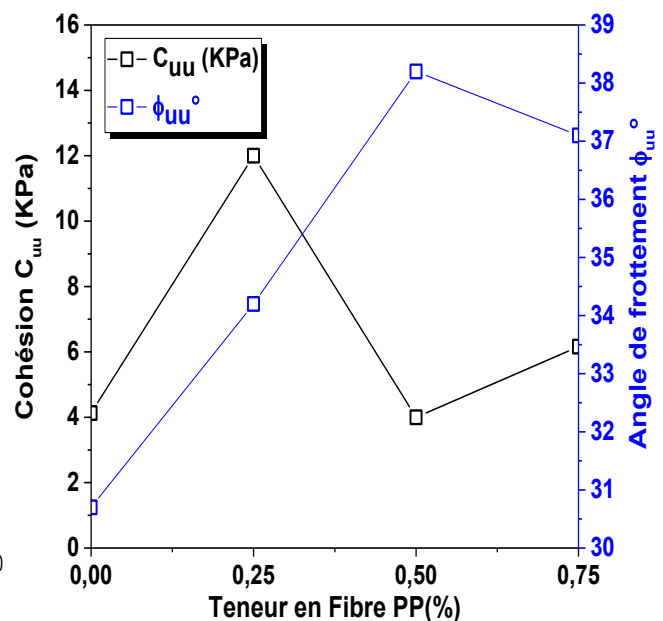


Figure 4:10 Variation de la cohésion et de l'angle de frottement en fonction de la teneur en fibre

D'après la figure 4:10, on observe que l'ajout de fibres de polypropylène au sable de dune traité avec 6% ciment permet d'augmenter significativement sa résistance au cisaillement, sa cohésion apparente et son angle de frottement. L'augmentation importante de la cohésion à 0.25 % (SD6C0.25PP) suivie d'une diminution à 0.50 % (SD6C0.50PP) puis d'une légère reprise à 0.75 % (SD6C0.75PP) suggère que le dosage optimal en fibres n'est pas simplement croissant. Des phénomènes tels que

la dispersion irrégulière des fibres, leur agglomération ou une modification de la compacité du mélange peuvent expliquer cette variabilité. D'autre part, L'augmentation de l'angle de frottement avec la teneur en fibres est un signe que les fibres contribuent à la résistance par frottement interne, probablement en augmentant la rugosité interne et en limitant les glissements entre particules.

4.2.5 Résistance au cisaillement de sable de dune traité avec 9% de ciment et renforcé par des fibres PP

Les figures 4:11(a), 11(b) et 11(c) illustrent la relation entre la contrainte de cisaillement et le déplacement pour un sable de dune traité avec 9% ciment et renforcé respectivement par 0.25 %, 0.50 % et 0.75 % de fibres de polypropylène (PP). L'échantillon renforcé avec 0.25 % de fibres présente un pic de résistance relativement modéré, suivi d'une chute de contrainte post-pic. Cette courbe est caractéristique d'un comportement dilatant, typique des matériaux granulaires à compacité moyenne à élever. En revanche, les courbes des échantillons à teneur plus élevée en fibres (0.50 % et 0.75 %) présentent une réponse plus ductile, avec un pic moins prononcé et une phase de déformation post-pic plus stable, s'apparentant au comportement contractant d'un matériau plus lâche. On observe que l'addition de fibres PP au sable de dune cimenté (9 %) induit une augmentation significative de la contrainte de cisaillement maximale, comme le confirment les résultats synthétisés dans la Figure 4:12.

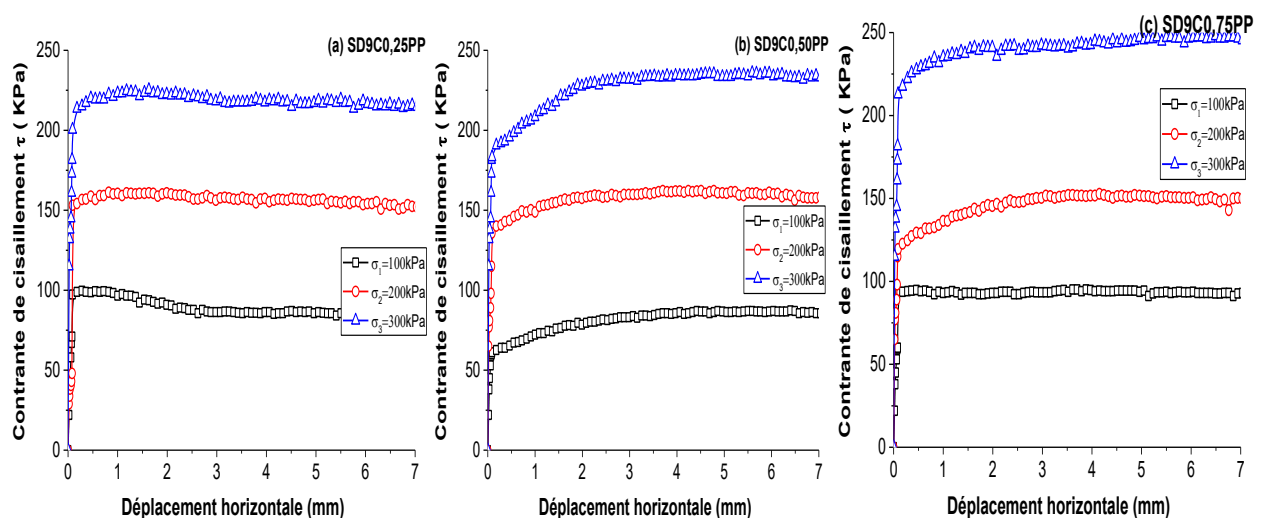


Figure 4:11 Relation contrainte de cisaillement-déplacement de sable de dune traité avec 9% ciment et renforcé par (a) 0.25%PP, (b) 0.50%PP et (c) 0.75%PP

D'après la Figure 4.13, on observe que l'ajout de fibres à des dosages de 0.5 % et 0.75 % entraîne une augmentation notable de l'angle de frottement, atteignant jusqu'à 35.9°, tandis que la cohésion apparente chute brutalement, passant à respectivement 12.83 kPa et 10.80 kPa, tout en se maintenant à une valeur néanmoins supérieure au double de celle du ciment seul.

En revanche, pour un dosage de 0.25 % de fibres, l'angle de frottement demeure inchangé à 30.7° , tandis que la cohésion apparente connaît une augmentation remarquable, atteignant 37.5 kPa. Ce pic singulier suggère qu'à faible teneur, les fibres interagissent de manière optimale avec la matrice cimentaire dense (9 %), sans en perturber la structure. Leur répartition homogène au sein du matériau forme un réseau d'armature continu, renforçant significativement la résistance mécanique. Ce mécanisme inhibe la propagation des microfissures, se traduisant par une augmentation substantielle de la cohésion apparente. Ainsi, le gain de résistance observé à ce dosage est intégralement attribuable à l'accroissement de la cohésion.

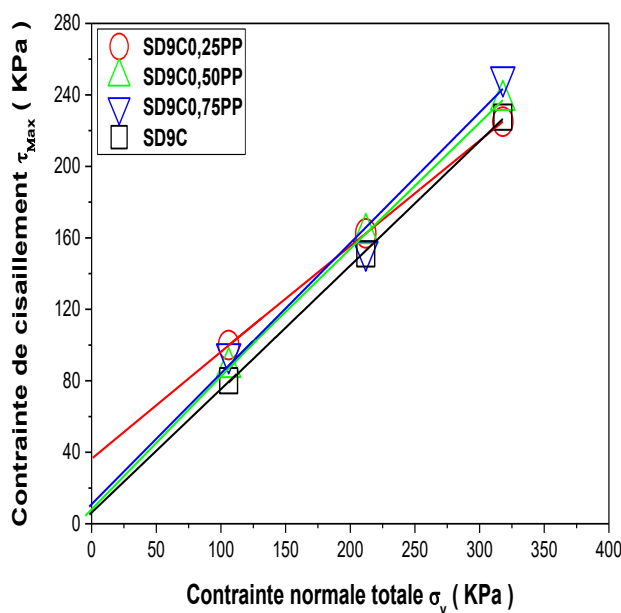


Figure 4:12 Courbes intrinsèque du sable traité avec 9% ciment et renforcé par fibre PP

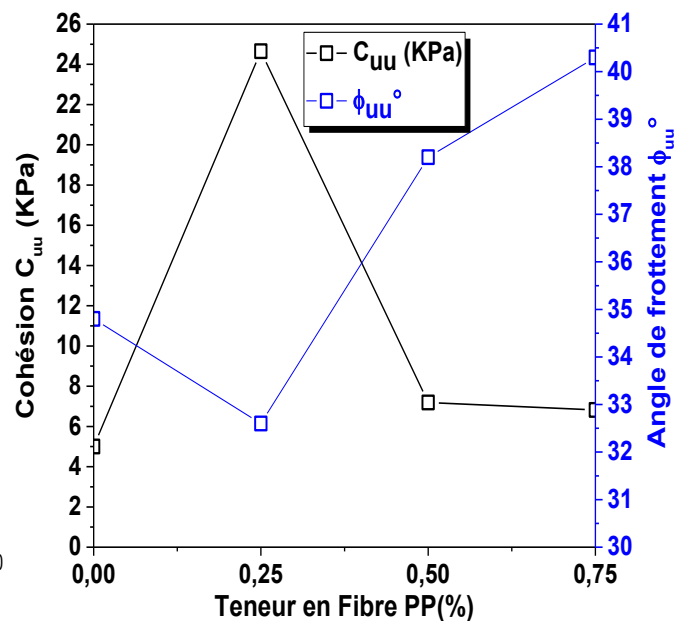


Figure 4:13 Variation de la cohésion et de l'angle de frottement en fonction de la teneur en fibre

L'effet négatif d'un excès de fibres sur la cohésion observé à 6% de ciment se confirme à 9%, mais il est moins prononcé. La matrice à 9% de ciment est plus robuste et résiste mieux à la perturbation causée par les fibres, maintenant une cohésion résiduelle plus élevée.

