

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

N° d'enregistrement / / / / /



كلية العلوم والتكنولوجيا
Faculté des Sciences et de la Technologie
قسم الري والهندسة المدنية
Département de Hydraulique et Génie civil

Mémoire présenté en vue de l'obtention du diplôme de
MASTER

Domaine : Sciences et Technologies

Filière : Génie civil

Spécialité : Structure

Thème

**ETUDE COMPARATIVE ENTRE DEUX MODES DE
COMPACTAGE D'UN MATERIAU LOCAL**

Par : **BOUTEBBA BRAHIM**
SELLAH SOFIANE

Soutenu publiquement le : 14/06/2025

Devant le jury :

Prénom et nom	Grade	Université	Président(e)
M ^{ME} AZZOUZ .fatima zohra	MAA	Université de Ghardaïa	Encadreur
Mr KEBALI Mostapha	Pr MAA	Université de Ouargla	Co-encadreur
M Abdellah DEMDOUM	MCB	Université de Ghardaïa	examinateur
Mr AZIEZ Mohammed Nadjib MC A	MCA	Université de Ghardaïa	président

Année universitaire 2024/2025

Remerciements

Avant toute chose, nous exprimons notre profonde gratitude à Dieu, le Tout-Puissant, qui nous a accordé la volonté, le courage et la patience nécessaires pour mener à bien notre parcours universitaire.

Au terme de ce travail, nous tenons à adresser nos sincères remerciements à nos encadreurs, Madame Azzouz Fatma Zahra et Monsieur Kebaili Mustapha, enseignants à l'Université de Ouargla, pour leur accompagnement, leurs précieux conseils et leur disponibilité tout au long de ce projet.

Nous remercions également l'ensemble des enseignants du département de Génie Civil de l'Université de Ghardaïa pour la qualité de leur enseignement, leur soutien et leurs orientations durant toutes nos années d'étude.

Nos remerciements vont également à tout le personnel du laboratoire LTPS pour leur accueil chaleureux, leur assistance technique et leur disponibilité. Une pensée particulière à Monsieur Chkaoua Med El Chikh pour son aide et son soutien constant.

Enfin, un grand merci à toutes les personnes qui, de près ou de loin, ont contribué à la réalisation de ce travail.

Merci



Dédicaces

*À ceux qui m'ont encouragé à persévérer toute ma vie, à côté
de l'homme le plus remarquable de ma vie,*

Mon père bien-aimé.

À celle qui a été tendre, patiente et aimante envers moi,

Ma mère bien-aimée.

*À ceux qui m'ont soutenu dans mon parcours et m'ont offert
tout leur soutien et leur amour,*

Mes frères et mes sœurs.

*À ma précieuse famille, à mes fidèles amis, et à mon cher
collègue de travail.*

*Et à tous ceux qui ont contribué, ne serait-ce que par un seul
mot, à éclairer mon chemin académique.*

À vous tous, je dédie le fruit de cet effort,

Priant Le Tout-Puissant de l'agrérer,

Et qu'il puisse être utile et bénéfique.

Sofiane



Dédicaces

À ceux qui m'ont encouragé à persévérer tout au long de mon parcours,

Et au premier rang duquel se trouve celui qui fut mon modèle et mon soutien,

Mon cher père.

À la source de patience, exemple de don et d'amour face à toute les difficultés,

Mon pilier et mon bras droit, Ma tendre mère.

À mes frères et sœurs, mon appui et ma force.

À ma précieuse famille, à mes fidèles amis, et à mon cher collègue de travail.

Et à tous ceux qui ont contribué, ne serait-ce que par un seul mot à éclairer mon chemin académique.

À vous tous, je dédie le fruit de cet effort,

Priant Le Tout-Puissant de l'agréer,

Et qu'il puisse être utile et bénéfique.

Brahim

Résumé

Ce mémoire porte sur l'amélioration du compactage d'un sol composé de sable de dune de Ghardaïa mélangé à de l'argile. Deux méthodes de compactage ont été comparées : l'essai par Proctor modifié et la table vibrante . L'objectif principal est de trouver le mélange sable/argile qui permet d'obtenir la meilleure densité sèche et une bonne stabilité du sol.

Plusieurs mélanges ont été testés, allant de 100 % sable à 100 % argile, en passant par des proportions intermédiaires comme 70 % sable + 30 % argile ou 50 % sable + 50 % argile. Chaque mélange a été soumis aux deux essais pour mesurer la densité sèche maximale (γ_{dmax}) et la teneur en eau optimale (w_{opt}). La densité humide a aussi été mesurée pour évaluer la capacité du sol à retenir l'eau.

Les résultats montrent que :

- L'essai Proctor modifié est plus efficace pour les mélanges riches en argile.
- La table vibrante donne de meilleurs résultats pour les mélanges riches en sable.
- Le mélange optimal se situe entre 70 % sable + 30 % argile et 90 % sable + 10 % argile.
- Une trop forte teneur en argile (plus de 50 %) rend le compactage moins efficace.

Cette étude montre l'importance de bien choisir la méthode de compactage et la composition du mélange pour améliorer la portance des sols, en particulier dans les régions sahariennes où les sols naturels sont souvent peu stables.

Mots-Clés : sol, sable de dune, argile, compactage, essai Proctor modifié, table vibrante, densité sèche maximale, Densité humide, teneur en eau optimale, région saharienne

Summary

This thesis focuses on improving the compaction performance of a soil composed of dune sand from the Ghardaïa region mixed with clay. Two compaction methods were compared: the modified proctor test and the vibratory table test. The main objective is to identify the optimal sand/clay mix that achieves the highest dry density while ensuring good soil stability.

Several mixtures were tested, ranging from 100% sand to 100% clay, including intermediate proportions such as 70% sand + 30% clay and 50% sand + 50% clay. Each mixture was subjected to both compaction tests to measure the maximum dry density (γ_d max) and the optimum water content (w_{opt}). Wet density was also measured to assess the soil's water retention capacity.

The results show that :

- The Modified Proctor test is more effective for clay-rich mixtures.
- The vibrating table performs better for sand-rich mixtures.
- The optimal mix is between 70% sand + 30% clay and 90% sand + 10% clay.
- A high clay content (over 50%) significantly reduces dry density and makes compaction less effective.

This study highlights the importance of selecting the appropriate compaction method and mix composition to enhance soil bearing capacity, especially in Saharan regions where natural soils often have low stability.

Keywords: soil, dune sand, clay, compaction, modified Proctor test, vibrating table, maximum dry density, bulk density, optimum water content, Saharan region

ملخص

ركز هذه المذكرة على تحسين أداء دمك تربة مكونة من رمل الكثبان الرملية من ولاية غرداية ممزوجة بالطين. تم مقارنة طريقتين للدمك: تجربة بروكتور المعدلة وتجربة الطاولة الاهتزازية. الهدف الرئيسي هو تحديد الخليط الأمثل من الرمل والطين الذي يحقق أعلى كثافة جافة ممكنة.

تم اختبار عدة خلطات، تراوحت من 100٪ رمل إلى 100٪ طين، بما في ذلك نسب وسيطة مثل 70٪ رمل + 30٪ طين و 50٪ رمل + 50٪ طين. وقد خضعت كل خلطة لكتل التجارب لقياس الكثافة القصوى (d_{max}) والرطوبة المثلثى (w opt). كما تم قياس الكثافة الرطبة لتقييم قدرة التربة على الاحتفاظ بالماء.

أظهرت النتائج ما يلي:

- تجربة بروكتور المعدلة أكثر فعالية في الخلطات الغنية بالطين.
- الطاولة الاهتزازية تعطي نتائج أفضل في الخلطات الغنية بالرمل.
- الخليط الأمثل يقع بين 70٪ رمل + 30٪ طين و 90٪ طين و 10٪ رمل + 10٪ طين.
- ارتفاع نسبة الطين (أكثر من 50٪) يؤدي إلى انخفاض ملحوظ في الكثافة الجافة و يجعل الدمك أقل فعالية.

ثُبّرَتْ هذه الدراسة أهمية اختيار طريقة الدمك المناسبة وتكوين الخليط الملائم من أجل تحسين قدرة التربة على التحمل، خصوصاً في المناطق الصحراوية حيث تكون الترب الطبيعية غالباً ضعيفة الاستقرار.

الكلمات المفتاحية : التربة، رمل الكثبان، الطين، التماسك، اختبار بروكتور المعدل، طاولة الاهتزاز، الكثافة الجافة القصوى، الكثافة الرطبة ، نسبة الرطوبة المثلثى، المناطق الصحراوية

Sommaire

I. INTRODUCTION GÉNÉRALE	1
CHAPITRE I	
I.1 INTRODUCTION	4
I.2 DEFINITION DE COMPACTAGE	4
I.3 LES AVANTAGES DE COMPACTAGE	4
I.4 DOMAINES TECHNOLOGIQUES REQUÉRANT UN COMPACTAGE DU SOL	5
I.4.1 CONSTRUCTION ROUTIÈRE ET FERROVIAIRE	5
I.4.2 CONSTRUCTION EN TERRE : LE CAS DES BLOCS DE TERRE COMPRIMÉE (BTC)	5
I.4.3 BARRAGES, DIGUES ET OUVRAGES HYDRAULIQUES EN TERRE	6
I.4.4 PLATES-FORMES INDUSTRIELLES ET FONDATIONS D'OUVRAGES	6
I.4.5 CAS DU BÉTON PRÉFABRIqué : DISTINCTION ENTRE COMPACTAGE DU BÉTON ET DU SOL	6
I.5 INFLUENCE DU COMPACTAGE SUR LES PROPRIÉTÉS PHYSICO-MÉCANIQUES DES SOLS ET MÉTHODES DE CONTRÔLE	7
I.5.1 CORRÉLATIONS ENTRE L'ÉTAT DE COMPACITÉ ET LES CARACTÉRISTIQUES PHYSIQUES	7
I.5.1.1 DENSITÉ	7
I.5.1.2 PERMÉABILITÉ	7
I.5.1.3 POROSITÉ	7
I.5.1.4 RÉTENTION D'EAU	8
I.5.2 TECHNIQUES DE CONTRÔLE DU COMPACTAGE DES SOLS SUR SITE	8
I.5.2.1 CÔNE DE SABLE (MÉTHODE ASTM D1556)	9
I.5.2.2 DENSITOMÈTRE À MEMBRANE (MÉTHODE ASTM D2167)	10
I.5.2.3 GAMMA-DENSITOMÈTRE (MÉTHODE ASTM D2922)	10
I.5.3 COMPARAISON DES MÉTHODES DE MESURE DU COMPACTAGE DES SOLS	11
I.5.3.1 CÔNE DE SABLE	11
I.5.3.2 DENSITOMÈTRE À MEMBRANE	12
I.5.3.3 GAMMA-DENSITOMÈTRE	12
I.5.3.4 PÉNÉTROMÈTRE DYNAMIQUE	12
I.5.3.5 ANALYSE COMPARATIVE	13
I.6 ÉVALUATION DE LA PERFORMANCE DES TECHNIQUES DE CONTRÔLE DU COMPACTAGE DES SOLS	13
I.6.1 ESSAI PROCTOR	14
I.6.2 ESSAI À LA PLAQUE DE CHARGEMENT	14
I.6.3 TECHNOLOGIES NON DESTRUCTIVES	14
I.6.4 PARAMÈTRES INFLUENçANT LA PERFORMANCE DU COMPACTAGE	15
I.7 DIFFÉRENCES ENTRE COMPACTAGE EN LABORATOIRE ET COMPACTAGE SUR SITE	15
I.7.1 COMPACTAGE EN LABORATOIRE : UNE APPROCHE STANDARDISÉE	16
I.7.1.1 PARAMÈTRES GRANULOMÉTRIQUES	16
I.7.1.2 MALAXAGE	16
I.7.1.3 TENEUR EN EAU	16
I.7.2 COMPACTAGE SUR SITE : DÉFIS ET ADAPTATIONS	17
I.7.2.1 PARAMÈTRES GRANULOMÉTRIQUES	17
I.7.2.2 MALAXAGE	17
I.7.2.3 TENEUR EN EAU	17
I.8 ÉCART ENTRE CONDITIONS DE LABORATOIRE ET CONDITIONS DE TERRAIN DANS LE COMPACTAGE DES SOLS	18