Aux dosages plus élevés des fibres, la quantité de fibres devient suffisante pour perturber l'intégrité de la matrice cimentaire dense. Elles peuvent créer des interfaces faibles, des zones de moindre compaction ou empêcher une hydratation uniforme. La résistance n'est plus assurée par la cohésion de la matrice, mais est de plus en plus reportée sur le mécanisme de frottement mobilisé par les fibres, comme en témoigne l'augmentation de l'angle ϕ_{uu} .

4.2.6 Résistance au cisaillement du sable de dune traité avec 12% de ciment et renforcé par des fibres PP

Les figures 4:14(a), 14(b) et 14(c) illustrent la relation entre la contrainte de cisaillement et le déplacement pour un sable de dune traité avec 12% ciment et renforcé respectivement par 0.25 %, 0.50 % et 0.75 % de fibres de polypropylène (PP). On observe que l'ajout de fibres PP améliore systématiquement la résistance au cisaillement, avec un gain maximal à 0.75% de fibres (Figure 4:15). Cela souligne l'efficacité d'un dosage élevé en fibres pour mobiliser pleinement les mécanismes de renforcement. De plus, le comportement est caractéristique d'un sable lâche, désigné dans ce cas comme un "sable contractant".

À 0.25% PP, on remarque une légère augmentation de la résistance à 106 kPa (92.5 kPa), mais une légère diminution aux contraintes normales plus élevées (212 et 318 kPa). Cela suggère une interaction sous-optimale fibres-matrice à ce dosage.

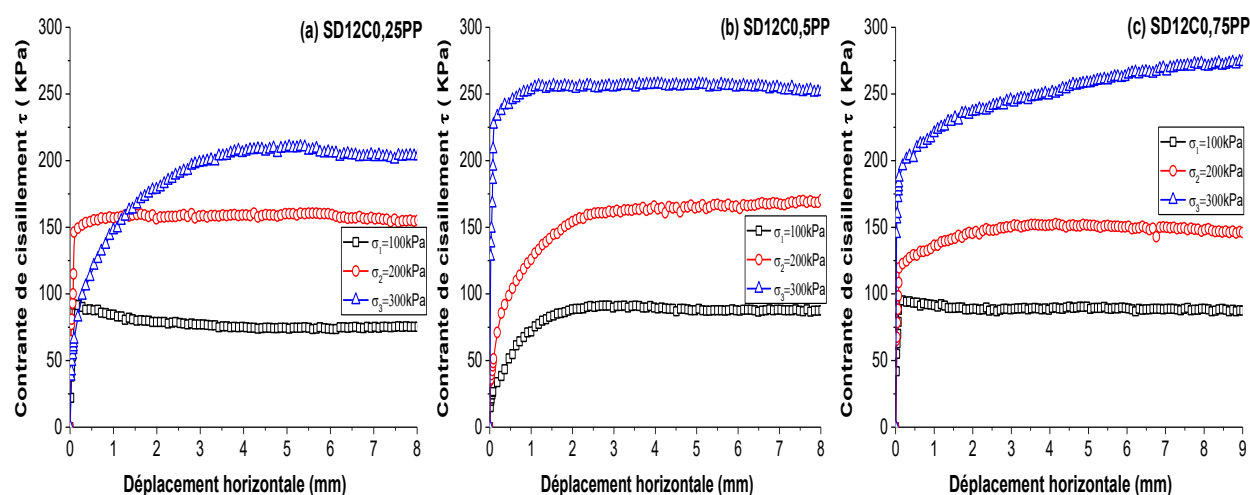


Figure 4:14 Relation contrainte de cisaillement-déplacement de sable de dune traité avec 12% ciment et renforcé par (a) 0.25%PP, (b) 0.50%PP et (c) 0.75%PP

Les faibles dosages de fibres (0.25% PP) augmentent la cohésion, mais réduisent le frottement (Figure 4:16). D'autre part, les dosages plus élevés (0.50–0.75% PP) restaurent un frottement interne très élevé (jusqu'à 40.3°) tout en maintenant une résistance globale améliorée. Le dosage de 0.75% PP donne la meilleure résistance globale (275 kPa à 318 kPa), montrant que le gain en frottement compense la perte de cohésion. Cela confirme que le compromis cohésion-frottement dépend étroitement du dosage en ciment et en fibres.

Contrairement aux essais à 6% et 9% de ciment, où un pic de cohésion était observé à 0.25% PP, le traitement à 12% de ciment favorise un comportement frictionnel dominant aux dosages fibreux élevés. La matrice cimentaire à 12% est suffisamment rigide pour permettre aux fibres de mobiliser

un frottement important, mais trop fragile pour maintenir une cohésion élevée avec des dosages fibreux importants.

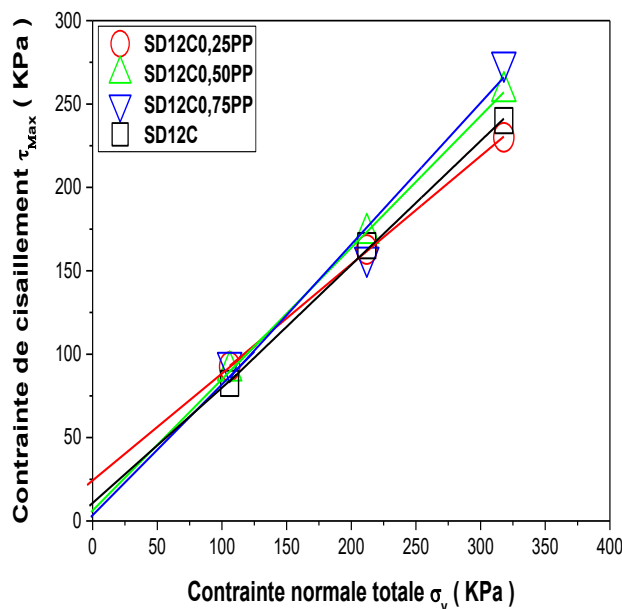


Figure 4:15 Courbes intrinsèque du sable traité avec 12% ciment et renforcé par fibre PP

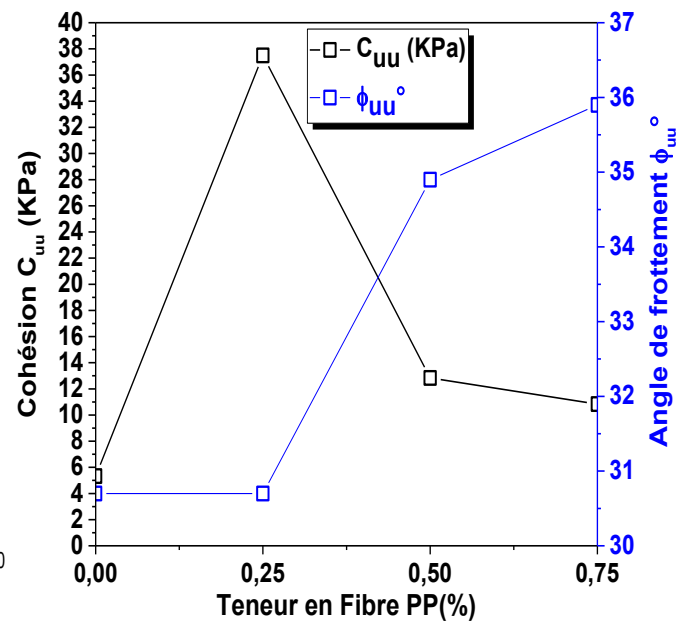


Figure 4:16 Variation de la cohésion et de l'angle de frottement en fonction de la teneur en fibre

4.2.7 Récapitulatif des essais de cisaillement UU

Le tableau 4:1 synthétise l'évolution des paramètres de résistance au cisaillement (cohésion apparente C_{uu} et angle de frottement apparent ϕ_{uu}) pour un sable de dune traité avec différentes teneurs en ciment (0%, 6%, 9%, 12%) et renforcé par des fibres de polypropylène (0%, 0.25%, 0.5%, 0.75%). On observe une interaction complexe entre le ciment et les fibres, où, le ciment contribue principalement à la cohésion en liant les grains entre eux. De plus, les fibres agissent comme une armature interne, redistribuant les contraintes et améliorant la résistance au cisaillement, soit en augmentant la cohésion apparente (par rapport au sable seul), soit en augmentant l'angle de frottement, selon le dosage.