I.8.1 FACTEURS CONTRIBUANT A L'ECART ENTRE LABORATOIRE ET TERRAIN	18
I.8.1.1 CONDITIONS EXPERIMENTALES	18
I.8.1.2 EQUIPEMENTS UTILISES	18
I.8.1.3 CONTRAINTES ENVIRONNEMENTALES	19
I.8.2 CONSEQUENCES PRATIQUES DE L'ECART	19
I.8.2.1 VARIABILITE DES PERFORMANCES	19
I.8.2.2 RISQUE DE NON-CONFORMITE	19
I.8.2.3 NECESSITE D'AJUSTEMENTS	19
I.8.3 SOLUTIONS POUR REDUIRE L'ECART	20
I.8.3.1 CALIBRATION DES EQUIPEMENTS	20
I.8.3.2 ESSAIS PRELIMINAIRES SUR SITE	20
I.8.3.3 ETHNOLOGIES INNOVANTES	20
I.9 COMPARAISON DES PERFORMANCES DE COMPACTAGE EN LABORATOIRE ET SUR CHANTIER	20
I.9.1 COMPACTAGE EN LABORATOIRE	21
I.9.2 COMPACTAGE SUR CHANTIER	21
I.9.3 COMPARAISON DES PERFORMANCES	22
I.9.3.1 DENSITE SECHE MAXIMALE	22
I.9.3.2 TENEUR EN EAU OPTIMALE	22
I.9.3.3 UNIFORMITE DU COMPACTAGE	22
I.9.4 IMPACT DE LA GRANULOMETRIE VARIABLE	23
I.10 CONCLUSION	23
CHAPITRE II	
II.1 INTRODUCTION	24
II.2 L'ESSAI PROCTOR NORMAL	24
II.2.1 DEFINITION	24
II.2.2 OBJECTIFS	25
II.2.3 MATERIEL ET APPAREILLAGE :	25
II.2.4 PROTOCOLE EXPERIMENTAL DETAILLE :	26
II.3 L'ESSAI PROCTOR MODIFIE :	26
II.3.1 DEFINITION	26
II.3.2 OBJECTIFS	26
II.3.3 MATERIEL ET APPAREILLAGE	27
II.3.4 PROTOCOLE EXPERIMENTAL DETAILLE	27
II.4 COMPARAISON FONDAMENTALE ENTRE LES ESSAIS PROCTOR NORMAL ET MODIFIE	27
II.4.1 ENERGIE DE COMPACTAGE	27
II.4.2 MASSE VOLUMIQUE SECHE MAXIMALE ($\Gamma_{D\text{MAX}}$) ET TENEUR EN EAU OPTIMALE (WOPT)	28
II.4.3 DOMAINES D'APPLICATION ET EXIGENCES	28
II.5 FACTEURS INFLUANT SUR LA COURBE PROCTOR	29
II.5.1 LA COURBE PROCTOR	29
II.5.2 LES ETATS DE COMPACITE ET DE CONSOLIDATION	29
II.6 METHODE VIBRATOIRE	30
II.6.1 DEFINITION	30
II.6.2 OBJECTIFS	31
II.6.3 EQUIPEMENTS ET OUTILS UTILISES	31
II.6.4 MATERIAUX COMPATIBLES AVEC LA METHODE VIBRATOIRE	32
II.6.5 ETAPES DE MISE EN OEUVRE DE LA METHODE VIBRATOIRE	32
II.6.5.1 PREPARATION DE L'ECHANTILLON	32
II.6.5.2 APPLICATION DES VIBRATIONS	32

II.6.5.3 MESURES POST-VIBRATION	33
II.7 LA METHODE PAR CHOCS	33
II.7.1 DEFINITION	33
II.7.2 OBJECTIFS ET APPLICATIONS	34
II.7.3 EQUIPEMENTS ET OUTILS UTILISES	34
II.7.4 MATERIAUX COMPATIBLES AVEC LA METHODE CHOCS	36
II.7.5 ETAPES DE MISE EN OEUVRE	36
II.7.5.1 PRÉPARATION DU SITE	36
II.7.5.2 DÉTERMINATION DES PARAMÈTRES	36
II.7.5.3 APPLICATION DES CHOCS	37
II.7.5.4 CONTRÔLE QUALITÉ	37
II.7.5.5 CLÔTURE DU PROJET	37
II.8 LA METHODE STATIQUE DE COMPACTAGE DES SOLS :	37
II.8.1 DEFINITION	37
II.8.1.1 DOMAINES D'APPLICATION	38
II.8.1.2 ENREGISTREMENT ET IMPORTANCE	38
II.8.2 OBJECTIF DE LA METHODE STATIQUE	38
II.8.3 OUTILS ET EQUIPEMENTS UTILISES	38
II.8.3.1 PLAQUE VIBRANTE STATIQUE	38
II.8.3.2 ROULEAU STATIQUE	39
II.8.3.3 DENSIMÈTRE NUCLÉAIRE	39
II.8.3.4 PILON STATIQUE	39
II.8.4 EQUIPEMENT UTILISE DANS LA METHODE STATIQUE EN LABORATOIRE :	39
II.8.4.1 EQUIPEMENTS COMMUNS AUX DEUX METHODES:	39
II.8.4.2 EQUIPEMENTS SPECIFIQUES A LA METHODE AUTOMATIQUE	40
II.8.4.3 EQUIPEMENTS SPECIFIQUES A LA METHODE MANUELLE	40
II.8.5 MATERIAUX COMPATIBLES AVEC LA METHODE STATIQUE	41
II.8.6 ETAPES D'APPLICATION DE LA METHODE STATIQUE	41
II.8.6.1 PREMIEREMENT UTILISATION D'EQUIPEMENTS AUTOMATIQUES	42
II.8.6.2 DEUXIEMEMENT UTILISATION DE METHODES MANUELLES	42
II.9 CONCLUSION :	43
CHAPITRE III	
III.1 INTRODUCTION	44
III.2 ZONE D'ÉTUDE	44
III.3 LOCALISATION DES SITES DE PRELEVEMENT DES MATERIAUX	46
III.3.1 SABLE DE DUNE	46
III.3.2 ARGILE	46
III.4 PROGRAMME DES ESSAIS	47
III.5 ESSAIS D'IDENTIFICATION	48
III.5.1 LES ESSAIS SUR SABLE DE DUNE	49
III.5.1.1 ANALYSE CHIMIQUE	49
III.5.1.2 ANALYSE GRANULOMETRIQUE (NF P94 – 056)	49
III.5.1.2.1 MÉTHODES D'ANALYSE GRANULOMÉTRIQUE	50
III.5.1.2.2 MATÉRIEL NÉCESSAIRE	50
III.5.1.2.3 ETAPES DE L'ANALYSE	51
III.5.1.3 LIMITÉ D'ATTERBERG (NF P 94-051)	53
III.5.1.4 EQUIVALENT DE SABLE (NFP EN 933-8)	53
III.5.1.4.1 BUT DE L'ESSAI	53
III.5.1.4.2 APPAREILLAGE	53
III.5.1.4.3 MODE OPÉRATOIRE	54
III.5.1.5 ESSAI AU BLEU DE METHYLENE (NFP 94-068)	55

III.5.1.6 CARACTERISATION DE SABLE DE DUNE UTILISEE	56
III.5.2 LES ESSAIS SUR L'ARGILE DE BOUHRAOUA	56
III.5.2.1 ANALYSE CHIMIQUE	56
III.5.2.2 ANALYSE GRANULOMETRIQUE (NF P94 – 056)	57
III.5.2.3 LIMITES D'ATTERBERG (NF P 94-051)	59
III.5.2.3.1 Limite de liquidité WL	59
III.5.2.3.2 La limite de plasticité WP	59
III.5.2.3.3 L'indice de plasticité IP	60
III.5.2.4 ACTIVITE DES ARGILES	61
III.5.2.5 ESSAI AU BLEU DE METHYLENE	61
III.5.2.5.1 PRINCIPE DE L'ESSAI	62
III.5.2.5.2 BUT DE L'ESSAI	62
III.5.2.6 TENEUR EN CARBONATE DE CALCIUM DEL'ARGILEETUDIE	64
III.5.2.7 CARACTERISATION DE L'ARGILE UTILISEE	64
III.6 CLASSIFICATION DES SOLS	65
III.6.1 LA CLASSIFICATION	65
III.6.2 NOMBREUSES CLASSIFICATIONS DANS DIFFERENTS PAYS	65
III.6.3 LA CLASSIFICATION L.C.P.C (LABORATOIRE CENTRALE DES PONTS ET CHAUSSEES)	65
III.6.4 LA CLASSIFICATION U.S.C.S (UNIFIED SOIL CLASSIFICATION SYSTEM)	67
III.6.5 CLASSIFICATION DES SOLS SELON LA NOMENCLATURE GTR (NORME NF P 11 300)	68
III.6.6 CLASSIFICATION DU SOL ÉTUDIÉ DE GHARDAÏA SELON CLASSIFICATION GTR (CAS DES SOLS FINS)	69
III.7 PREPARATION DES ECHANTILLONS	73
III.8 ESSAIS DE COMPACTAGE	74
III.8.1 PROCTOR MODIFIE	74
III.8.1.1 DÉFINITION	74
III.8.1.2 OBJECTIF DE L'ESSAI PROCTOR MODIFIÉ	75
III.8.1.3 PRINCIPE DE L'ESSAI	75
III.8.1.4 EQUIPEMENTS ET MATÉRIEL UTILISÉS	75
III.8.1.5 PROCÉDURE ÉTAPE PAR ÉTAPE	76
III.8.1.6 ENERGIE DE COMPACTAGE ET CALCULS ASSOCIÉS	77
III.8.2 METHODE DE COMPACTAGE VIBRATOIRE (NF P 94-065)	77
III.8.2.1 DÉFINITION	77
III.8.2.2 OBJECTIF DE L'ESSAI	78
III.8.2.3 PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT	78
III.8.2.4 DESCRIPTION DE LA TABLE S238-10	78
III.8.2.5 APPAREILLAGE UTILISÉ	78
III.8.2.6 PROCÉDURE DE MISE EN ŒUVRE	78
III.8.2.7 FRÉQUENCES, INTENSITÉ DE VIBRATION ET RÉGLAGES POSSIBLES	79
III.8.2.8 ENERGIE DE COMPACTAGE	79
III.8.2.8.1 JUSTIFICATION DE LA FORMULE D'ÉNERGIE VIBRATOIRE	79
III.9 CONCLUSION	81
CHAPITRE IV	
IV.1 INTRODUCTION	82
IV.2 RESULTATS OBTENUS	82
IV.2.1 PREPARATION DES ECHANTILLONS	82
IV.2.2 LES ESSAIS DE COMPACTAGE	82
IV.2.2.1 ESSAIS PROCTOR MODIFIE	82
IV.2.2.2 ESSAIS TABLE DE VIBRATION	85

IV.2.3 COMPARAISON ENTRE L'ESSAI PROCTOR ET L'ESSAI DE COMPACTAGE PAR VIBRATION	88
IV.3 DISCUSSION DES RESULTATS	91
IV.3.1 INTERPRÉTATION LES RÉSULTATS DES ESSAIS D'IDENTIFICATION	91
IV.3.1.1 ANALYSE CHIMIQUE(AFNOR.1995)	91
IV.3.1.2 ANALYSE GRANULOMÉTRIQUE(NF P94-056)	91
IV.3.1.3 LIMITÉ D'ATTERBERG (NF P 94-051)	92
IV.3.2 INTERPRÉTATION LES COURBES DE PROCTOR MODIFIÉ	92
IV.3.3 INTERPRÉTATION LES COURBES DE TABLE DE VIBRATION	93
IV.3.4 COMPARAISON ENTRE L'ESSAI PROCTOR ET L'ESSAI DE COMPACTAGE PAR VIBRATION	93
IV.3.5 INTERPRÉTATION DES RÉSULTATS OBTENUS	94
IV.3.5.1 COMPORTEMENT DE L'ARGILE LORS DU COMPACTAGE	94
IV.3.5.2 AVANTAGES DU MÉLANGE SABLE-ARGILE	94
IV.3.5.3 PRÉPARATION DES ÉCHANTILLONS AVANT COMPACTAGE	94
IV.3.5.4 PROPORTION OPTIMALE DU MÉLANGE	94
IV.3.5.5 EFFET DU MODE DE VIBRATION	95
IV.3.5.6 CONFIRMATION EXPÉRIMENTALE	95
IV.3.5.7 INTERPRÉTATION DE LA DIFFÉRENCE	95
IV.3.5.8 EFFET DE LA COHÉSION	95
IV.3.5.9 FACTEURS PRINCIPAUX INFLUENÇANT LA COMPACITÉ	95
IV.4 CONCLUSION	96
CONCLUSION GÉNÉRALE	97
RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES	
ANNEXE	

Liste des figures

Figures	Chapters	Page
Chapiter I		
Figure I.1	Talonnage du sable	12
Figure I.2	Appareil de Densitomètre à membrane	12
Figure I.3	Appareil de Gamma-densitometer	13
Figure I.4	Comment utiliser un appareil de Gamma-densitomètre	13

Figure I.5	Machine manuelle pour l'essai Proctor au laboratoire	17
Figure I.6	Machine de compactage automatique pour essais en laboratoire	19
Figure I.7	Le compactage sur site nécessite des adaptations aux conditions du site	20
Chapiter II		
Figure II.1	Courbes Proctor Normal et Modifié	33
Figure II.2	Table vibrante de laboratoire	35
Figure II.3	Agitateur magnétique chauffant avec plaque et erlenmeyer	35
Figure II.4	Analyseur de vibrations dynamiques portable avec capteur	35
Figure II.5	Moule cylindrique de proctor	38
Figure II.6	Masse de compactage (Pilon)	39
Figure II.7	Capsules en aluminium	39
Figure II.8	Balance électronique	44
Figure II.9	Étuve de séchage utilisée pour déterminer la teneur en eau des échantillons	44
Chapiter III		
Figure III.1	Situation géographique de la wilaya de Ghardaïa (2023)	49
Figure III.2	Site d'extraction de l'argile	51
Figure III.3	Site d'extraction de sable	51
Figure III.4	Massifs du site Bouhraoua.	51
Figure III.5	Sable de dune de Sebseb	51
Figure III.6	Appareillage d'analyse granulométrique (Ghazal a 2023)	55
Figure III.7	Tamis pour analyse granulométrique (Ghazal a 2023)	55
Figure III.8	courbe granulométrie de sable de dune (AZZOUZ 2016)	56
Figure III.9	Outils d'expérimentation	58
Figure III.10	L'agitateur électrique	58
Figure III.11	Étapes du travail sur l'expérience en laboratoire	59
Figure III.12	Courbe granulométrique de l'argile de Bouhraoua(Ghazal 2023)	62
Figure III.13	Graphe Limite de liquidité(Azzouz 2016)	63
Figure III.14	Travail sur l'expérience avec l'équipe du laboratoire	63
Figure III.15	Graphe Classification d'argile étudiée selon l'abaque de Casa grande(Bouchra 2016)	64
Figure III.16	Étapes de travail sur l'expérience avec l'équipe du laboratoire	66