Il existe un dosage critique (souvent 0.25% PP) où les fibres améliorent la cohésion sans perturber la matrice (tableau 4:1 : en rouge). Au-delà, elles tendent à créer des discontinuités, réduisant la cohésion, mais augmentant le frottement. L'ajout de fibres modifie le mécanisme de résistance :

- À faible dosage : renforcement de la cohésion,
- À Dosage élevé : augmentation du frottement.

À 6% et 9% de ciment, la matrice est moins rigide, permettant une meilleure synergie avec les fibres à faible dosage. À 12% de ciment, la matrice est plus fragile, et les fibres perturbent davantage la cohésion, mais améliorent significativement le frottement.

Tableau 4:1 Synthèse des résultats des essais de cisaillement non consolidé non drainé (UU) sur sable traité et renforcé

<i>Mélanges</i>	% du ciment	% des fibres PP	Cohésion apparente C_{uu} (kPa)	Angle de frottement apparent ϕ_{uu} (°)
Sable de dune	0	0	1.65	30.00
SD6C	6	0	4,13	30.70
SD9C	9	0	5.33	34.80
SD12C	12	0	5.0	36.70
SD0.25PP	0	0.25	12	34.20
SD0.50PP	0	0.50	4	38.20
SD0.75PP	0	0.75	6.16	37.10
SD6C 0.25PP	6	0.25	12	34.2
SD9C 0.25PP	9	0.25	37.5	30.7
SD12C 0.25PP	12	0.25	24.65	32.6
SD6C 0.50PP	6	0.5	4	38.2
SD9C 0.50PP	9	0.5	12.83	34.9
SD12C 0.50PP	12	0.5	7.19	38.2
SD6C 0.75PP	6	0.75	6.16	37.1
SD9C 0.75PP	9	0.75	10.83	35.9
SD12C 0.75PP	12	0.75	6.82	40.3

4.3 La portance CBR

L'essai le plus fréquemment utilisé pour caractériser le sol de fondation dans la conception des chaussées est l'essai CBR. L'importance de la valeur CBR découle des deux faits suivants : (1) pour presque tous les schémas de conception des chaussées, les matériaux non liés sont essentiellement caractérisés en fonction de leurs valeurs CBR lorsqu'ils sont compactés dans les couches de chaussée ; et (2) la valeur CBR a été associée à certaines propriétés constitutives des sols, telles que les indices de plasticité, la distribution granulométrique, la capacité portante, le module de réaction de la couche de fondation, le module de résilience, la résistance au cisaillement, la densité et la teneur en humidité de moulage (Al-Amoudi et al., 2002).

4.3.1 Effet du ciment et des fibres sur CBR immédiat

Les résultats des essais CBR immédiats pour les sols améliorés avec différentes quantités de ciment et de fibres PP sont présentés dans la figure 4:17. Les résultats des essais ont révélé que la valeur de l'indice CBR du sable provenant des dunes s'élevait à 23%. La valeur de l'indice CBR de 23%

observée pour l'échantillon de sable non traité et non renforcé augmente à environ 79% pour les échantillons contenant 0.50% de fibres PP, ce qui représente une augmentation de 235% par rapport à la valeur initiale du CBR de sable. Pour les échantillons de sol cimenté avec une teneur en ciment de 6 %, le CBR augmente à 29.6 %, ce qui représente une augmentation de 25 %. De plus, l'échantillon contenant 12 % de ciment sans fibres a présenté une valeur CBR de 33.23%, soit une augmentation de 41 % par rapport au mélange précédent (à teneur en ciment inférieure). Les résultats mettent surtout en évidence une augmentation remarquable de 283 % de la valeur CBR immédiate pour les échantillons composés de 12 % de ciment et 0.50% de fibres PP, atteignant une valeur de 96%. Le sable amélioré avec 9 % de ciment et 0.50% de fibres PP a obtenu une valeur de l'indice CBR d'environ 86.60%.

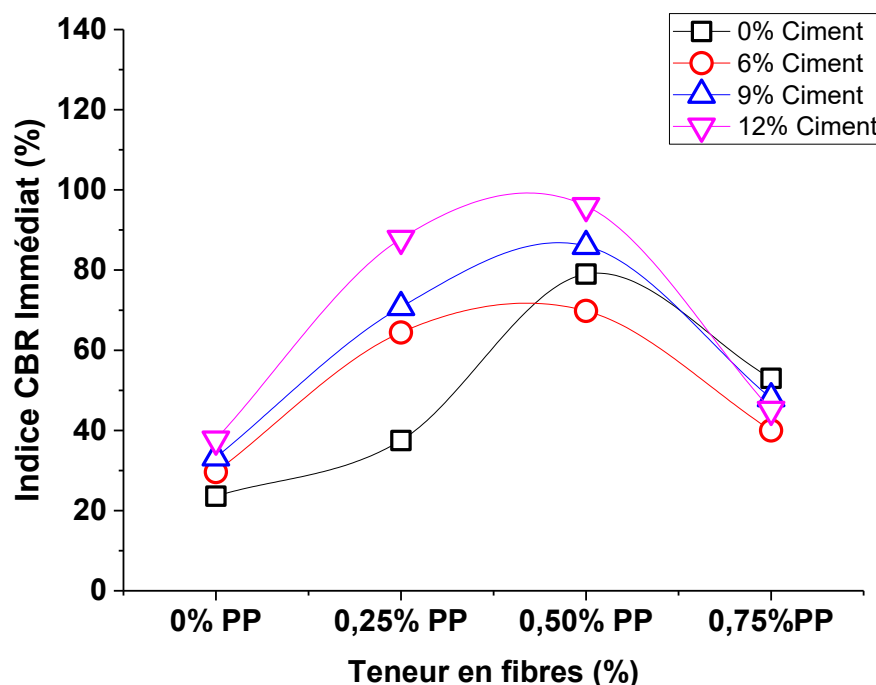


Figure 4:17 Évaluation de l'indice CBR immédiat pour sable de dune amélioré avec différentes teneurs en ciment et en fibres PP

Les valeurs modestes d'indice CBR sans fibres (toutes < 40%) correspondent à la cohésion peut négligeable ($C_{uu}=4$ kPa, $C' \approx 0$) observée lors des essais de cisaillement direct pour les mélanges à 6 % et 12 % de ciment. Le ciment améliore principalement l'imbrication des particules, contribuant ainsi à la résistance au frottement plutôt qu'à une forte cohésion.

L'indice CBR maximal de 0.50 % PP pour tous les niveaux de ciment suggère qu'il s'agit de la teneur optimale en fibres pour le sable des dunes. Au-delà de cette valeur (0.75%PP), le CBR diminue, probablement en raison de l'agglomération des fibres ou d'une cohésion réduite de la matrice, les fibres pouvant créer des vides ou des zones de faiblesse.

L'essai CBR confirme la synergie entre le ciment et les fibres PP pour améliorer la portance du sable de dune. Le dosage optimal est 12% ciment + 0.50% PP (SD12C0.5PP) pour les projets exigeants, ou 9% ciment + 0.50% PP pour une solution économique.

4.3.2 Effet du ciment et des fibres sur CBR imbibé

Des essais CBR standard après immersion ont été réalisés sur des échantillons de sol contenant 0, 6, 9 et 12 % de ciment, avec ou sans 0, 0.25, 0.50 et 0.75% de fibres PP. Les échantillons de sable compactés à la teneur en eau optimale ont été immergés pendant 4 heures dans un bain d'eau afin d'obtenir la valeur de l'indice CBR après immersion du sol, comme le montre la figure 4:18. Les résultats du CBR après immersion sont présentés dans la figure 4:19 et le pourcentage d'augmentation du CBR après immersion et sans immersion est indiqué dans le tableau 4:2. De nombreuses recherches ont déjà été menées pour étudier l'effet du ciment et/ou des fibres PP sur le CBR après immersion, et des valeurs plus élevées de CBR après immersion ont été présentées dans des études antérieures (BOURABAH, 2012) (Singh and Kalita, 2013).



Figure 4:18 L'échantillon de sable traité et/ou renforcé compacté est immergé pendant 4 heures dans un bain d'eau.

La figure 4:19 révèle une augmentation significative des valeurs de l'indice CBR imbibé avec l'ajout de ciment et de fibres PP, bien que des optima soient observés suivis d'une diminution aux teneurs les plus élevées des fibres PP. Le sable de dune saturé présente une valeur CBR imbibé inférieur à celle du sable non saturé (immédiat), car la présence d'eau dans les vides réduit la capacité du milieu à se drainer rapidement. L'ajout de fibres PP améliore globalement l'indice CBR imbibé du sable de dune, avec un optimum de 0.75 % PP. Par exemple, l'indice CBR passe de 12.32% (0 % PP) à

59.41% (0.75 % PP), soit une multiplication par 4. Contrairement à l'évolution observée pour l'indice CBR immédiat, sa valeur a présentée un pic maximal à 0.5 % de fibres PP.