Figure III.17	Le cas positif et négatif de l'essai de bleu de méthylène	66
Figure III.18	Classification des sols grenus en laboratoire (plus 50% d'éléments >0.08mm) (AFNOR,NF P94-050)	70
Figure III.19	Classification des sols (selon U.S.C.S)	71
Figure III.20	classification GTR (SETRA-LCPC 1980) (Ghazal 2023)	72
Figure III.21	Graphe Classification des sols fins selon GTR pour l'argile De bouhraoua et sable de dune sebseb(Ghazal 2023)	74
Figure III.22	Classification LPC-USCS (Magnan, J.-P. (2015))	76
Figure III.23	Tamis de 2 mm pour éliminer les gros grains	77
Figure III.24	Concasseur de laboratoire à mâchoire	77
Figure III.25	la machine Los Angeles (NF P18-573)	77
Figure III.26	Pesée précise du sable de dune et de l'argile	78
Figure III.27	Mélange manuel des constituants (Sable de dune + Argile)	78
Figure III.28	Le moule Proctor	79
Figure III.29	l'appareil Proctor au laboratoire	79
Figure III.30	Étapes d'Exécution de l'Essai Proctor au Laboratoire	79
Figure III.31	l'appareil table vibratoire au laboratoire	81
Figure III.32	Étapes d'Exécution de l'Essai table vibratoire au Laboratoire	83
Chapiter IV		
Figure IV.1	Préparation de mélange optimale	86
Figure IV.2	Courbe Proctor modifié pour tous les mélanges (sable+argile)	86
Figure IV.3	les moules de table vibrantes.	87
Figure IV.4	préparations des mélanges	87
Figure IV.5	places des moules et l'échantillon pour vibrer	88
Figure IV.6	Alimentatore II a été réglé sur une fréquence de 80 Hz	88
Figure IV.7	Courbe de Table vibration pour tous les mélanges (sable+argile)	88
Figure IV.8	La comparaison entre les courbes de mode Proctor et de vibration 0% Sable + 100% Argile	92
Figure IV.9	La comparaison entre les courbes de mode Proctor et de vibration 100% Sable + 0% Argile	92
Figure IV.10	La comparaison entre les courbes de mode Proctor et de vibration 10% Sable + 90% Argile	92

Figure IV.11	La comparaison entre les courbes de mode Proctor et de vibration 90% Sable + 10% Argile	92
Figure IV.12	La comparaison entre les courbes de mode Proctor et de vibration 30% Sable + 70% Argile	93
Figure IV.13	La comparaison entre les courbes de mode Proctor et de vibration 70% Sable + 30% Argile	93
Figure IV.14	La comparaison entre les courbes de mode Proctor et de vibration 50% Sable + 50% Argile	93
Figure IV.15	Diagramme en colonnes des densités en fonction des proportions sable/argile – Mode de la table vibrante	94
Figure IV.16	Diagramme en colonnes des densités en fonction des proportions sable/argile – Mode Proctor	95

Liset des tableau

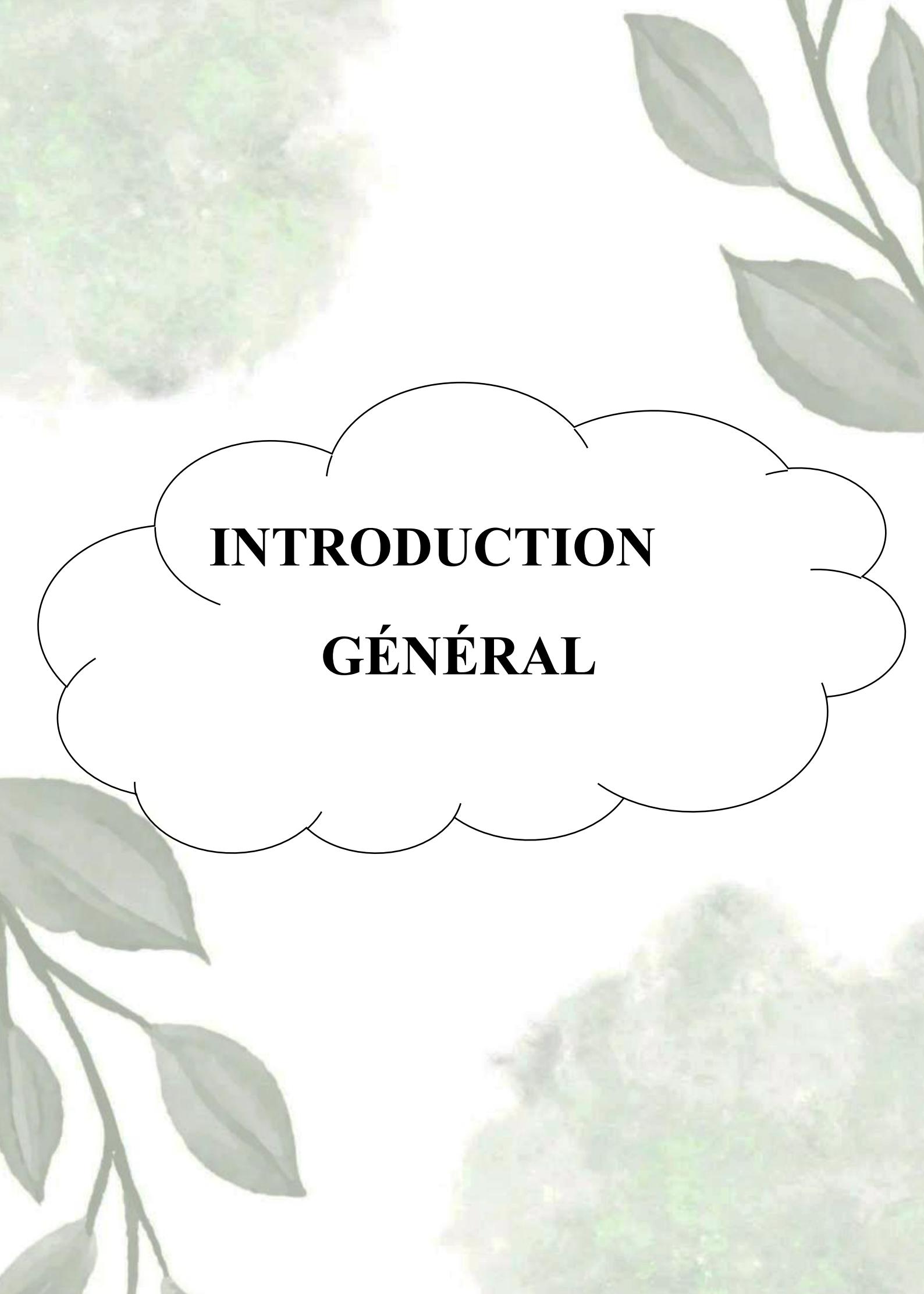
Tableau	Chapters	Page
Chapiter I		

Tableau I.1	Comparaison des performances de compactage en laboratoire et sur chantier pour les sols à granulométrie variable.(Philipponnat et Hubert, 2009)	16
Chapiter II		
Tableau II.1	Récapitulatif des Différences Clés.(AFNOR, 1999)	32
Tableau II.2	Les types de matériaux et leurs applications principales.(Rebaïne, 2015)	36
Tableau II.3	Tableau des mesures et calibrations.(Rebaïne, 2015)	37
Tableau II.4	les paramètres critiques de la méthode vibratoire et leur impact sur les performances du matériau.(Rebaïne, 2015)	37
Tableau II.5	Équipements Utilisés et Leurs Fonctions.(Gambin, 1981)	39
Tableau II.6	Types de sols et applications de la méthode par chocs. (RODRIGUEZ, R, 2015)	40
Tableau II.7	Étapes de mise en œuvre de la méthode par chocs.(Gambin, 1981)	41
Tableau II.8	paramètres des tests de compactage statique pour différents types de sols.(Costet et Sanglerat, 1981)	45
Tableau II.9	Comparaison entre les deux méthodes.(Costet et Sanglerat, 1981)	47
Chapiter III		
Tableau III. 1	Programmes des Essais pour l'Identification des Matériaux Utilisés (AZZOUZ 2016)	52
Tableau III. 2	Les résultats de l'analyse chimique de sable de dune	53
Tableau III. 3	Résultats récapitulatif de l'analyse granulométrique du sable de dune. (AZZOUZ 2016)	56
Tableau III. 4	Résultats de l'équivalent des sables	59
Tableau III. 5	Résultats de Essai au bleu de méthylène (AZZOUZ 2017)	59
Tableau III. 6	Recapitaf des essais identificationsdu sable de dune(AZZOUZ 2016)	60
Tableau III. 7	Analyse chimique de l' argile étudiée (AZZOUZ 2016)	61
Tableau III. 8	Les valeurs de laisse limite Atterberg	64

Tableau III. 9	Résultats de l'essai au bleu à la tâche.	66
Tableau III. 10	Représente la valeur de bleu de méthylène de quelques sols (Hang1984)	67
Tableau III. 11	Classification par CaCO₃ de quelques sols (Azzouz en 2016).	67
Tableau III. 12	Caractérisation d'argile utilisée.	68
Tableau III. 13	Classification GTR (SETRA-LCPC 1980).	73
Tableau III. 14	Résultats des Analyses des Propriétés Physiques et Mécaniques (Ghazal 2023)	73
Tableau III. 15	Caractéristique du sable de dune et de l'argile bouharoua	75
Chapiter IV		
Tableau IV. 1	Résultats d'essais de compactage des mélanges	87
Tableau IV. 2	Résultats des paramètres de compactage selon la méthode de vibration pour tous les mélanges.	89
Tableau IV. 2	Résultats des paramètres de compactage selon la méthode de vibration pour tous les mélanges.	91

Signale et abréviations	
W_L	Limite de liquidité.
W_P	Limite de plasticité.
I_P	Indice de plasticité.
I_R	Indice de retrait.
At	Argiles très plastiques.
Ap	Argiles peu plastiques.
Lt	Limons très plastiques.

Lp	Limons peu plastiques.
A	représente l'activité de l'argile
C2	correspond au pourcentage massique des particules fines de diamètre inférieur à 2
V_b	Valeur de bleu.
N	Indice de nocivité.
CaCO₃	Teneur en carbonate de calcium.
ES	Équivalent de sable.
Cc	Coefficient de courbure.
Cu	Coefficient d'uniformité.
M	Masse de la dame
H	Hauteur de chute
N	Nombre total de coups
V	Volume du moule
F	fréquence des vibrations
D	l'amplitude de déplacement
E	l'énergie de compactage
A	l'accélération vibratoire
T	la durée d'application des vibrations
Γd	Poids volumique sec.
Γh	Poids volumique humide
W	Teneur en eau
H	Hauteur de l'échantillon.
USCS	Unified Soil Classification System
GTR	Guide des Terrassements Routiers
LCPC	Laboratoire central des ponts et chaussées.
Sr	Degré de saturation
Gs	Poids spécifique des particules du sol=2.65



INTRODUCTION

GÉNÉRAL

Introduction Générale

I. INTRODUCTION :

Le développement des infrastructures routières en Algérie repose sur l'optimisation des ressources locales afin de réduire les coûts et garantir la durabilité des ouvrages. Parmi les étapes essentielles de la construction routière, le compactage des sols joue un rôle clé dans l'amélioration de leurs propriétés géotechniques en augmentant leur densité et leur résistance mécanique. Cependant, son efficacité dépend de plusieurs facteurs, notamment le type de sol, l'humidité optimale et la méthode de compactage utilisée. (Daniel, 1995)

Dans la wilaya de Ghardaïa, les sols sont principalement constitués de sables de dunes et d'argiles, posant un défi en termes de stabilité et de portance. Plutôt que de les utiliser séparément, cette étude propose d'examiner les performances d'un mélange de sable de dune de Sebseb et d'argile de Bouhraoua, afin d'évaluer s'il offre de meilleures caractéristiques mécaniques et physiques. L'association de ces deux matériaux pourrait permettre d'optimiser leurs propriétés respectives et d'améliorer la stabilité du sol compacté. (*Mekherbeche & Guettala, 2015*)

La question centrale de cette recherche est donc la suivante : Quelle est la technique de compactage la plus efficace pour un mélange de sable de dune de Sebseb et d'argile de Bouhraoua, afin d'optimiser ses performances géotechniques pour une utilisation en couche de fondation routière ?

L'objectif principal de cette étude est d'optimiser l'utilisation du sable de dune de Sebseb et de l'argile de Bouhraoua en construction routière. Plus précisément, elle vise à :

Caractériser les propriétés physiques et mécaniques du sable, de l'argile et de leur mélange (granulométrie, densité sèche, portance, perméabilité).

Optimiser les performances du mélange sable-argile en déterminant la technique de compactage la plus efficace pour améliorer sa densité et sa stabilité.

Évaluer l'impact de l'humidité optimale sur les performances du matériau compacté.

L'atteinte de ces objectifs permettra de développer un matériau performant pour la couche de fondation routière, alliant efficacité technique et viabilité économique.

L'atteinte de ces objectifs a pour but de fabriquer un matériau pouvant être utilisé en couches de base et de fondation en assise des chaussées à moyen et fort trafic.

Introduction Générale

Cette étude repose sur une approche expérimentale structurée en plusieurs étapes :

1. Analyse des différentes techniques de compactage appliquées aux sols sableux et argileux.
2. Caractérisation des matériaux (analyses granulométriques, limites d'Atterberg, densité sèche maximale, etc.).
3. Réalisation d'un programme expérimental afin de tester l'efficacité des différentes méthodes de compactage sur le sable, l'argile et leur mélange.
4. Interprétation et comparaison des résultats pour identifier la technique de compactage la plus efficace.
5. Proposition de mise en œuvre de la meilleure technique de compactage pour une utilisation optimale des matériaux locaux dans la construction routière.