Le ciment améliore la performance via la formation d'hydrates (CSH) résistants à l'eau, qui réduisent la perte de portance en créant une matrice rigide limitant l'infiltration d'eau et préservant l'intégrité structurale (Consoli et al., 2013). Cet effet est particulièrement marqué à des teneurs élevées (12 %), où l'indice CBR dépasse 100 %, indiquant une excellente performance pour des applications exigeantes comme les couches de base routières. À 12 % ciment, le pic est à 124% (0.50 % PP), indiquant une synergie.

Parallèlement (effet combiné), les fibres PP améliorent l'indice CBR imbibé jusqu'à un optimum de 0.50 %PP, au-delà (0.75 %PP), duquel on observe une diminution. Ce phénomène suggère un effet de "surrenforcement" (over-reinforcement) où les fibres en excès perturbent la matrice cimentée. En prenant pour référence le mélange à 6 % de ciment et 0.5 % de fibres, l'augmentation du CBR imbibé atteint 17.19 % avec 9 % de ciment et 27.60% avec 12 % de ciment, démontrant l'effet significatif de l'augmentation de la teneur en ciment.

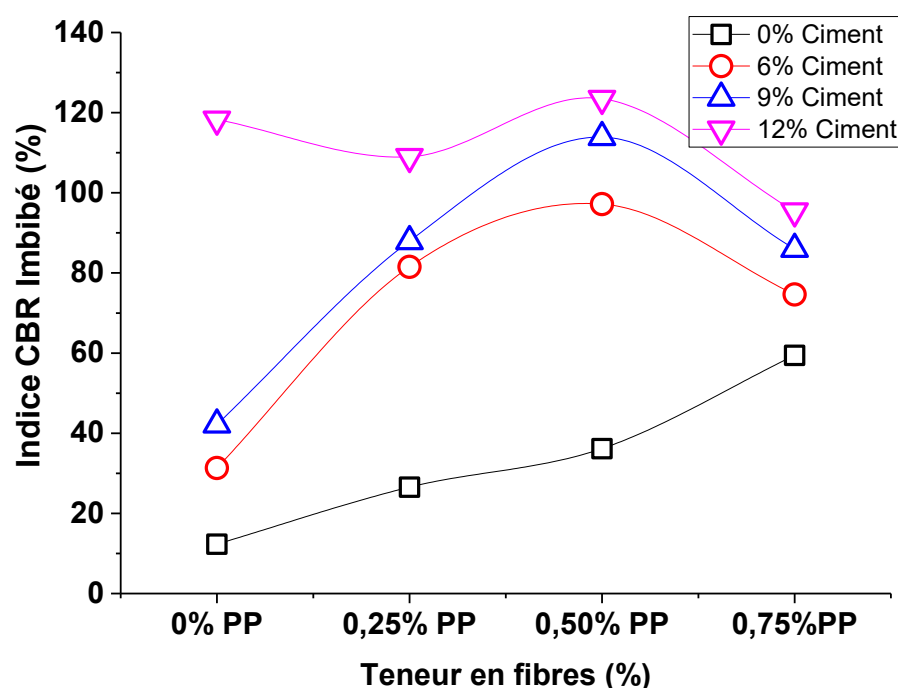


Figure 4:19 Évaluation de l'indice CBR imbibé pour sable de dune amélioré avec différentes teneurs en ciment et en fibres PP

4.3.3 Récapitulatif des essais CBR

Le tableau 4:2 fourni récapitule les résultats des essais de California Bearing Ratio (CBR) imbibé (sous saturation en eau) et immédiat pour des mélanges de sable de dune (SD) améliorés avec des

teneurs variables en ciment (0 %, 6 %, 9 % et 12 %) et en fibres de polypropylène (PP) (0 %, 0.25 %, 0.50 % et 0.75 %). Les pourcentages d'augmentation sont calculés par rapport au sable non traité (SD) pour chaque condition (imbibé ou immédiat). Les valeurs CBR indiquent la résistance relative à la pénétration (CBR = 100 % pour un matériau standard de référence).

Tableau 4:2 Récapitulatif des indices CBR imbibé et immédiat pour sable de dune amélioré avec différentes teneurs en ciment et en fibres PP

Mélanges	% du ciment	% des fibres	Indice CBR (%)	% d'augmentation du CBR
Indice CBR imbibé (%)				
Sable de dune SD	0	0	12.32	-
SD6C	6	0	31.32	154.22
SD9C	9	0	42.15	242.13
SD12C	12	0	118.29	860.15
SD0.25PP	0	0.25	26.53	115.34
SD0.50PP	0	0.50	36.15	193.43
SD0.75PP	0	0.75	59.41	382.22
SD6C0.25PP	6	0.25	81.53	561.77
SD9C0.25PP	9	0.25	87.91	613.56
SD12C0.25PP	12	0.25	108.97	784.50
SD6C0.50PP	6	0.50	97.19	688.88
SD9C0.50PP	9	0.50	113.90	824.51
SD12C0.50PP	12	0.50	123.48	902.27
SD6C0.75PP	6	0.75	74.63	505.76
SD9C0.75PP	9	0.75	86.00	598.05
SD12C0.75PP	12	0.75	95.40	674.35
Indice CBR immédiat (%)				
Sable de dune SD	0	0	23.58	-
SD6C	6	0	29.60	25.53
SD9C	9	0	33.23	40.92
SD12C	12	0	37.75	60.09
SD0.25PP	0	0.25	37.46	58.86
SD0.50PP	0	0.50	79.00	235.03
SD0.75PP	0	0.75	53.00	124.77
SD6C0.25PP	6	0.25	64.41	173.16
SD9C0.25PP	9	0.25	70.74	200.00
SD12C0.25PP	12	0.25	87.80	272.35
SD6C0.50PP	6	0.50	69.82	196.10
SD9C0.50PP	9	0.50	86.00	264.72
SD12C0.50PP	12	0.50	96.00	307.12
SD6C0.75PP	6	0.75	40.00	69.64
SD9C0.75PP	9	0.75	45.15	91.48
SD12C0.75PP	12	0.75	48.00	103.56

Les résultats indiquent une augmentation de la portance du sable de dune avec les additifs, des tendances non linéaires et une meilleure performance en état imbibé pour les forts dosages en ciment. Les pourcentages d'augmentation mettent en évidence l'efficacité relative des traitements

L'indice CBR imbibé croît avec le ciment seul (maximum à 118.29 % pour 12 % C), et les fibres l'améliorent (maximum à 123.48 % pour 12 % C + 0,50 % PP). Sans ciment, les fibres seules doublent ou quintuplent le CBR (jusqu'à 382 % d'augmentation à 0.75 % PP). Les augmentations sont énormes (>500 % pour la plupart des combinaisons traitées), ce qui témoigne d'une bonne résistance à l'eau. Pour Le ciment seul offre une amélioration modérée (jusqu'à 60 % à 12 % C). Pour l'indice CBR immédiat, les fibres dominent sans ciment (235 % à 0.50 % PP), et les combinaisons optimales atteignent 307 % (12 % C + 0.50 % PP). À 0.75 % PP, les augmentations chutent (<150 % pour les hauts dosages en C), indiquant un surdosage.

L'indice CBR imbibé est souvent supérieur à l'immédiat pour les mélanges à haut ciment (e.g., 123.48 % vs. 96 % à 12 % C + 0.50 % PP ; gain +29 %), tandis qu'il est inférieur sans additifs (12.32 % vs. 23.58 % ; perte -48 %). Les augmentations relatives sont beaucoup plus élevées en imbibé (jusqu'à 902 % vs. 307 % en immédiat), soulignant une meilleure stabilité hydraulique avec les traitements. Le pic de 12 % en C imbibé (860 % sans PP) indique un seuil critique pour l'imperméabilisation ; à 0.75 % de PP, la diminution (par exemple, 674 % contre 902 % à 12 % en C) suggère un excès de fibres créant des points faibles. Le 9 % C performe bien, mais sous 12 %, aligné avec des études antérieures sur des interactions suboptimales.

4.4 Résistance au cisaillement (CD)

Suite aux essais CBR, nous procéderons à la sélection des mélanges renforcés et traités optimaux afin de réaliser un essai de longue terme par cisaillement consolidé drainé (CD). Les mélanges optimaux, offrant la valeur maximale de CBR, sélectionnés sont les suivants :

- ❖ *Sable de dune+6% ciment +0.5PP : SD6C0.50PP ;*
- ❖ *Sable de dune+9% ciment +0.5PP : SD9C0.50PP ;*
- ❖ *Sable de dune+12% ciment +0.5PP : SD12C0.50PP.*

Les figures 4:20(a), 20(b), et 20(c) présentent la relation contrainte de cisaillement-déplacement pour les mélanges SD6C0.50PP, SD9C0.50PP et SD12C0.50PP, respectivement. On remarque que tous les mélanges traités (6 et 12 % ciment, 0.50% PP) présentent des valeurs de résistance au cisaillement considérablement supérieures à celle de l'essai UU pour les trois niveaux de contrainte verticale. Le mélange à 9 % de ciment présente des résultats moins performants que ceux à 6 % et 12 %. Cela peut indiquer une interaction non optimale entre le ciment et les fibres à ce dosage, ou une variabilité dans la distribution des fibres dans le mélange.