Ce travail est organisé en quatre chapitres :

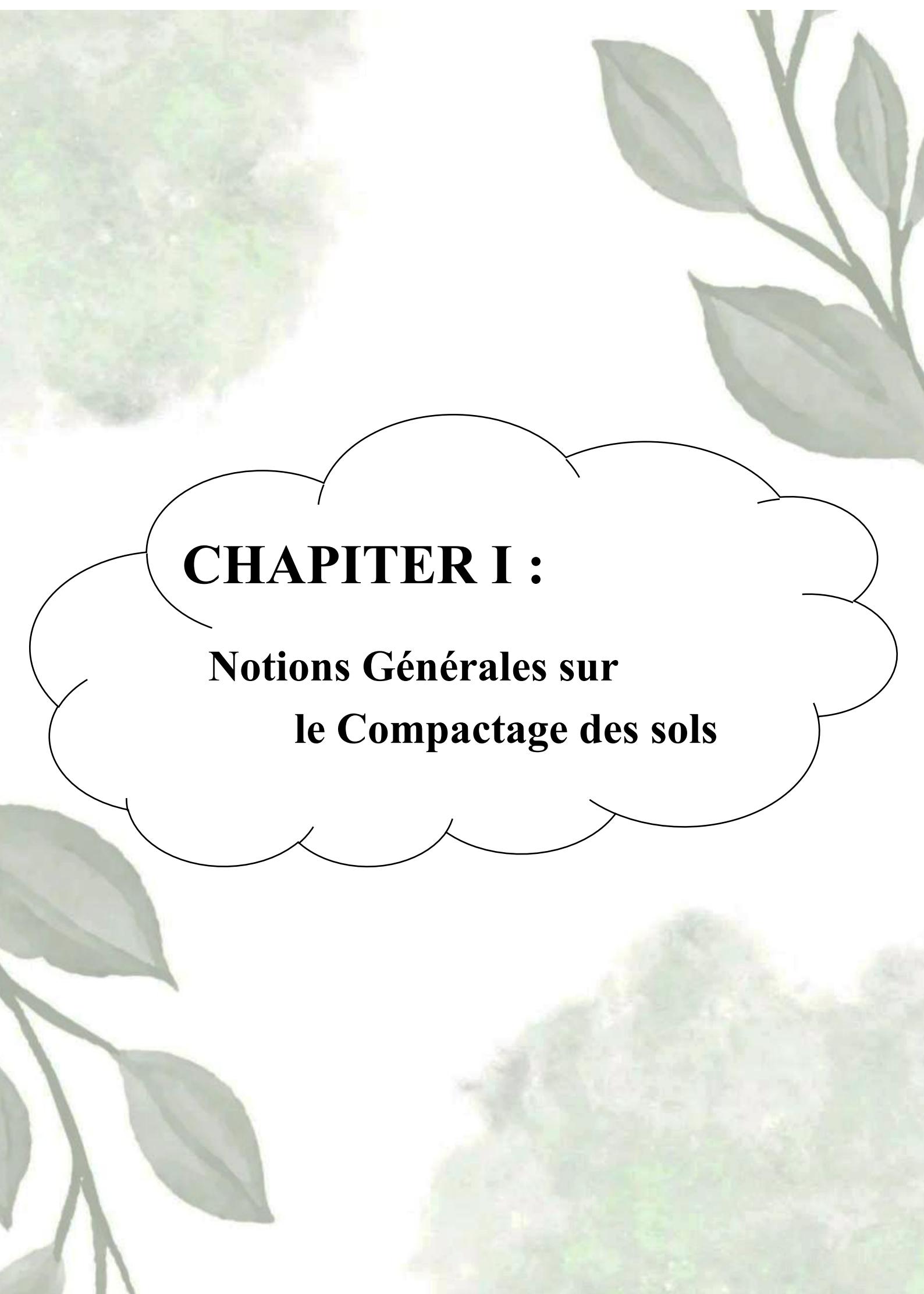
Le premier chapitre 01 : est consacré aux notions générales sur le compactage des sols. Il présente les principes fondamentaux du compactage, son impact sur les caractéristiques géotechniques des sols, ainsi que les différentes techniques de mesure utilisées en laboratoire et sur site.

Dans Le deuxième chapitre expose les différentes techniques de compactage utilisées en laboratoire, en mettant particulièrement l'accent sur les méthodes Proctor (normale et modifiée), la méthode par vibrations, la méthode par chocs et la méthode statique.

Le troisième chapitre décrit le programme expérimental mis en place pour cette étude. Il détaille les matériaux utilisés, leurs propriétés physiques et mécaniques, ainsi que les essais réalisés pour comparer les effets des différentes méthodes de compactage sur le sable, l'argile et leur mélange.

Le dernier chapitre est consacré à l'analyse des résultats obtenus. Il présente une discussion approfondie sur les performances des différentes techniques de compactage testées .

Enfin, ce travail est clôturé par une conclusion générale nous visons à proposer une solution technique efficace pour l'amélioration des sols destinés aux infrastructures routières à l'Algérie, en exploitant les ressources locales de manière optimale et durable.



CHAPITER I :

Notions Générales sur

le Compactage des sols

I.1 INTRODUCTION :

Le compactage des sols est un procédé fondamental en génie civil, indispensable pour optimiser les propriétés géotechniques des terrains et assurer ainsi la stabilité et la performance des ouvrages. Il consiste en une amélioration artificielle de la densité par éjection contrôlée des vides d'air via une énergie mécanique. Ce chapitre introductif vise à établir les concepts clés : définition précise, domaines d'application variés, impacts sur les caractéristiques du sol, et méthodes de contrôle. Une attention particulière sera portée au défi central que représente l'écart fréquent entre les prévisions de laboratoire et les conditions réelles du chantier. Ce chapitre pose ainsi les bases essentielles, indispensables à la compréhension des développements ultérieurs de ce mémoire.

Description du Processus de Compactage d'un sol :

I.2 Définition de compactage :

Comacter un sol, un remblai, une plate-forme, une couche de forme, un corps de chaussée, un noyau de barrage en terre, c'est réduire le volume des interstices de ces divers matériaux, et le compactage consiste surtout à produire un meilleur arrangement des grains en les uns sur les autres. (**G ARQUIE et G. MOREL, 1988**)

I.3 Les avantages de compactage :

D'une manière générale, on entend par compactage, l'ensemble des mesures prises afin d'augmenter le poids spécifique apparent sec du sol traité, ce qui conduit à réduire son volume apparent. Cette densification n'est pas un but en soi, elle n'est recherchée que parce qu'elle entraîne d'autres conséquences. Après le compactage, le sol acquiert (**BIAREZ, 1974**)

- Une augmentation de la résistance au cisaillement,
- Une augmentation de la densité,
- Une diminution du retrait,
- Une diminution de la perméabilité,
- Une diminution de la compressibilité.

I.4 Domaines technologiques requérant un compactage du sol :**I.4.1 Construction routière et ferroviaire :**

Le compactage vise à conférer au matériau une densité suffisante pour assurer une portance adéquate, répartir efficacement les contraintes, minimiser les tassements post-construction, contrôler la perméabilité et augmenter la résistance au cisaillement (Costet & Sanglerat, 1981). Les spécifications techniques, telles que les normes routières, imposent des objectifs de densité exprimés en pourcentage de la densité sèche maximale obtenue à l'essai Proctor (normal ou modifié), ainsi que des exigences de portance (indice CBR). Ces objectifs ne peuvent être atteints que par un compactage méthodique, adapté à la nature du matériau et aux conditions hydriques (Philipponnat & Hubert, 2009). Par exemple, l'utilisation de compacteurs vibrants ou à pneus permet d'atteindre les niveaux de densité requis pour chaque couche, ce qui garantit la stabilité et la longévité de la chaussée (Philipponnat, G. et Hubert, B. (2009)).

Dans le cas des plateformes ferroviaires, le compactage de la sous-couche vise à obtenir un niveau équivalent à 100 % de l'Optimum Proctor Modifié, assurant ainsi la répartition des charges et la transition granulométrique entre le ballast et la plateforme de terrassement (Prat, M., Gouvin, P. et Frossard, E. (2010))

I.4.2 Construction en terre : le cas des Blocs de Terre Comprimée (BTC) :

Le compactage est également crucial dans la fabrication des Blocs de Terre Comprimée (BTC), une technique de construction durable utilisant la terre crue. Le sol, finement tamisé et humidifié à une teneur en eau précise, est fortement comprimé dans une presse. L'objectif est d'atteindre une densité sèche très élevée, directement corrélée à la résistance mécanique et à la durabilité du bloc face aux agressions climatiques. La qualité des BTC dépend donc de l'énergie de compactage appliquée et de la maîtrise des paramètres du sol, tels que la granulométrie, la plasticité et la teneur en eau (Philipponnat & Hubert, 2009).

Les guides de bonnes pratiques, notamment ceux issus de l'AFNOR ou d'organismes internationaux, insistent sur l'importance de la compression statique intense pour garantir la performance des BTC. Ce compactage diffère du compactage dynamique utilisé en terrassement, mais repose sur le même principe physique de réduction des vides pour augmenter la densité.

I.4.3 Barrages, digues et ouvrages hydrauliques en terre :

Dans les ouvrages hydrauliques tels que les barrages et digues en terre, le compactage est une condition essentielle de sécurité et de fonctionnalité. Il permet d'assurer la stabilité générale du massif en terre face aux pressions hydrostatiques et aux sollicitations sismiques, en augmentant la résistance au cisaillement du matériau (Costet & Sanglerat, 1981). De plus, un compactage soigné garantit une faible perméabilité du corps de l'ouvrage, limitant ainsi les risques de fuites d'eau et d'érosion interne. Le contrôle strict de la teneur en eau et de l'énergie de compactage appliquée par couches successives est primordial pour atteindre ces objectifs. (Philipponnat & Hubert, 2009).

I.4.4 Plates-formes industrielles et fondations d'ouvrages :

La création de plates-formes industrielles, de zones de stockage ou de fondations d'ouvrages nécessite un sol support stable et peu déformable. Le compactage vise à fournir une capacité portante suffisante pour les fondations superficielles et à limiter les tassements sous les charges permanentes et d'exploitation. Le remblaiement technique derrière les ouvrages de soutènement ou autour des structures enterrées doit également être soigneusement compacté pour éviter les vides et assurer un bon contact sol-structure (Philipponnat & Hubert, 2009).

I.4.5 Cas du béton préfabriqué : distinction entre compactage du béton et du sol :

Dans la fabrication des éléments en béton préfabriqué, le compactage concerne principalement le matériau béton lui-même, réalisé par vibration intense pour expulser l'air et obtenir un béton dense, homogène et durable. Toutefois, le sol de fondation sur lequel ces éléments sont posés peut nécessiter un compactage géotechnique pour garantir un support stable, selon les principes évoqués pour les plates-formes et fondations. Il convient donc de distinguer le compactage du béton (par vibration) du compactage du sol (par tamisage, roulement, etc.). (Philipponnat & Hubert, 2009).

I.5 Influence du Compactage sur les Propriétés Physico-Mécaniques des Sols et Méthodes de Contrôle :**I.5.1 Corrélations entre l'état de compacité et les caractéristiques physiques :****I.5.1.1 Densité :**

La densité d'un sol correspond à la masse de matière sèche contenue dans une unité de volume. Elle est généralement exprimée en kg/m³. Le compactage permet d'atteindre une densité maximale à une teneur en eau optimale, ce qui améliore les propriétés mécaniques du sol.

- Relation avec le compactage : Le compactage augmente la densité sèche des sols en réduisant le volume des vides d'air. La densité maximale est atteinte à la teneur en eau optimale, comme le montrent les essais Proctor standard et modifié.
- Impact pratique : Une densité élevée améliore la résistance mécanique et réduit la compressibilité du sol, ce qui est essentiel pour les fondations et les remblais. (Lambe, & Whitman1969)

I.5.1.2 Perméabilité :

La perméabilité est la capacité d'un sol à permettre l'écoulement de l'eau à travers ses pores. Elle dépend de la taille des vides et de la connectivité des pores. Le compactage réduit généralement la perméabilité en diminuant la porosité totale.

- Relation avec le compactage : Le compactage réduit généralement la perméabilité des sols en diminuant la porosité et en resserrant les particules. Cependant, cette réduction dépend de la granulométrie et de la structure du sol.
- Impact pratique : Une faible perméabilité est souhaitable pour les barrages en terre ou les couches d'étanchéité, tandis qu'une perméabilité plus élevée peut être nécessaire pour les systèmes de drainage. (Lambe, & Whitman1969)

I.5.1.3 Porosité :

La porosité représente le rapport entre le volume des vides (remplis d'air ou d'eau) et le volume total du sol. Elle est exprimée en pourcentage. Le compactage diminue la porosité

en resserrant les particules, ce qui influence directement d'autres propriétés comme la perméabilité et la rétention d'eau.

- Relation avec le compactage : Le compactage diminue la porosité totale en réduisant les vides d'air. Toutefois, une porosité résiduelle demeure, influençant d'autres propriétés comme la rétention d'eau et la conductivité hydraulique.
- Impact pratique : Une porosité optimisée garantit un équilibre entre la résistance mécanique et les propriétés hydriques du sol. (Lambe, & Whitman1969)

I.5.1.4 Rétention d'eau :

La rétention d'eau désigne la capacité d'un sol à retenir l'eau dans ses pores après saturation. Cette propriété est influencée par la texture, la structure et le degré de compactage.