Les valeurs maximales observées pour 6 % et 12 % de ciment (particulièrement à la contrainte verticale la plus élevée de 318 kPa) sont supérieures à celles obtenues pour 9 % (Figure 4:21), ce qui démontre que l'effet n'est pas strictement monotone en fonction de la teneur en ciment. À 12%, il permet une meilleure répartition des fibres et une matrice plus rigide.

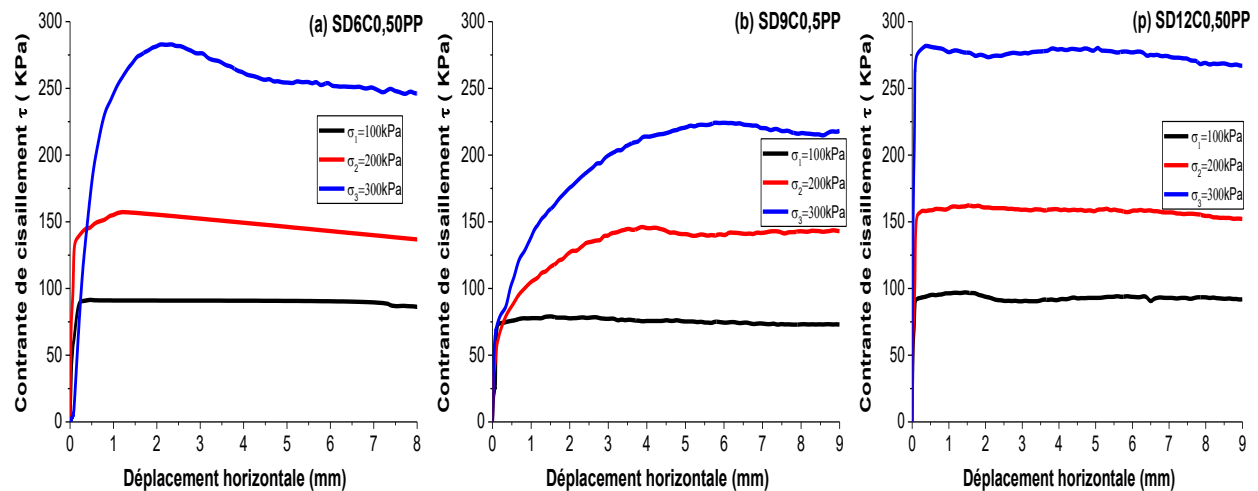


Figure 4:20 Relation contrainte de cisaillement-déplacement des mélanges
(a) SD6C0.50PP, (b) SD9C0.50PP et (c) SD12C0.50PP

La figure 4:21 montre comment τ_{max} varie en fonction de σ_v . Pour tous les mélanges, τ_{max} augmente linéairement avec σ_v , ce qui correspond à la résistance au cisaillement par frottement dans les matériaux granulaires dans des conditions drainées. En général, le ciment agit comme liant, créant des ponts entre les grains de sable et augmentant la cohésion. Cependant, pour notre résultat, son effet est limité. Les fibres PP à 0.50 % contribuent à améliorer la ductilité et la résistance au cisaillement en répartissant les contraintes de manière plus uniforme dans le mélange. Elles jouent un rôle de renforcement, augmentant ainsi l'angle de frottement. Les mélanges (6 %) C et (12 %) offrent des performances élevées comparables ($\phi' \approx 41^\circ$, τ_{max} plus élevé), tandis que le mélange (9 %) C affiche des performances inférieures (ϕ' plus faible, τ_{max} plus faible) (Figure 4:22). Cela suggère un comportement anormal à 9 % de ciment, où le mélange peut devenir trop rigide ou cassant, réduisant ainsi l'interverrouillage par friction efficace. La raison possible est l'interaction négative entre 9 % de ciment et 0.5 % de fibres PP à l'état saturé, telle que des fibres perturbant l'uniformité de la matrice de ciment, provoquant des microfissures qui réduisent la friction. Le sable des dunes présente généralement $\phi' = 30-35^\circ$ et $c' = 0$ kPa. Les traitements augmentent ϕ' de 5 à 11° , améliorant ainsi la capacité de charge.

La cohésion effective (C') est insignifiante (0 kPa) pour les traitements à 6 %C et 12 %C, ce qui suggère que la liaison générée par le ciment a une contribution marginale à la résistance à ces niveaux. Pour 9 %C, la valeur $C' = 2.9$ kPa indique des effets cohésifs modestes, probablement

attribuables à une hydratation partielle du ciment or à des interactions entre les fibres et le ciment entraînant des liaisons faibles.

Le ciment forme des ponts fragiles entre les grains de sable. Sous sollicitation de cisaillement, ces ponts se brisent précocement, conduisant à une contribution négligeable de la cohésion. D'autre part, les fibres créent un réseau tridimensionnel qui confine les particules et améliore la résistance au glissement. La résistance au cisaillement est donc principalement assurée par l'angle de frottement (augmenté par le confinement des fibres).

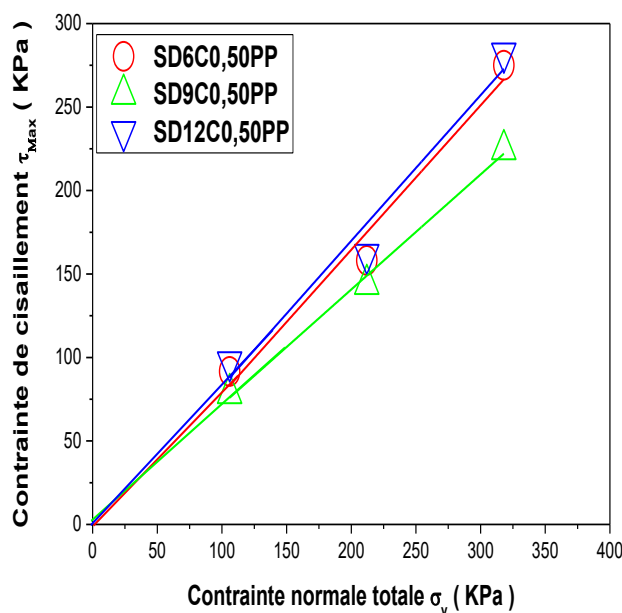


Figure 4:21 Courbes intrinsèque du sable traité avec 12% ciment et renforcé par fibre PP

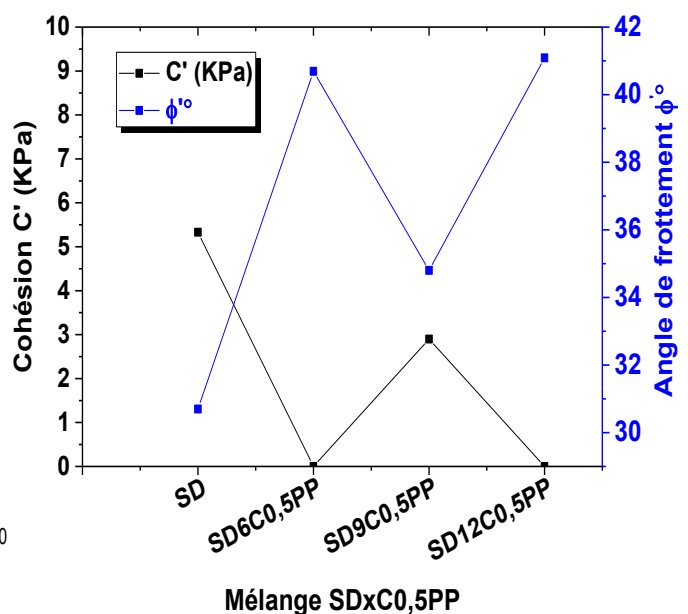


Figure 4:22 Variation de la cohésion et de l'angle de frottement en fonction de la teneur en fibre

Le tableau 4:3 résume les principaux résultats obtenus pour les mélanges SD6C0.50PP, SD9C0.50PP et SD12C0.50PP.

Tableau 4:3 Synthèse des résultats des essais de cisaillement et de CBR sur SD6C0.50PP, SD9C0.50PP et SD12C0.50PP

Mélanges	% du ciment	% des fibres PP	C_{uu} (kPa)	ϕ_{uu} (°)	C' (kPa)	ϕ' (°)	ICBR imbibé (%)	I CBR immédiat (%)
SD6C 0.50PP	6	0.5	4.00	38.2	0	40.69	97.19	69.82
SD9C 0.50PP	9	0.5	12.83	34.9	2.90	34.8	113.90	86.00
SD12C 0.50PP	12	0.5	7.19	38.2	0	41.09	124.00	96.00

4.5 Conclusion

Ce chapitre a présenté une analyse détaillée du comportement mécanique de mélanges de sable de dune traités au ciment et renforcé par des fibres de polypropylène (PP), à travers des essais de cisaillement direct non drainé (UU), des essais de portance California Bearing Ratio (CBR) et des essais de cisaillement consolidé drainé (CD).

Les résultats démontrent que l'ajout de ciment améliore significativement la cohésion apparente et l'angle de frottement du sable, avec une influence croissante proportionnelle au dosage en ciment. L'incorporation de fibres PP renforce davantage ces propriétés, avec un optimum généralement observé à 0,50 % de fibres. Au-delà de ce dosage, un effet de saturation peut survenir, conduisant à une légère diminution des performances.