- Relation avec le compactage : Le compactage affecte la capacité d'un sol à retenir l'eau en modifiant la distribution des pores. Les sols bien compactés présentent souvent une meilleure rétention d'eau, mais cela peut varier en fonction de leur texture et de leur composition minérale.
- Impact pratique : Une bonne rétention d'eau est cruciale pour les applications agricoles et les revêtements routiers, où l'humidité doit être contrôlée pour éviter les fissures ou les affaissements. (Lambe, & Whitman1969)

I.5.2 Techniques de Contrôle du compactage des sols sur site:

La mesure du compactage des sols est une étape cruciale pour garantir la qualité et la conformité des travaux géotechniques. Elle permet de vérifier que les sols atteignent la densité requise pour assurer leur stabilité et leur résistance mécanique. Plusieurs techniques ont été développées pour évaluer le degré de compactage, chacune ayant ses avantages, ses limites et ses champs d'application spécifiques. Parmi les méthodes les plus utilisées figurent le cône de sable, le densitomètre à membrane, le gamma-densitomètre, ainsi que d'autres approches innovantes. (Bowles, J. E. 2012)

I.5.2.1. Cône de sable (Méthode ASTM D1556) :

Le cône de sable est l'une des méthodes les plus répandues pour mesurer la densité in situ des sols. Elle repose sur le principe de substitution volumétrique.

- Principe : Un trou est creusé dans le sol compacté, et le volume de ce trou est déterminé en remplissant celui-ci avec du sable calibré de densité connue. La masse du sol extrait est ensuite mesurée I

- Avantages :

Simple à mettre en œuvre.

Peut être utilisée pour une large gamme de types de sols. (Bowles, 2012)

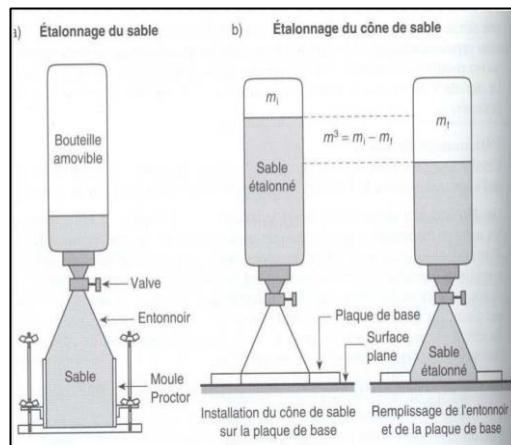


Figure I. 1: Talonnage du sable

I.5.2.2.Densitomètre à membrane (Méthode ASTM**D2167) :**

Le densitomètre à membrane est une méthode alternative au cône de sable, souvent utilisée pour les sols fins et cohésifs.

- Principe : Un appareil équipé d'une membrane flexible est placé sur le sol compacté. La membrane est gonflée pour mesurer le volume du sol sous-jacent. La densité sèche est ensuite calculée en fonction de la masse du sol contenu dans ce volume.

- Avantages :

- Non destructif pour le sol.

- Rapide et facile à utiliser sur les sols cohésifs. (Bowles, 2012)



Figure I.2: Appareil de Densitomètre à membrane

I.5.2.3.Gamma-densitomètre (Méthode ASTM D2922) :

Le gamma-densitomètre est une méthode non destructive basée sur la transmission de rayons gamma.

- Principe : Un dispositif émet des rayons gamma qui traverse le sol compacté. L'atténuation des rayons est mesurée pour déterminer la densité humide du sol. En combinant cette mesure avec la teneur en eau (mesurée séparément), la densité sèche peut être calculée.



Figure I.3 : Appareil de Gamma-densitomètre



Figure I.4 : Comment utiliser un appareil de Gamma-densitomètre

- Avantages :

- Méthode rapide et non destructive.
- Permet des mesures précises même

Sur de grandes surfaces.

I.5.3 Comparaison des méthodes de mesure du compactage des sols :

Le compactage des sols est une étape essentielle dans la construction pour garantir la stabilité et la durabilité des infrastructures. Pour évaluer l'efficacité du compactage, plusieurs méthodes expérimentales ont été développées, chacune ayant ses spécificités techniques, ses avantages et ses limites. Une comparaison expérimentale de ces méthodes permet de mieux comprendre leur applicabilité, leur précision et leur pertinence dans différents contextes géotechniques.

Les paramètres évalués incluent la densité sèche mesurée, la rapidité d'exécution, le coût, la praticabilité sur différents types de sols, et l'impact environnemental. (Rollings & Rollings 2009)

I.5.3.1 Cône de sable :

- Principe expérimental : Un trou est creusé dans le sol compacté, et son volume est déterminé en remplissant le trou avec du sable calibré. La masse du sol extrait est ensuite mesurée pour calculer la densité sèche.

- Résultats expérimentaux :

- Précision : Moyenne à éléver, mais sensible aux erreurs humaines lors du prélèvement du sol.

- Temps requis : Environ 30 à 45 minutes par mesure.
- Adaptabilité : Convient bien aux sols fins et moyennement grossiers, mais moins efficace pour les sols très perméables ou contenant des gros grains.
- Impact environnemental : Destructif pour le sol, nécessitant des réparations après chaque mesure. (Rollings & Rollings 2009)

I.5.3.2 Densitomètre à membrane :

- Principe expérimental : Une membrane flexible est gonflée pour mesurer le volume du sol sous-jacent. La densité sèche est calculée à partir de la masse du sol contenu dans ce volume.
- Résultats expérimentaux :
 - Précision : Élevée pour les sols cohésifs, mais moins fiable pour les sols très grossiers.
 - Temps requis : Environ 15 à 20 minutes par mesure.
 - Adaptabilité : Idéal pour les sols fins et cohésifs, mais inefficace pour les sols très perméables ou irréguliers.
 - Impact environnemental : Non destructif, préservant l'intégrité du sol. (Rollings & Rollings 2009)

I.5.3.3 Gamma-densitomètre :

- Principe expérimental : Des rayons gamma sont émis à travers le sol compacté, et leur atténuation est mesurée pour déterminer la densité humide. La densité sèche est ensuite calculée en fonction de la teneur en eau.
- Résultats expérimentaux :
 - Précision : Très élevée, même pour les sols hétérogènes.
 - Temps requis : Moins de 5 minutes par mesure, ce qui en fait la méthode la plus rapide.
 - Adaptabilité : Convient à tous les types de sols, y compris les sols grossiers et les matériaux granulaires.
 - Impact environnemental : Non destructif, mais nécessite des précautions strictes en raison des risques liés aux rayonnements ionisants. (Rollings & Rollings 2009)

I.5.3.4 Pénétromètre dynamique :

- Principe expérimental :

Un cône est enfoncé dans le sol à l'aide d'une masse tombante, et la résistance à la pénétration est mesurée. Cette résistance est corrélée à la densité du sol.

- Résultats expérimentaux :
- Précision : Moyenne, car elle dépend fortement de la corrélation utilisée entre la résistance à la pénétration et la densité.
- Temps requis : Environ 10 à 15 minutes par mesure.
- Adaptabilité : Principalement adaptée aux sols granulaires et peu cohésifs.
- Impact environnemental : Semi-destructif, car il nécessite une légère altération du sol pour insérer le cône. (Rollings & Rollings 2009)

I.5.3.5 Analyse comparative :

Une analyse comparative des résultats expérimentaux montre que les méthodes diffèrent principalement selon les critères suivants :

Tableau I.2 : Comparaison des performances de compactage en laboratoire et sur chantier pour les sols à granulométrie variable.(Philipponnat et Hubert, 2009)

Méthode	Précision	Rapidité	Coût	Adaptabilité	Impact environnemental
Cône de sable	Moyenne	Modérée	Faible	Large	Destructif
Densitomètre à membrane	Élevée	Rapide	Modéré	Sols cohésifs	Non destructif
Gamma-densitomètre	Très élevée	Très rapide	Élevé	Tous types de sols	Nondestructif (précautions)
Pénétromètre carottier (SPT)	Moyenne	Rapide	Modéré	sable lâche	Semi-destructif

I.6 Évaluation de la performance des techniques de contrôle du compactage des sols :

La performance du compactage est généralement mesurée à travers des essais normalisés qui permettent de vérifier la conformité des travaux avec les spécifications techniques. Ces essais

sont divisés en deux catégories principales : les méthodes destructives et les méthodes non destructives. Les premières impliquent des prélèvements d'échantillons *in situ*, tandis que les secondes reposent sur des technologies avancées telles que les ondes électromagnétiques ou acoustiques. (Holtz & Kovacs 2011)

I.6.1 Essai Proctor :

L'essai Proctor, développé par Ralph R. Proctor dans les années 1930, reste une référence pour déterminer la relation entre la densité sèche et la teneur en eau d'un sol. Cet essai existe sous deux variantes : l'essai Proctor standard et l'essai Proctor modifié. La version modifiée est plus couramment utilisée dans les projets modernes en raison de l'énergie de compactage plus élevée qu'elle impose.

- Principe : Un échantillon de sol est compacté dans un moule cylindrique à différentes teneurs en eau. La densité sèche est ensuite mesurée pour chaque condition, permettant de tracer une courbe caractéristique où le pic correspond à la teneur en eau optimale.
- Applications : L'essai Proctor est essentiel pour les chantiers routiers, les barrages en terre, et les remblais. (Holtz & Kovacs 2011)



Figure I.5 : Machine manuelle pour l'essai Proctor au laboratoire

I.6.2 Essai à la plaque de chargement :

Cet essai permet d'évaluer le module de déformation (ou module d'élasticité) du sol compacté.

Il consiste à appliquer une charge statique sur une plaque rigide placée à la surface du sol et à mesurer les déformations résultantes.

- Avantages : Il fournit des informations précieuses sur la capacité portante du sol. (Holtz & Kovacs 2011)

I.6.3 Technologies non destructives :

Avec l'avancement technologique, des méthodes non destructives ont été développées pour évaluer le compactage des sols sans altérer leur intégrité. Parmi ces techniques figurent :

- L'essai au pénétromètre dynamique : Utilisé pour mesurer la résistance à la pénétration du sol.
- Les techniques géophysiques : Comme la tomographie par résistivité électrique ou les méthodes sismiques, qui permettent de cartographier les variations de densité et de teneur en eau.
- L'utilisation des capteurs intelligents : Des capteurs embarqués sur les rouleaux compresseurs peuvent fournir des données en temps réel sur la densité et l'uniformité du compactage. (Holtz & Kovacs 2011)

I.6.4 Paramètres influençant la performance du compactage :

Plusieurs facteurs influencent directement les performances des techniques de contrôle du compactage :

- La nature du sol : Les sols argileux, sableux ou limoneux réagissent différemment aux efforts de compactage en fonction de leur granulométrie et de leur plasticité.
- L'énergie de compactage : Une énergie excessive peut entraîner une sur compaction, ce qui fragilise la structure du sol.
- La teneur en eau : Une teneur en eau inférieure ou supérieure à la valeur optimale diminue l'efficacité du compactage.
- Les conditions environnementales : Les variations climatiques, telles que les précipitations ou les températures extrêmes, peuvent affecter les résultats des essais. (Holtz & Kovacs 2011)

I.7 Différences entre compactage en laboratoire et compactage sur site :

Le compactage est une étape fondamentale dans les projets de construction, car il permet d'améliorer les propriétés mécaniques des sols en augmentant leur densité et en réduisant leur compressibilité. Cependant, les méthodes de compactage peuvent varier considérablement entre les conditions contrôlées du laboratoire et les conditions réelles sur site. Ces différences influencent directement les performances des matériaux utilisés, notamment en raison des variations des paramètres granulométriques, du processus de malaxage et de la gestion de la teneur en eau. (Das, B. M & Sobhan 2014)

I.7.1 Compactage en laboratoire : une approche standardisée

Le compactage en laboratoire repose sur des essais normalisés qui visent à reproduire les conditions idéales pour un matériau donné. Parmi les essais les plus courants figurent l'essai Proctor standard et l'essai Proctor modifié.



I.7.1.1 Paramètres granulométriques :

En laboratoire, les échantillons de sol sont généralement préparés avec une granulométrie spécifique et bien contrôlée. Cette uniformité permet de minimiser les variations dans les résultats expérimentaux. Cependant, cette approche peut ne pas refléter fidèlement la diversité des matériaux rencontrés sur site, où les sols sont souvent hétérogènes.

Figure I.6 : Machine de compactage automatique pour essais en laboratoire

I.7.1.2 Malaxage :

Le malaxage en laboratoire est effectué de manière systématique pour homogénéiser le matériau et garantir une répartition uniforme de l'eau. Cette étape est cruciale pour obtenir des résultats reproductibles, mais elle peut différer des conditions réelles où le mélange est souvent moins contrôlé.

I.7.1.3 Teneur en eau :

La teneur en eau optimale est déterminée en laboratoire en ajustant précisément la quantité d'eau ajoutée au sol. Toutefois, sur site, la teneur en eau peut être influencée par des facteurs externes tels que les précipitations, l'évaporation ou les variations climatiques. (Das, B. M & Sobhan 2014).

I.7.2 Compactage sur site : défis et adaptations

Le compactage sur site présente des défis supplémentaires dus aux conditions environnementales et aux contraintes opérationnelles.

I.7.2.1 Paramètres granulométriques :

Sur site, les sols sont souvent composés de matériaux variés provenant de différentes sources. Cette hétérogénéité peut affecter la qualité du compactage, car les grosses particules peuvent empêcher une densification uniforme. Pour remédier à cela, des techniques telles que le criblage ou le mélange de matériaux sont souvent utilisées.



Figure I.7 :Le compactage sur site nécessite des adaptations aux conditions du site

I.7.2.2 Malaxage :

Contrairement au laboratoire, le malaxage sur site est réalisé à l'aide d'équipements lourds tels que les niveleuses ou les malaxeurs mobiles. Ce processus est moins contrôlé, ce qui peut entraîner des variations locales dans la répartition de l'eau et des particules.