Les essais CBR confirment la synergie entre le ciment et les fibres, avec des gains remarquables tant à l'état immédiat qu'imbibé. Le mélange optimal identifié est celui contenant 12 % de ciment et 0.50 % de fibres PP, offrant une portance exceptionnelle et une stabilité hydrique élevée, adaptée aux applications exigeantes en génie civil.

Les essais CD ont permis de valider le comportement à long terme des mélanges optimaux, mettant en évidence une résistance au cisaillement principalement régie par l'angle de frottement, avec une contribution cohésive limitée. Le traitement combiné-ciment-fibres confère au matériau une ductilité améliorée et une capacité portante accrue, faisant de ces mélanges une solution prometteuse pour la stabilisation des sols sablonneux.

Conclusion générale

Ce mémoire a étudié la valorisation des sables de dune, très présents dans les régions désertiques algériennes, par stabilisation chimique et mécanique en ajoutant du ciment (0 à 12 %) et des fibres de polypropylène (PP) (0 à 0.75 %). Les objectifs étaient d'étudier l'influence de ces additifs sur les caractéristiques physiques, mécaniques et de portance du sable par une caractérisation granulométrique, des essais de compactage, de cisaillement direct (UU et CD) et de CBR (immédiat et imbibé).

La revue bibliographique a révélé les faiblesses des sables de dune en matière de résistance mécanique et de comportement hydraulique, les rendant impropres à une utilisation directe dans les ouvrages géotechniques. Cependant, ces inconvénients peuvent être corrigés par des traitements adéquats (stabilisation au ciment, renforcement par fibres).

Les résultats ont révélé des interactions complexes entre ces composants, affectant le comportement du matériau composite. En particulier, l'ajout de ciment a augmenté l'angle de frottement non drainé (UU), le ciment augmente l'angle de frottement (ϕ_{UU} jusqu'à 38.2° à 6 et 12% C avec 0.5%PP), tandis que l'incorporation de fibres de polypropylène a amélioré la ductilité et la résistance au cisaillement. La combinaison-ciment-fibres s'est avérée très favorable, entraînant une amélioration des performances mécaniques.

Les essais de portance CBR ont révélé les gains importants de portance à l'état immédiat et imbibé, confirmant l'intérêt d'utiliser ces mélanges pour la confection des couches de fondation et de base routières. Le mélange idéal trouvé (12% de ciment et 0.5% de fibres) a montré une portance très élevée, ce qui le rend idéal pour les applications les plus exigeantes.

Enfin, les essais de cisaillement consolidé drainé ont permis de confirmer le comportement à long terme de ces mélanges stabilisés et renforcés. Ils ont en particulier montré que la résistance au cisaillement était dominée par l'angle de frottement, la contribution cohésive du ciment étant faible. Les mélanges optimaux à 6 % et 12 % de ciment + 0.50 % PP présentent un comportement frictionnel ($\phi' \approx 41^\circ$, $c' \approx 0$ kPa) supérieur au sable pur ($\phi' = 30-35^\circ$).

En conclusion, ce travail de recherche a permis de mettre en évidence le fort potentiel d'utilisation des sables désertiques et dunaires d'Algérie, moyennant un traitement adapté par stabilisation au ciment et renforcement aux fibres de polypropylène. Les résultats obtenus ouvrent ainsi la voie à de

nouvelles perspectives d'applications de ces matériaux locaux dans les infrastructures et le génie civil, contribuant à l'optimisation des coûts et à la durabilité des ouvrages.

Perspectives et recommandations :

D'un point de vue recherche, plusieurs perspectives s'offrent pour compléter ces travaux. Une étude de la durabilité à long terme des mélanges optimaux, tels que le SD12C0.50PP, sous sollicitations mécaniques et environnementales cycliques (humide/sec, gel/dégel), serait essentielle pour évaluer leur pérennité. Une analyse microstructurale avancée par microscopie électronique à balayage permettrait de visualiser et de quantifier les mécanismes d'interface entre les grains, la matrice cimentaire et les fibres, expliquant ainsi les optimums de performance observés. Enfin, une analyse coût-bénéfice et environnemental comparant cette solution à l'importation de matériaux granulaires conventionnels serait déterminante pour en promouvoir l'adoption à grande échelle.

Références

Al-Aghbari, M.Y., Mohamedzein, Y.-A., Taha, R., 2009. Stabilisation of desert sands using cement and cement dust. *Proc. Inst. Civ. Eng.-Ground Improv.* 162, 145–151.

Al-Amoudi, O.S.B., Asi, I.M., Wahhab, H.I.A.-A., Khan, Z.A., 2002. Clegg hammer—California-bearing ratio correlations. *J. Mater. Civ. Eng.* 14, 512–523.

Applications et avantages de l'utilisation de fibres de polypropylène [WWW Document], 2021. URL <https://texdelta.com/fr/blog/applications-et-avantages-de-lutilisation-de-fibres-de-polypropylene/> (accessed 6.27.25).

Articles - Présentation générale de la wilaya [WWW Document], n.d. URL http://www.opvm.dz/10_Articles/12_Pr%C3%A9sentation_g%C3%A9n%C3%A9rale_de_la_wilaya/d (accessed 6.22.25).

BENSAHA, H., BENSAHA, L., ACHOUR, M., 2010. Réflexion pour préserver l'environnement: cas de la vallée du M'Zab (Algérie).

BENTASSA, S., 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) (PhD Thesis). université Ghardaia.

Bouaricha, L., Djafar Henni, A., Lancelot, L., 2017. A laboratory investigation on shear strength behavior of sandy soil: effect of glass fiber and clinker residue content. *Stud. Geotech. Mech.* 39, 3–15.

Bouguerra, M., Chelali, S., Enca/ MEDDAH, A., 2022. Stabilisation des sols par des fibres de Polypropylène. university of M'sila.

Bouillons de Cultures: Grains de sable au microscope, 2014. . Bouillons Cult. URL <http://bouillonsdecultures.blogspot.com/2014/04/grains-de-sable-au-microscope.html> (accessed 6.24.25).

BOURABAH, M.A., 2012. COMPORTEMENT MECANIQUE DES SOLS FINS Application à la valorisation des sédiments de barrages en technique routière. (PhD Thesis).

BOUTOUBA, K., 2021. Renforcement de sol par liant hydraulique: Analyse des caractéristiques mécaniques (expérimentation et modélisation).

Chawki, M., 2019. Étude de l'effet des fibres de polypropylène sur les propriétés géotechniques d'une argile stabilisée. UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA.

Cherrak Née Boulkhiout, M., 2003. Utilisation des tufs calcaires-sable de dune en technique routière.

Consoli, N.C., Bassani, M.A.A., Festugato, L., 2010. Effect of fiber-reinforcement on the strength of cemented soils. *Geotext. Geomembr.* 28, 344–351.

Consoli, N.C., Consoli, B.S., Festugato, L., 2013. A practical methodology for the determination of failure envelopes of fiber-reinforced cemented sands. *Geotext. Geomembr.* 41, 50–54.

Consoli, N.C., Vaz Ferreira, P.M., Tang, C.-S., Veloso Marques, S.F., Festugato, L., Corte, M.B., 2016. A unique relationship determining strength of silty/clayey soils – Portland cement mixes. *Soils Found.* 56, 1082–1088. <https://doi.org/10.1016/j.sandf.2016.11.011>

Consoli, N.C., Vendruscolo, M.A., Prietto, P.D.M., 2003. Behavior of plate load tests on soil layers improved with cement and fiber. *J. Geotech. Geoenvironmental Eng.* 129, 96–101.

CT-T70.pdf, n.d.

Dadda, A., Emeriault, F., Geindreau, C., Esnault-Filet, A., Garandet, A., 2019. Amélioration des propriétés mécaniques des sols par biocimentation : étude mécanique et microstructurale. *Rev. Fr. Géotechnique* 4. <https://doi.org/10.1051/geotech/2020008>

Daheur, E.G., 2019. Comportement d'un mélange Tuf-Sable de dune sous sollicitations monotones et cycliques, Doctoral thesis.

Demdoun, A., 2019. Comportement hydrique et mécanique d'un mélange de Bentonite-Sable Calcaire-Tuf: Application à la conception des Installations de Stockage des Déchets (ISD).

Demdoun, A., Daheur, E.G., Loualbia, H., Bounouara, Z., Ghembaza, M.S., Akgün, H., 2022. Hydromechanical Behavior of a Tuff/Bentonite Mixture Treated with Cement, in: Ha-Minh, C., Tang, A.M., Bui, T.Q., Vu, X.H., Huynh, D.V.K. (Eds.), *CIGOS 2021, Emerging Technologies and Applications for Green Infrastructure, Lecture Notes in Civil Engineering*. Springer Nature Singapore, Singapore, pp. 1103–1112. https://doi.org/10.1007/978-981-16-7160-9_112

Dépôt éolien : définition et explications [WWW Document], n.d. URL <https://www.aquaportail.com/dictionnaire/definition/7552/depot-eolien> (accessed 6.22.25).