I.7.2.3 Teneur en eau :

La gestion de la teneur en eau sur site est complexe, car elle dépend des conditions météorologiques et des pratiques de gestion. Par exemple, une sécheresse prolongée peut nécessiter l'ajout d'eau artificiellement, tandis qu'une pluie excessive peut compromettre le compactage en saturant le sol. (Das, B. M & Sobhan 2014)

I.8 Écart entre conditions de laboratoire et conditions de terrain dans le compactage des sols :

Le compactage des sols est une technique clé pour garantir la stabilité des infrastructures, mais il existe souvent un écart significatif entre les résultats obtenus en laboratoire et ceux observés sur le terrain. Cet écart est principalement dû aux différences dans les conditions expérimentales, les équipements utilisés, et les contraintes environnementales.

Comprendre ces écarts est essentiel pour optimiser les pratiques de compactage et assurer la durabilité des ouvrages. (Budhu, M. 2011)

I.8.1 Facteurs contribuant à l'écart entre laboratoire et terrain :**I.8.1.1 Conditions expérimentales :**

Laboratoire : Les essais en laboratoire sont réalisés dans des conditions contrôlées où les paramètres tels que la granulométrie, la teneur en eau, et l'énergie de compactage sont strictement définis. Par exemple, l'essai Proctor modifié permet de déterminer la densité sèche maximale et la teneur en eau optimale sous des conditions standardisées. Ces résultats servent de référence pour les travaux sur site.

- Terrain : Sur le terrain, les conditions sont beaucoup moins contrôlées. Les matériaux peuvent être hétérogènes, la teneur en eau peut varier en fonction des conditions météorologiques, et l'énergie de compactage appliquée par les équipements peut ne pas correspondre exactement aux normes de laboratoire. (Budhu, M. 2011)

I.8.1.2 Équipements utilisés :

- Laboratoire : Les équipements de laboratoire, tels que les moules cylindriques et les marteaux de compactage, sont conçus pour reproduire des conditions spécifiques avec une grande précision.

- Terrain : Les équipements de chantier, tels que les rouleaux vibrants ou les rouleaux à pneus, sont adaptés à des surfaces plus vastes et à des volumes importants de matériaux. Toutefois, ils introduisent des variations dans la répartition de l'énergie de compactage, ce qui peut entraîner des zones sous-compactées ou sur-compactées. (Budhu, M. 2011)

I.8.1.3 Contraintes environnementales :

- Laboratoire : Les conditions environnementales telles que la température, l'humidité, et les interactions avec l'environnement naturel ne sont pas prises en compte dans les essais de laboratoire.
- Terrain : Sur le terrain, ces facteurs jouent un rôle crucial. Par exemple, une pluie inattendue peut augmenter la teneur en eau du sol au-delà de la valeur optimale, tandis qu'une sécheresse prolongée peut rendre le sol trop sec pour un compactage efficace. De plus, la présence de végétation ou de matières organiques peut également affecter les performances du compactage. (Budhu, M. 2011)

I.8.2 Conséquences pratiques de l'écart :**I.8.2.1 Variabilité des performances :**

Les écarts entre les conditions de laboratoire et celles du terrain peuvent entraîner une variabilité importante dans les performances des sols compactés. Par exemple, un sol qui atteint la densité sèche maximale en laboratoire peut présenter une densité inférieure sur site en raison d'une mauvaise gestion de la teneur en eau ou d'une application incorrecte de l'énergie de compactage.

I.8.2.2 Risque de non-conformité :

Lorsque les spécifications techniques basées sur les résultats de laboratoire ne sont pas respectées sur site, cela peut entraîner des problèmes structurels tels que des affaissements, des fissures, ou une capacité portante insuffisante. Ces défauts peuvent nécessiter des travaux de réparation coûteux et retarder le projet. (Budhu, M. 2011)

I.8.2.3 Nécessité d'ajustements :

Pour minimiser l'écart entre laboratoire et terrain, des ajustements sont souvent nécessaires. Par exemple, des essais préliminaires peuvent être réalisés sur site pour ajuster les paramètres de compactage en fonction des conditions réelles. De plus, des technologies avancées, telles que les capteurs intelligents embarqués sur les rouleaux compresseurs, permettent de surveiller en temps réel la qualité du compactage et de détecter rapidement les zones problématiques. (Budhu, M. 2011)

I.8.3 Solutions pour réduire l'écart :**I.8.3.1 Calibration des équipements :**

Il est essentiel de calibrer les équipements de chantier pour qu'ils reproduisent autant que possible les conditions de laboratoire. Par exemple, l'utilisation de rouleaux vibrants avec des fréquences et amplitudes ajustables peut aider à mieux contrôler l'énergie de compactage. . (Das, B. M & Sobhan 2014)

I.8.3.2 Essais préliminaires sur site :

Avant de commencer les travaux à grande échelle, des essais préliminaires peuvent être réalisés pour ajuster les paramètres de compactage en fonction des caractéristiques spécifiques du sol et des conditions environnementales. . (Das, B. M & Sobhan 2014)

I.8.3.3 Ethnologies innovantes :

L'intégration de technologies modernes, telles que les systèmes de surveillance géophysique ou les capteurs embarqués, permet de réduire l'écart entre les conditions de laboratoire et celles du terrain. Ces outils fournissent des données en temps réel sur la densité, la teneur en eau, et l'uniformité du compactage. (Budhu, M. 2011)

I.9 Comparaison des performances de compactage en laboratoire et sur chantier :

Le compactage des sols est une opération clé dans la construction, visant à améliorer les propriétés mécaniques des matériaux en augmentant leur densité et en réduisant leur compressibilité. Cependant, les performances de compactage peuvent varier considérablement entre les conditions contrôlées du laboratoire et les conditions réelles sur chantier, notamment pour les sols à granulométrie variable. Ces variations sont influencées par plusieurs facteurs, tels que la distribution granulométrique, la teneur en eau, et l'énergie de compactage appliquée. (Craig, R. F., & Knappett, J. A.2019)

I.9.1 Compactage en laboratoire :

Le compactage en laboratoire repose sur des essais normalisés, tels que l'essai Proctor standard ou modifié, qui permettent d'évaluer les performances des sols sous des conditions idéales.

- Granulométrie : Les échantillons utilisés en laboratoire sont souvent préparés avec une granulométrie spécifique et homogène. Cette approche permet de minimiser les variations dans les résultats expérimentaux, mais elle peut ne pas refléter fidèlement la diversité des matériaux rencontrés sur chantier.

- Teneur en eau : La teneur en eau optimale est déterminée en ajustant précisément la quantité d'eau ajoutée au sol. Cette précision est difficile à reproduire sur chantier, où les conditions environnementales peuvent perturber l'équilibre hydrique.

- Énergie de compactage : L'énergie appliquée est strictement définie selon les normes (par exemple, 27 coups par couche pour l'essai Proctor standard). Cette uniformité garantit des résultats reproductibles, mais elle peut différer des conditions réelles où l'énergie de compactage est distribuée de manière inégale. (Craig, R. F., & Knappett, J. A. 2019)

I.9.2 Compactage sur chantier :

Le compactage sur chantier présente des défis supplémentaires dus aux conditions environnementales, à la variabilité des matériaux, et aux contraintes opérationnelles.

- Granulométrie : Sur chantier, les sols sont souvent composés de matériaux hétérogènes provenant de différentes sources. Cette hétérogénéité peut affecter la qualité du compactage, car les grosses particules peuvent empêcher une densification uniforme.

- Teneur en eau : La gestion de la teneur en eau sur chantier est complexe, car elle dépend des conditions météorologiques et des pratiques de gestion. Par exemple, une sécheresse prolongée peut nécessiter l'ajout d'eau artificiellement, tandis qu'une pluie excessive peut compromettre le compactage en saturant le sol.

- Énergie de compactage : L'énergie appliquée sur chantier dépend du type d'équipement utilisé (rouleaux vibrants, rouleaux lisses, etc.) et des spécifications du projet. Contrairement au

laboratoire, cette énergie n'est pas toujours uniformément distribuée, ce qui peut entraîner des zones sous-compactées ou sur-compactées. (Craig & Knappett 2019)

I.9.3 Comparaison des performances:

Pour comparer les performances de compactage en laboratoire et sur chantier, une étude a été menée sur des sols à granulométrie variable.

Les paramètres analysés incluent la densité sèche maximale, la teneur en eau optimale, et l'uniformité du compactage. (Craig & Knappett 2019)

I.9.3.1 Densité sèche maximale :

- Laboratoire : Les résultats montrent que les sols atteignent généralement une densité sèche maximale plus élevée en laboratoire, grâce à des conditions contrôlées et une granulométrie uniforme.
- Chantier : Sur chantier, la densité sèche maximale est souvent inférieure en raison de la variabilité granulométrique et des conditions environnementales non contrôlées. (Craig & Knappett 2019)

I.9.3.2 Teneur en eau optimale ;

- Laboratoire : La teneur en eau optimale est facilement identifiable et reproductible en laboratoire.
- Chantier : Sur chantier, la teneur en eau optimale est plus difficile à maintenir, ce qui peut entraîner un compactage sous-optimal ou un excès d'eau. (Craig & Knappett 2019)

I.9.3.3 Uniformité du compactage :

- Laboratoire : L'uniformité est maximale en laboratoire grâce à des procédures rigoureuses et des équipements standardisés.
- Chantier : Sur chantier, l'uniformité est souvent compromise par la présence de zones sous-compactées ou sur-compactées, dues à des variations locales dans la granulométrie et la teneur en eau. (Craig & Knappett 2019)

I.9.4 Impact de la granulométrie variable :

La granulométrie joue un rôle crucial dans les performances de compactage :

- Sols fins : Les sols fins (argiles, limons) sont généralement plus faciles à compacter, tant en laboratoire que sur chantier, car ils permettent une meilleure répartition de l'énergie de compactage.
- Sols grossiers : Les sols grossiers (graviers, sables) présentent des défis supplémentaires, car les gros grains peuvent créer des vides difficiles à éliminer, même avec une énergie de compactage élevée.
- Sols mixtes : Les sols à granulométrie variable, contenant à la fois des particules fines et grossières, sont les plus complexes à compacter. En laboratoire, ces sols peuvent être préparés pour maximiser leur densité, mais sur chantier, leur hétérogénéité naturelle rend le compactage moins efficace. (Craig & Knappett 2019)

I.10 CONCLUSION :

En synthèse, ce chapitre a mis en lumière le compactage comme pivot incontournable en génie civil, essentiel pour conférer aux sols les propriétés mécaniques et hydrauliques requises par les ouvrages. Au-delà des définitions et des méthodes de contrôle présentées, l'enjeu fondamental réside dans la gestion du décalage inévitable entre les conditions idéalisées du laboratoire (servant de référence) et la complexité variable du terrain. Cerner et maîtriser cet écart constitue le véritable défi pour l'ingénieur et demeure le gage essentiel de la performance et de la sécurité des constructions en terre.



CHAPITER II :

Techniques de compactage au laboratoire

II.1 Introduction :

Dans la continuité du chapitre précédent, cette introduction établit le cadre d'une analyse théorique et méthodique des principales techniques de compactage et de contrôle de la densité des sols et matériaux industriels, en conditions de laboratoire ou dans des contextes expérimentaux simulant le terrain. L'objectif est de proposer une lecture comparative fondée sur les principes physiques, les normes de référence, ainsi que les paramètres influençant les performances de chaque méthode notamment les essais Proctor (normal et modifié), le compactage vibratoire, par chocs et statique.

Cette approche s'appuie sur l'étude des mécanismes fondamentaux qui régissent le comportement des matériaux sous différentes énergies de compactage, tout en distinguant les facteurs intrinsèques (granulométrie, teneur en eau, nature du matériau) et extrinsèques (conditions expérimentales, limites des équipements).

Ce cadre théorique vise ainsi à fournir au lecteur une base de connaissances structurée permettant :

- de comprendre les mécanismes physiques propres à chaque méthode de compactage ;
- d'identifier les caractéristiques théoriques associées à chaque technique selon des critères scientifiques précis ;
- d'analyser l'impact des variables expérimentales sur les résultats de densité ;
- et de cadrer la comparaison des approches selon une logique analytique rigoureuse.

Ce travail constitue une étape fondamentale pour aborder, par la suite, les applications pratiques et les choix techniques dans les projets de génie civil.(Costet et Sanglerat, 1981)

II.2 L'Essai Proctor Normal :**II.2.1 Définition :**

L'essai Proctor Normal, normalisé en France par la NF P 94-093 (AFNOR, 1999), est une méthode empirique de laboratoire visant à déterminer les caractéristiques optimales de compactage d'un sol sous une énergie spécifique et modérée. Cette énergie, fixée à environ 600 kJ/m³, est considérée comme représentative des efforts de compactage obtenus avec des engins légers. L'essai consiste à compacter un échantillon de sol, préparé à différentes teneurs en eau,

dans un moule standardisé, afin d'établir la courbe reliant la masse volumique sèche (ρ_d) à la teneur en eau (w). Le point culminant de cette courbe définit la teneur en eau optimale Proctor Normal (w_{opt}) et la masse volumique sèche maximale Proctor Normal (ρ_{dmax}). Des normes internationales équivalentes existent, telle que l'ASTM D698.

II.2.2 Objectifs :

L'essai Proctor Normal poursuit plusieurs objectifs techniques, notamment :

- Déterminer les paramètres de référence (w_{opt} , ρ_{dmax}) pour un sol donné.
- Optimiser le compactage pour des ouvrages ne nécessitant pas une capacité portante très élevée.
- Prévenir les tassements différentiels dans les fondations superficielles, comme le rappellent les principes généraux de la mécanique des sols (voir par ex. Costet et Sanglerat, 1981).
- Classifier les sols selon leur aptitude au compactage et servir de référence pour d'autres essais.

II.2.3 Matériel et Appareillage :

- Moule Proctor normal (\varnothing 101,6 mm, hauteur 116,4 mm)
- Dame de compactage de 2,5 kg (hauteur de chute 30,5 cm)
- Disque d'espacement (épaisseur adaptée, ex. 36 mm)
- Papier filtre (\varnothing 150 mm)
- Règle à araser (pour niveler la surface)
- Trousse coupante (pour prélever les échantillons)
- Balance de précision
- Étuve pour la détermination de la teneur en eau

II.2.4 Protocole Expérimental Détailé :

Le protocole de l'essai Proctor Normal, tel que décrit dans la norme NF P 94-093, suit une procédure rigoureuse : préparation de l'échantillon (fraction passant au tamis de 20 mm), humidification contrôlée par lots avec maturation, compactage dans le moule en **trois couches** successives, chaque couche recevant **25 coups** de dame uniformément répartis. Après compactage, le sol est arasé, la masse volumique humide (ρ_h) est déterminée, et la teneur en eau (w) est mesurée sur un prélèvement par séchage à l'étuve. La masse volumique sèche ($\rho_d = \rho_h / (1 + w)$) est calculée pour chaque point. La courbe (w, ρ_d) est ensuite tracée pour identifier l'optimum (w_{opt}, ρ_{dmax}).

II.3 L'Essai Proctor Modifié :**II.3.1 Définition :**

L'essai Proctor Modifié, également couvert par la norme NF P 94-093 (AFNOR, 1999) et la norme internationale ASTM D1557, simule des énergies de compactage beaucoup plus élevées (environ 2700 kJ/m³, soit 4.5 fois l'énergie du Proctor Normal). Cette énergie accrue est représentative des engins de compactage lourds utilisés pour les infrastructures critiques (chaussées, aéroports, barrages). L'essai détermine la teneur en eau optimale Proctor Modifié (w_{opt}) et la masse volumique sèche maximale Proctor Modifié (ρ_{dmax}).

II.3.2 Objectifs :

Les objectifs de l'essai Proctor Modifié sont orientés vers des applications exigeantes :

- Déterminer les paramètres de référence (w_{opt}, ρ_{dmax}) sous forte énergie.
- Garantir une portance élevée des couches de chaussées, conformément aux spécifications du **Guide des Terrassements Routiers (GTR, 2023)**.
- Optimiser le compactage des ouvrages hydrauliques.
- Contrôler l'efficacité des traitements de sols aux liants hydrauliques (Infociments, 2023), où une densité élevée est clé pour la résistance.

II.3.3 Matériel et Appareillage :

- Moule Proctor modifié (\varnothing 152,4 mm, hauteur 116,4 mm ou selon la norme)
- Dame de compactage de 4,5 kg (hauteur de chute 45,7 cm)
- Disque d'espacement adapté
- Papier filtre (\varnothing 150 mm)
- Règle à araser
- Trousse coupante
- Balance de précision
- Étuve

II.3.4 Protocole Expérimental Détailé :

Le protocole Proctor Modifié (NF P 94-093) est similaire au Normal mais adapté à la plus haute énergie : préparation de l'échantillon (tamisage à 20 mm ou 40 mm selon moule), humidification et maturation, compactage en **cinq couches** successives. Chaque couche reçoit **25 coups** (moule Normal \varnothing 101.6 mm) ou **56 coups** (moule CBR \varnothing 152.4 mm) de la dame modifiée. Les mesures et calculs pour obtenir la courbe (w , ρ_d) et l'optimum (w_{opt} , ρ_{dmax}) sont analogues à ceux de l'essai Normal.

II.4 Comparaison Fondamentale entre les Essais Proctor Normal et Modifié :**II.4.1 Énergie de Compactage :**

La différence fondamentale réside dans l'énergie spécifique appliquée : environ **600 kJ/m³** pour le Normal contre **2700 kJ/m³** pour le Modifié. Cette différence de facteur 4.5 environ conditionne toutes les autres distinctions.

II.4.2 Masse Volumique Sèche Maximale et Teneur en Eau Optimale :

Conséquence directe de la différence d'énergie : pour un même sol, la masse volumique sèche maximale obtenue à l'essai Modifié est systématiquement supérieure à celle de l'essai Normal ($\rho_{dmax} \text{ OPM} > \rho_{dmax} \text{ OPN}$), tandis que la teneur en eau optimale est systématiquement inférieure ($w \text{ OPM} < w \text{ OPN}$). L'énergie supérieure du Proctor Modifié permet d'atteindre une densité plus élevée avec moins d'eau servant de lubrifiant (Costet et Sanglerat, 1981).

II.4.3 Domaines d'Application et Exigences :

Le Proctor Normal sert de référence pour les travaux courants (remblais légers, fondations standards), tandis que le Proctor Modifié est requis pour les infrastructures soumises à de fortes charges ou à des exigences de performance élevées (chaussées lourdes, couches traitées, barrages) (Philipponnat et Hubert, 2009 ; GTR, 2023). Les objectifs de compacité sur chantier (% OPN ou % OPM) sont spécifiés dans les cahiers des charges.

Tableau II.1 : Récapitulatif des Différences Clés entre OPN et OPM.(AFNOR, 1999)

Critère	Proctor Normal (NF P 94-093)	Proctor Modifié (NF P 94-093)
Énergie Spécifique (app.)	$\approx 600 \text{ kJ/m}^3$	$\approx 2700 \text{ kJ/m}^3$
Dame : Masse	2.5 kg	4.5 kg
Dame : Hauteur de Chute	30.5 cm	45.7 cm
Nombre de Couches	3	5
Coups/Couche(moule Ø101.6mm)	25	25
Coups /Couche (moule Ø152.4mm)	(Non applicable)	56
γ_{dmax} Typique	Plus faible	Plus élevée
w_{opt} Typique	Plus élevée	Plus faible
Représentativité Chantier	Engins légers/moyens	Engins lourds/performants
Applications Courantes	Remblais légers, jardins, fondations standards	Chaussées lourdes, aéroports, barrages, couches traitées

II.5 Facteurs influant sur la courbe Proctor :

II.5.1 La Courbe Proctor :

La courbe Proctor, reliant ρ_d à w , présente une forme en cloche caractéristique. La branche ascendante (côté sec) montre l'effet lubrifiant de l'eau qui facilite la densification. Le sommet de la courbe correspond à l'optimum (w_{OPN/OPM}, ρ_{dmax} OPN/OPM), point où l'arrangement des grains est le plus dense pour l'énergie donnée. La branche descendante (côté humide) indique qu'un excès d'eau commence à occuper la place des grains, empêchant une meilleure densification. Cette courbe expérimentale est toujours située en dessous de la courbe de saturation théorique ($S_r = 100\%$ ou 0% d'air). (Costet et Sanglerat, 1981)

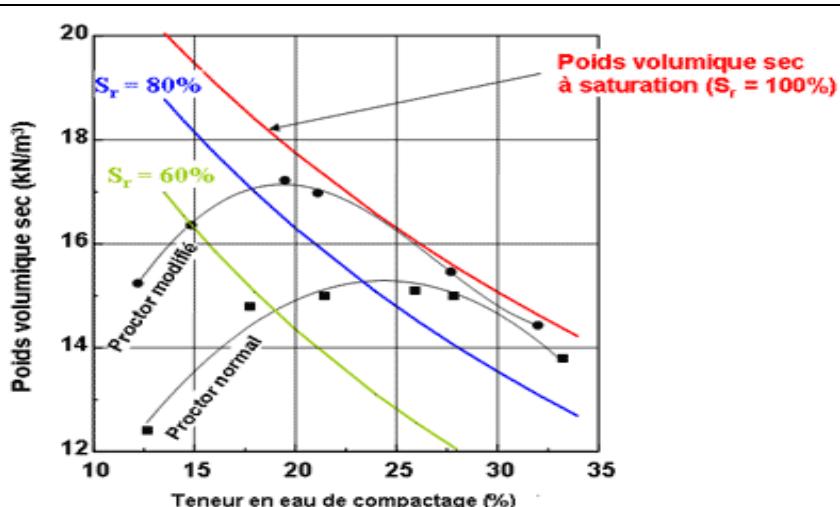


Figure I.1: Courbes Proctor Normal et Modifié

II.5.2 Les états de compacité et de sur consolidation :

La forme et la position de la courbe Proctor dépendent fortement de plusieurs facteurs :

- **Nature du Sol :** La granulométrie (distribution des tailles de grains) et la plasticité (pour les sols fins : indice de plasticité IP) influencent w_{opt} et ρ_{dmax} . Les sols bien gradués atteignent généralement des ρ_{dmax} plus élevées à des w_{opt} plus faibles que les sols argileux très plastiques.
- **Présence de Matières Organiques :** Celles-ci, étant légères et compressibles, tendent à diminuer ρ_{dmax} et à augmenter w_{opt} .

- **Énergie de Compactage** : Facteur principal différenciant les essais Normal et Modifié, impactant directement p_d max et w_{opt} .
- **Préparation de l'Échantillon** : Un séchage/humidification et une maturation adéquats sont essentiels pour obtenir des résultats fiables et reproductibles (Costet et Sanglerat, 1981).

II.6 Méthode Vibratoire :

II.6.1 Définition :

La méthode vibratoire, également appelée vibratoire, trouve ses origines dans les besoins industriels d'amélioration des performances des matériaux granulaires. Elle est apparue dans les années 1950, initialement utilisée pour densifier les sols granulaires dans les travaux de fondation avant d'être adaptée à des applications industrielles comme la fabrication des anodes en carbone pour l'aluminium primaire. Selon des études telles que celle de "Rebaïne (2015)", cette méthode est particulièrement efficace pour améliorer la densité et les propriétés mécaniques des matériaux granulaires et pâteux. (Rebaïne 2015)

La vibratoire appartient aux techniques dynamiques de compactage, par opposition aux méthodes statiques telles que le pressage ou le pilonnage. Elle est classée dans les domaines suivants :

- Techniques d'amélioration des sols en géotechnique.
- Techniques de fabrication des matériaux moulés, tels que les anodes crues, les briques réfractaires, ou encore les mortiers vibrés.

Sur le plan normatif, elle est régulée par des standards internationaux comme

- **ASTM D7382-08** : pour la mesure de la densité apparente et du compactage,

II.6.2 Objectifs :

Les objectifs principaux de la méthode vibratoire incluent :

- L'amélioration de la densité et du tassement des matériaux.
- L'augmentation des propriétés mécaniques, notamment le module d'élasticité et la résistance à la compression.
- La garantie d'une homogénéité interne du matériau, évitant ainsi les vides ou défauts structurels.
- La réduction de la porosité pour prolonger la durée de vie des produits finis. (Rebaïne 2015)

II.6.3 Équipements et outils utilisés :

Voici une explication concise du rôle de chaque équipement dans une expérience :

- Table vibrante : un appareil utilisé pour simuler des vibrations afin de niveler et compacter les matériaux granulaires comme le sol en laboratoire.
- Agitateur magnétique: Appareil de laboratoire utilisé pour agiter et chauffer des solutions, assurant un mélange homogène.
- Broyeur vibrant : Réduit la taille des particules d'un matériau pour préparer des échantillons à analyser.
- Vibrocompacteur : Appareil utilisé pour compacter les sols par des vibrations mécaniques afin d'augmenter leur densité et leur stabilité.
- Capteurs : Instrument portable servant à mesurer et analyser les vibrations dans les matériaux ou machines



Figure II.2: Table vibrante de laboratoire



Figure II.3: Agitateur magnétique chauffant avec plaque et erlenmeyer



Figure II.4: Analyseur de vibrations dynamiques portable avec capteur

II.6.4 Matériaux compatibles avec la méthode vibratoire :

Les matériaux compatibles avec la méthode vibratoire sont nombreux :

- **Sols granulaires** : sables et graviers utilisés dans les travaux géotechniques.
- **Matériaux industriels** : pâtes de carbone pour les anodes, chaux, plâtre, et béton.

Tableau II.2 : Les types de matériaux et leurs applications principales.(Rebaïne, 2015)

Matériau	Application	Avantages obtenus
Sable et gravier	Fondations, routes, tunnels	Réduction de la porosité, meilleure stabilité
Pâte de carbone	Fabrication d'anodes pour aluminium	Augmentation de la densité et de la résistance mécanique
Chaux et plâtre	Briques réfractaires, mortiers	Homogénéité accrue, durabilité améliorée

II.6.5 Étapes de mise en œuvre de la méthode vibratoire :**III.6.5.1 Préparation de l'échantillon**

- Sélectionner un matériau spécifique : Plâtre, chaux, béton, etc.
- Préparer l'échantillon dans un moule standardisé : Cela nécessite un moule rigide et adapté à la taille et à la forme souhaitée.
- Mesurer la masse initiale et les dimensions de l'échantillon : Utilisation d'une balance de précision et d'outils de mesure comme un pied à coulisse ou un micromètre.

III.6.5.2 Application des vibrations

- Placer le moule sous un vibrocompacteur : Le vibrocompacteur est un outil clé pour appliquer des vibrations contrôlées.
- Appliquer des vibrations avec une fréquence et une amplitude spécifiques : Le contrôle précis des paramètres de vibration est essentiel.
- Utiliser des capteurs pour enregistrer les données : Capteurs de pression, accéléromètres ou autres dispositifs pour surveiller les effets des vibrations.

III.6.5.3 Mesures post-vibration

- Retirer l'échantillon du moule après les vibrations : Une fois le processus terminé, l'échantillon doit être manipulé avec soin.
- Mesurer la masse finale, la densité et les dimensions : Comparaison avec les données initiales pour évaluer les changements induits par les vibrations.
- Comparer les résultats avec les données initiales : Analyse des variations de masse, densité et dimensions pour comprendre l'effet des vibrations.