Dhia, M., 1997. Quelques particularités de l'utilisation du sable de dune en construction routière en milieu saharien. *Bull.-Lab. Ponts Chaussees* 33–42.

Dhouib, A., 2016. Géotechnique appliquée aux projets de construction. Press. Ponts Chaussées Paris 1041.

EDDIN, F.I., n.d. Effet du type de fibres sur les propriétés de l'adobe.

Edil, T.B., Bosscher, P.J., 1994. Engineering properties of tire chips and soil mixtures. *Geotech. Test. J.* 17, 453–464.

Eldesouky, H.M., Morsy, M.M., Mansour, M.F., 2016. Fiber-reinforced sand strength and dilation characteristics. *Ain Shams Eng. J.* 7, 517–526.

ETS MSSZ [WWW Document], n.d. URL <https://www.etssorozie.com/projets/ksd> (accessed 7.15.25).

EURL SDC Algérie [WWW Document], n.d. URL <https://www.sdc-algerie.com/> (accessed 7.5.25).

Fenzy, E., 1966. Particularité de la technique routière au Sahara. *Rev. Générale Routes Aérodr.* 411, 57–71.

FIBRE DE POLYPROPYLENE 6MM [WWW Document], n.d. . Ataman Kim. URL https://www.atamanchemicals.com/polypropylene-fiber-6mm_u28457/?lang=FR (accessed 7.12.25).

fiche-produit-ciment-matine-tm-en-francais.pdf, n.d.

Ghrieb, A., 2014. Stabilisation pour la valorisation des sables de dune en assises de chaussée (PhD Thesis). Alger, Ecole Nationale Polytechnique.

Gray, D.H., Ohashi, H., 1983. Mechanics of fiber reinforcement in sand. *J. Geotech. Eng.* 109, 335–353.

Gregory, G.H., 2006. Shear strength, creep and stability of fiber-reinforced soil slopes. Oklahoma State University.

Guide to Cement-Stabilized Subgrade Soils, n.d.

- Hejazi, S.M., Sheikhzadeh, M., Abtahi, S.M., Zadhoush, A., 2012. A simple review of soil reinforcement by using natural and synthetic fibers. *Constr. Build. Mater.* 30, 100–116.
- Imene, M., 2022. Etude des propriétés physiques et mécaniques des géopolymères contenant différentes fibres.
- Kalantari, B., Prasad, A., Huat, B.B., 2012. Use of cement, polypropylene fibers and optimum moisture content values to strengthen peat. *Int. J. Phys. Sci.* 7, 1276–1285.
- Kamel, G.M., 2011. Comportement hydro-mécanique des sols compactés: Application à la conception d'une barrière ouvragée «sable de dune–bentonite» (PhD Thesis). Thèse de doctorat, Université Aboubakr Belkaid TLEMCEM, 216p.
- Kettab, R., 2007. Contribution à la valorisation du sable de dunes.
- Kutanaei, S.S., Choobbasti, A.J., 2015. Prediction of combined effects of fibers and cement on the mechanical properties of sand using particle swarm optimization algorithm. *J. Adhes. Sci. Technol.* 29, 487–501.
- Lawton, E.C., Khire, M.V., Fox, N.S., 1993. Reinforcement of soils by multioriented geosynthetic inclusions. *J. Geotech. Eng.* 119, 257–275.
- Lebreton, P., 1975. Y. et M. Vial.—Sahara, milieu vivant, 1974. *Publ. Société Linn. Lyon* 44, 39–39.
- Messaitfa, A., Bencherif, M., Sadine, S.E., 2024. Learning from nature to improve local architecture: nest soil analysis of Sceliphron (Sphecidae; Insecta) and earthen architecture samples from Algeria's M'zab Valley. *Int. J. Environ. Stud.* 81, 1276–1290.
- Nataraj, M., McManis, K., 1997. Strength and deformation properties of soils reinforced with fibrillated fibers. *Geosynth. Int.* 4, 65–79.
- NF P94-281 [WWW Document], n.d. . Afnor Ed. URL <https://www.boutique.afnor.org/fr-fr/norme/nf-p94281/justification-des-ouvrages-geotechniques-normes-dapplication-nationale-de-l/fa174709/43117> (accessed 6.27.25).
- Nguyen, L., Fatahi, B., Khabbaz, H., 2016. Predicting the behaviour of fibre reinforced cement treated clay. *Procedia Eng.* 143, 153–160.
- Oldache, E., 1988. Contribution à l'étude de la fixation des dunes dans les régions d'El Mesrane (Djelfa) et Bousada (M'sila). *Mém. Magistère INA*.
- Paterne, C.B., Alinabiwe, A., Nelly, M.B., Germaine, B., Katumbi, K., Badesire, P., Ngague, F., 2023. Etude de la stabilisation du sol de Buganga en RDC par ciment et chaux en vue de l'utilisation dans la construction routière. *Int. J. Innov. Appl. Stud.* 40, 212–218.
- Position géographique [WWW Document], n.d. URL https://interieur.gov.dz/Monographie/article_detail.php?lien=1926&wilaya=47 (accessed 6.22.25).
- Prabakar, J., Sridhar, R., 2002. Effect of random inclusion of sisal fibre on strength behaviour of soil. *Constr. Build. Mater.* 16, 123–131.
- Pradani, N., Wibowo, J., 2017. Analysis of Local Sanded Soil with Coconut Coir Fiber Reinforcement as Subgrade On Structural Pavement. *Int. J. Civ. Eng. Technol. IJCIET* 8, 787–795.
- Routiers, G.-G.D.T., 1992. Réalisation des Remblais et des Couches de Forme. Fasc. II SETRA LCPC D9233-1 2.

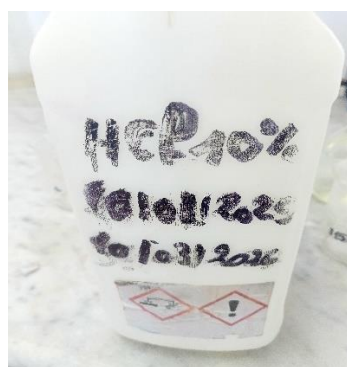
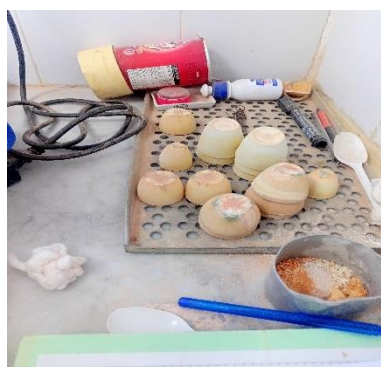
- Safdar, M., Newson, T., Qureshi, H.A., 2022. Shear strength of fibre reinforced cemented Toyoura sand. *AIMS Geosci.* 8, 68–83.
- Sarra, B., Imane, B.F., 2017. La valorisation de sable de dune (sable de Naama) Durabilité et comportement mécanique.
- Schnaid, F., Prietto, P.D., Consoli, N.C., 2001. Characterization of cemented sand in triaxial compression. *J. Geotech. Geoenvironmental Eng.* 127, 857–868.
- SEDDIKI Aymen, M.A.A., Abdelaziz, E.M., 2023. ELABORATION D'UNE NOUVELLE TECHNIQUE D'AMELIORATION DES SOLS : UTILISATION DES FIBRES DE POLYPROPYLENE ET DES BIO-POLYMERES. University of M'sila.
- Shukla, S., Sivakugan, N., Das, B., 2009. Fundamental concepts of soil reinforcement—an overview. *Int. J. Geotech. Eng.* 3, 329–342.
- Singh, B., Kalita, A., 2013. Influence of fly ash and cement on CBR behavior of lateritic soil and sand. *Int. J. Geotech. Eng.* 7, 173–177.
- Smaida, A., Cheriet, R., Haddadi, S., Nechnech, A., 2024. Valorization of dune sand of Djelfa (Algeria) treated by hydraulic binders in pavement foundations. *J. Build. Mater. Struct.* 9, 33–43.
- SOUILMI, S., BEN MOUSSA, I., 2019. Etude des caractéristiques physico-chimiques du sable des dunes (cas sites d'Adrar) (PhD Thesis). Université Ahmed Draïa-Adrar.
- Tingle, J.S., Santoni, R.L., Webster, S.L., 2002. Full-scale field tests of discrete fiber-reinforced sand. *J. Transp. Eng.* 128, 9–16.
- TN-Cement-Stabilisation-Practice.pdf, n.d.
- Vos routes - Un entretien régulier pour des chaussées saines, n.d. . Techniroute. URL <https://techniroute.fr/vos-routes/> (accessed 7.15.25).
- Wei, L., Chai, S.X., Zhang, H.Y., Shi, Q., 2018. Mechanical properties of soil reinforced with both lime and four kinds of fiber. *Constr. Build. Mater.* 172, 300–308.
- Youwai, S., Bergado, D.T., 2003. Strength and deformation characteristics of shredded rubber tire sand mixtures. *Can. Geotech. J.* 40, 254–264.

Annexes

Annexe 1: Poids volumique apparent et absolu



Annexe 2: Préparation des solutions



FICHE TECHNIQUE DE CIMENT UTILISE :**1. Premièrement : Aperçu général du produit et du fabricant**

- **Fabricant :** Lafarge Algérie, qui fait partie du groupe mondial **Holcim**, leader dans le domaine des matériaux de construction. Cela signifie que le produit bénéficie d'une expertise internationale et de technologies de production avancées.
 - **Marque :** Al Matine (المتين). Ce nom a été choisi pour refléter la principale caractéristique du produit : **la robustesse et la durabilité** dans la construction.
 - **Marché cible :** Le produit vise principalement le segment de la distribution (vente au détail), incluant :
 - Les artisans et les maçons.
 - Les petites et moyennes entreprises de construction.
 - Les particuliers réalisant des travaux de construction ou de rénovation.
-

2. Deuxièmement : Les types de ciment Al Matine et leurs caractéristiques techniques

La marque "Al Matine" ne désigne pas un seul produit, mais une gamme conçue pour répondre à différents besoins du processus de construction. Les deux types les plus courants sont :

1. Ciment Al Matine (CEM II/A-L 42.5 N)

C'est le produit principal et le plus utilisé pour les travaux de structure qui exigent une haute résistance.

- **Classification technique :**
 - CEM II : Ciment Portland composé (contenant des constituants autres que le clinker).
 - A-L : Signifie qu'il contient un ajout de calcaire (Limestone) dans une proportion de 6 % à 20 %. Cet ajout améliore l'ouvrabilité du béton et contribue à réduire les émissions de carbone lors de la production.
 - 42.5 : C'est la classe de résistance. Elle indique que la résistance minimale à la compression du mortier à 28 jours est de **42,5 Mégapascals (MPa)**. C'est une résistance élevée, adaptée à la plupart des ouvrages structuraux.
 - N : Signifie "résistance initiale normale" (Normal early strength), indiquant un développement équilibré de la résistance.
- **Caractéristiques principales :**
 - **Hautes résistances mécaniques :** Fournit une excellente résistance à la compression à 28 jours, le rendant idéal pour les éléments porteurs.
 - **Bonne résistance initiale :** Permet un décoffrage dans des délais raisonnables.
 - **Excellente ouvrabilité :** Rend le béton facile à mélanger, à mettre en œuvre et à finir.
 - **Qualité constante et fiable :** Produit conformément aux normes algériennes (NA 442) et européennes (EN 197-1), garantissant des performances régulières.
 - **Couleur grise claire et homogène.**

- **Usages recommandés :**

- **Béton armé :** Pour poteaux, poutres, fondations, dalles et planchers.
 - **Béton préfabriqué :** Pour la production d'éléments de construction en usine.
 - **Travaux routiers et d'infrastructures.**
 - **Scellement d'éléments structurels lourds.**
-

2. Ciment Al Matine Extra (CEM II/B-M 32.5 R)

Ce produit est principalement conçu pour les travaux de finition et de maçonnerie générale qui ne nécessitent pas une résistance à la compression très élevée.

- **Classification technique :**

- CEM II : Ciment Portland composé.
- B-M : Signifie qu'il contient un mélange de constituants (Mixte) dans une proportion de 21 % à 35 %.
- 32.5 : Classe de résistance. La résistance minimale à la compression à 28 jours est de **32,5 MPa**.
- R : Signifie "haute résistance initiale" (High early strength) pour sa classe, ce qui permet d'accélérer le rythme des travaux de finition.

- **Caractéristiques principales :**

- **Ouvrabilité supérieure (Plasticité) :** Confère au mortier une excellente souplesse et cohésion, ce qui facilite son application sur les murs (enduits).
- **Réduction du risque de fissuration :** Sa composition aide à minimiser les fissures de surface dans les enduits et les chapes.
- **Bonne adhérence :** Offre une forte adhérence sur les briques, parpaings et supports en béton.
- **Prise de résistance initiale rapide :** Aide à avancer rapidement dans les travaux.

- **Usages recommandés :**

- **Travaux de maçonnerie :** Préparation de mortier pour le montage de briques et de parpaings.
 - **Réalisation d'enduits :** Pour les revêtements intérieurs et extérieurs des murs.
 - **Confection de chapes :** Pour la couche de nivellement avant la pose de carrelage ou de céramique.
 - **Bétons non structurels :** Comme la réalisation de trottoirs ou de petites allées.
-

3. Troisièmement : Avantages généraux de la gamme "Al Matine"

1. **Fiabilité :** En tant que produit de Lafarge, il est soumis à un contrôle qualité strict à toutes les étapes de la production.
2. **Disponibilité :** Il est largement distribué à travers toute l'Algérie via un réseau de distributeurs agréés et de points de vente.
3. **Conditionnement :** Il est proposé en sacs résistants (généralement 50 kg) conçus pour le protéger de l'humidité et des dommages durant le transport et le stockage.

4. **Support technique** : Lafarge Algérie offre un soutien technique et des conseils aux utilisateurs en cas de besoin.
-

4. Quatrièmement : Conseils importants d'utilisation

- **Stockage** :
 - Les sacs doivent être stockés dans un endroit sec et aéré, à l'abri de la pluie et de l'humidité.
 - Ils doivent être surélevés du sol à l'aide de palettes en bois.
 - Il est conseillé d'utiliser le ciment dans les 3 mois suivant sa date de production pour garantir des performances optimales.
- **Gâchage (Mélange)** :
 - Utilisez de l'eau propre, ainsi que du sable et des graviers exempts d'impuretés.
 - Respectez le rapport Eau/Ciment (E/C). Un excès d'eau affaiblit considérablement la résistance du béton.
- **Sécurité** :
 - Le ciment est un produit alcalin. Évitez tout contact avec la peau et les yeux.
 - Il est recommandé de porter des équipements de protection individuelle (gants, lunettes de protection, masque anti-poussière).
- **La cure du béton** :
 - Après la mise en place et le durcissement du béton, il est essentiel de le maintenir humide (par arrosage et couverture) pendant au moins 7 jours. Ce processus est vital pour que le béton atteigne sa pleine résistance et sa durabilité.

En résumé : Le ciment "Al Matine" de Lafarge est un choix fiable et de haute qualité sur le marché algérien, offrant des solutions complètes pour les différentes étapes de la construction, depuis les structures en béton robustes (avec **Al Matine 42.5**) jusqu'aux travaux de finition soignés (avec **Al Matine Extra 32.5**)

FICHE TECHNIQUE DE FIBRE :



POLYMONO 12

Technical Data Sheet / Certificate of Analysis

Composition: 100% virgin polypropylene

Type: Monofilament micro fiber

Impurity: Contain no olefin or no polyamide or no recycled materials

Appearance: Individual fiber

Cross section: Round

Standard: EN 14889 Part II Type 1.A. and ASTM C1116 Type III, ASTM D7508

Fiber length: 12 mm + / - 1 mm

Thickness: 30-32 micron

Tensile strength: 467-548 MPa

Modulus Elasticity: 4048 – 5674 MPa

Elongation: 20 – 25 %

Specific Density: 0.91 grams / cm³

Tenacity: 6,5 – 7,0 gr / denier – High Tenacity

Color: Transparent

Softening point: 150 Celsius

Melting point: 160 Celsius

Number of Filaments: 120 million+/ kg

Surface Area: 140 m²/ kg

Acids effects: Stable

Oxidizing agents effects: Stable

Organic solvents: Melted by chloride solvents at high temperatures

Biological resistance: Stable

Cement compatibility: Excellent

Alkali effect: Stable

Abrasion resistance: Stable

Moisture regain: 70% relative humidity at 21 Celsius = < 0.10 %

Packaging: In bulk / WS bag from 300 grams up to 1000 grams

Manufacturer: Polipropilen Elyaf Sanayi ve Dış Ticaret AŞ

Country of Origin: Made in Turkey

POLIPROPILEN ELYAF SAN. VE DIS TIC A.S
CUMHURİYET MH. YUZYIL CD. NO:64 KARTAL/ISTANBUL TURKEY
T: +90 216 452 90 16 F: +90 216 452 90 19

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
جامعة غرداية

Faculté des Sciences et de la Technologie
Département Hydraulique et Génie Civil



كلية العلوم والتكنولوجيا
قسم العلوم والتكنولوجيا

Université de Ghardaïa

Filière : Génie Civil
Spécialité : Structures

Autorisation d'impression d'un mémoire du Master

Les membres du jury	Nom et prénom	Signature
Le président de jury	D ^r DAHEUR Hadj Guesmia	
Examineur 1	M ^r CHERIF Miloud	
Encadrant	M ^r DEMDEUME Abd Allah	

Je soussigné M^r : DAHEUR Hadj Guesmia

Président de jury de l'étudiant : ZGAOU Kacem

Thème

**Stabilisation Cimentaire et Renforcement par Fibres de
Polypropylène d'un Sable dunaire : Optimisation des Dosage et
Analyse des Propriétés Mécaniques**

J'autorise l'étudiant mentionné ci-dessus d'imprimer et déposer son manuscrit final au niveau du département.

Président de jury :

Daheur E.G.

Le chef de département :



عبد الكبير إبراهيم
رئيس قسم الري والهندسة المدنية
كلية العلوم والتكنولوجيا