Tableau II.3 : Tableau des mesures et calibrations.(Rebaïne, 2015)

Paramètre	Avant vibration	Après vibration	Unité
Masse	500 g	510 g	Grammes (g)
Densité	1,8 g/cm ³	2,1 g/cm ³	Grammes par cm ³
Hauteur de l'échantillon	10 cm	9,5 cm	Centimètres (cm)
Force appliquée		500 N	Newtons (N)

Tableau II.4: les paramètres critiques de la méthode vibratoire et leur impact sur les performances du matériau.(Rebaïne, 2015)

Paramètre	Plage typique	Impact sur le matériau
Fréquence (Hz)	20-100 Hz	Influence directe sur la compacité
Amplitude (mm)	0,5-5 mm	Contrôle la répartition des particules
Durée (secondes)	10-60 secondes	Détermine la profondeur de compactage

II.7 La Méthode par Chocs :

II.7.1 Définition :

La méthode par chocs, communément appelée compactage dynamique, est une technique géotechnique utilisée pour améliorer les propriétés des sols meubles, compressibles et particulièrement des sols granulaires, en appliquant une énergie importante via la chute contrôlée d'une masse lourde sur une surface donnée. Cette méthode est particulièrement utile

pour densifier les sols granulaires et cohésifs peu compressibles, réduisant ainsi les tassements différentiels et augmentant leur capacité portante. (Gambin, 1981)

L'origine de cette méthode remonte aux années 1970, avec des applications initiales dans des projets portuaires et industriels. Elle a été formalisée grâce aux travaux pionniers de chercheurs comme Gambin (1981), qui l'a utilisée pour stabiliser les sols meubles côtiers lors de la construction du nouveau port de pêche de Sfax en Tunisie.(Gambin, 1981)

Cette méthode appartient à la catégorie des techniques de traitement des sols, regroupées sous le domaine de la géotechnique. Elle est souvent standardisée selon des normes internationales, notamment celles de l'ASCE (American Society of Civil Engainer) et les normes :

- ASTM D6551 : Guide pour l'utilisation du compactage dynamique
- NF P94-063 : Essais pour le traitement des sols par compactage

II.7.2 Objectifs et Applications :

Le but principal de la méthode par chocs est d'améliorer les propriétés mécaniques des sols pour répondre aux exigences des projets de construction. Les objectifs spécifiques incluent :

- **Densification profonde des sols granulaires** : réduction des vides à grande profondeur.
- **Amélioration de l'homogénéité du sol** : atténuation des zones de faible densité.
- **Réduction des tassements post-construction** : stabilisation à long terme des plateformes.
- **Augmentation de la capacité portante** : adaptation aux infrastructures lourdes (réservoirs, quais, bâtiments industriels).
- **Traitement de grandes surfaces rapidement** : optimisation des délais de préparation du terrain.(Bergado, D.T., 1996)

II.7.3 Équipements et Outils Utilisés :

L'application de la méthode par chocs nécessite un équipement spécifique :

- **Moule de compactage standardisé** :
Un moule cylindrique en métal avec des dimensions spécifiques (généralement 100 ou 150 mm de diamètre) dans lequel on place le sol.



Figure II.5 : Moule cylindrique de proctor

- **Pilon ou masselotte :**
 - Une masse métallique (2,5 kg pour l'essai Proctor standard ou 4,5 kg pour le Proctor modifié) qui est lâchée d'une hauteur déterminée (30 ou 45 cm).

- **Dispositif de guidage :** Un tube ou une structure métallique qui permet de guider la chute de la masse verticalement et avec précision
- **Balance de précision :** Pour mesurer le poids de l'échantillon avant et après l'essai avec une grande précision.
- **Spatule ou lame de nivellation :** Pour lisser la surface de l'échantillon après chaque couche de compactage.
- **Boîte d'humidité (ou capsule d'aluminium) :** Pour conserver une partie de l'échantillon afin de mesurer la teneur en humidité.
- **Étuve de séchage (étuve à 105 °C) :** Pour sécher le sol et déterminer la teneur en eau après l'essai.
- **Réglette de mesure ou pied à coulisse ;** Pour mesurer les dimensions de l'échantillon à l'intérieur du moule.



Figure II.6: Masse de compactage (Pilon)



Figure II.7: Capsules en aluminium

Tableau II.5 : Équipements Utilisés et Leurs Fonctions.(Gambin, 1981)

Équipement	Fonction
Masse Lourde	Appliquer une onde de choc au sol
Grue	Positionner et relâcher la masse
Système de Mesure	Contrôler les paramètres de compactage

II.7.4 Matériaux compatibles avec la méthode chocs :

La méthode par chocs est principalement appliquée aux matériaux suivants :

- **Sols granulaires** : Sables, graviers, remblais rocheux.
- **Sols cohésifs peu compressibles** : Certains types de limons.
- **Matériaux artificiellement traités** :
 - **Chaux** : Utilisée pour stabiliser les sols argileux avant compactage.
 - **Plâtre** : Employé dans certains cas pour améliorer la résistance des sols.
(Bouassida,& Hazzar,2008)

Tableau II.6 : Types de sols et applications de la méthode par chocs.(RODRIGUEZ, R, 2015)

Type de Sol	Application Typique
Sables et Graviers	Construction de routes et fondations
Sols Cohésifs	Stabilisation pour bâtiments industriels
Sols Traité à la Chaux	Pré chargement pour plateformes

II.7.5 Étapes de Mise en Œuvre :

La mise en œuvre de la méthode par chocs suit plusieurs étapes clés :

II.7.5.1 Préparation du Site :

- Nettoyage de la surface pour éliminer les obstacles.
- Délimitation des zones à traiter. (Keller 2000)

II.7.5.2 Détermination des Paramètres :

- Calcul de la masse et de la hauteur de chute en fonction du type de sol et de la profondeur cible.
- Définition du nombre de chutes nécessaires pour atteindre la densification souhaitée.

II.7.5.3 Application des Chocs :

- Positionnement de la masse au-dessus de la zone cible.
- Réalisation des chutes successives à intervalles réguliers.

II.7.5.4 Contrôle Qualité :

- Mesure de la densité du sol après traitement.
- Vérification des tassements résiduels. (Bjølgerud,, Haug, 1983)

II.7.5.5 Clôture du Projet :

- Remblayage des zones traitées si nécessaire.
- Documentation des résultats obtenus.

Tableau II.7 : Étapes de mise en œuvre de la méthode par chocs.(Gambin, 1981)

Étape	Description
Préparation du Site	Nettoyage et délimitation des zones
Détermination des Paramètres	Calcul de la masse, hauteur et nombre de chutes
Application des Chocs	Chute contrôlée de la masse
Contrôle Qualité	Vérification de la densification
Clôture du Projet	Remblayage et documentation

II.8 La Méthode Statique de Compactage des Sols :**II.8.1 Définition :**

La méthode statique de compactage des sols est une technique utilisée pour améliorer les propriétés mécaniques des sols en appliquant une pression constante et prolongée sur leur surface. Cette méthode repose sur le principe que la densification du sol peut être obtenue sans vibrations, contrairement aux méthodes dynamiques qui utilisent des impacts répétés.

L'utilisation de la méthode statique remonte aux premières études géotechniques au début du 20ème siècle. Elle a été développée comme une alternative aux méthodes traditionnelles de compactage, notamment dans les zones où les vibrations peuvent causer des dommages aux structures environnantes.(Serratrice, 2018)

II.8.1.1 Domaines d'application :

- Amélioration des fondations des bâtiments et des infrastructures.
- Stabilisation des sols pour les routes et les pistes d'atterrissement.
- Réduction des risques de tassement différentiel dans les projets de génie civil.
- Traitement des sols meubles ou compressibles avant construction. (Serratrice, 2018)

II.8.1.2 Enregistrement et importance :

Selon les recherches expérimentales menées par Jean-François Serratrice (2018) , la méthode statique permet d'atteindre un niveau élevé de compacité (jusqu'à 95 % de la densité maximale Proctor) tout en minimisant les perturbations environnementales. Elle est particulièrement importante dans les zones sensibles où les vibrations sont indésirables. (Serratrice, 2018)

II.8.2 Objectif de la méthode statique :

L'objectif principal de la méthode statique est d'améliorer les propriétés physiques et mécaniques des sols :

- Augmenter la densité apparente sèche des sols.
- Réduire la porosité et l'indice des vides.
- Améliorer la résistance au cisaillement et la capacité portante.
- Réduire la compressibilité et la perméabilité des sols.

Cette méthode vise également à garantir une stabilité à long terme des infrastructures construites sur ces sols. (Serratrice, 2018)

II.8.3 Outils et équipements utilisés :

Pour réaliser le compactage statique, plusieurs outils et équipements spécifiques sont nécessaires :

II.8.3.1 Plaque vibrante statique :

- Une plaque métallique lourde utilisée pour exercer une pression uniforme sur le sol.
- Elle est souvent équipée d'un système hydraulique pour ajuster la charge appliquée. (Serratrice, 2018)

II.8.3.2 Rouleau statique :

- Un rouleau cylindrique utilisé pour compacter les sols en couches successives.
- Il est disponible en différents poids et dimensions selon le type de sol à traiter.

II.8.3.3 Densimètre nucléaire :

- Un appareil utilisé pour mesurer la densité sèche in situ après compactage.
- Il fournit des données précises sur la qualité du compactage réalisé.

II.8.3.4 Pilon statique :

- Un pilon manuel ou mécanisé utilisé pour appliquer une pression localisée sur des zones restreintes. (Serratrice, 2018)

II.8.4 Équipement utilisé dans la méthode statique en laboratoire :

Pour exécuter la méthode de compactage statique en laboratoire, plusieurs équipements spécifiques sont nécessaires, qu'il s'agisse de procédures automatisées ou manuelles. Voici une liste complète des équipements utilisés, ainsi que leur rôle dans chaque étape du processus. (Serratrice, 2018)

II.8.4.1 Équipements communs aux deux méthodes:

Ces équipements sont essentiels pour préparer et mesurer les échantillons de sol, quel que soit le mode de compactage choisi (automatique ou manuel). (Serratrice, 2018)

• Moule :

- Rôle : Contenir les échantillons de sol pendant le test de compactage. Il est standardisé pour garantir des résultats comparables.
- Utilisation : Utilisé dans les deux méthodes pour diviser le sol en couches successives.

- **Balance électronique de précision :**

- Rôle : Mesurer la masse des échantillons avant et après compactage avec une grande précision.

- Utilisation : Essentielle pour calculer la densité sèche et la teneur en eau.



Figure II.8: Balance électronique

- **Étuve de séchage :**

- Rôle : Sécher les échantillons de sol pour déterminer leur teneur en eau exacte.

- Utilisation : Utilisée après le test pour évaluer l'humidité résiduelle.



Figure II.9: Étuve de séchage

II.8.4.2 Équipements spécifiques à la méthode automatique :

Ces équipements sont utilisés exclusivement dans les méthodes automatisées pour garantir une application précise et contrôlée de la pression. (Serratrice, 2018)

- **Machine de compactage statique automatique :**

- Rôle : Appliquer une pression constante et homogène sur les échantillons de sol. Elle est programmable pour ajuster la force et la durée de la pression.

- Avantages : Grande précision, rapidité, et répétabilité des résultats.

- **Densimètre :**

- Rôle : Mesurer la densité apparente des échantillons après compactage.

- Utilisation : Fournit des données précises sur la qualité du compactage.

II.8.4.3 Équipements spécifiques à la méthode manuelle :

Ces outils simples sont utilisés dans les méthodes manuelles pour appliquer la pression et manipuler les échantillons.

- **Pilon manuel :**

- Rôle : Compacter manuellement les couches de sol dans le moule Proctor.

- Avantages : Coût faible et simplicité d'utilisation.

- **Marteau manuel :**

- Rôle : Appliquer une pression supplémentaire si nécessaire pour atteindre la densité souhaitée.
- Utilisation : Complémentaire au pilon manuel pour renforcer le compactage.

- **Truelle ou spatule :**

- Rôle : Répartir uniformément le sol dans le moule Proctor.
- Utilisation : Assure une distribution homogène des couches de sol.

- **Outil de mesure de volume :**

- Rôle : Calculer le volume de l'échantillon après compactage.
- Utilisation : Essentiel pour déterminer la densité sèche.

II.8.5 Matériaux compatibles avec la méthode statique :

- Sable : Très bien adapté grâce à sa granulométrie homogène.
- Terre argileuse : Peut être compactée sous réserve d'une humidité optimale.
- Gravier : Idéal pour les routes et les voies ferrées.

Tableau II.8 : paramètres des tests de compactage statique pour différents types de sols.(Costet et Sanglerat, 1981)

Matériau	Épaisseur de la couche (cm)	Pression minimale (kPa)	Densité sèche cible (%)
Sable	20	200	95
Terre argileuse	15	250	93
Gravier	30	180	96

II.8.6 Étapes d'application de la méthode statique :

L'exécution de la méthode de compactage statique (Compactage Statique) en laboratoire nécessite le suivi de démarches précises et méthodiques. Ces étapes peuvent être réalisées à l'aide d'équipements automatiques ou manuellement, selon les ressources disponibles et le niveau de précision requis. Voici une description détaillée des deux approches.(.(Costet et Sanglerat, 1981))

II.8.6.1 Premièrement utilisation d'équipements automatiques :**A. Préparation de l'échantillon**

- Un type spécifique de sol (sable, argile ou limon) est sélectionné, puis mélangé avec de l'eau pour obtenir une teneur en eau spécifique.

B. Placement de l'échantillon dans le moule

- Le sol est placé uniformément dans le moule Proctor en plusieurs couches (généralement 3 à 5 couches).

C. Application de la pression à l'aide d'un équipement automatique

- Une machine de compactage statique automatique est réglée pour appliquer une pression constante et homogène sur l'échantillon. La machine applique progressivement la pression selon des normes spécifiques.

D. Mesure de la densité sèche

- Après la fin du processus de compactage, la densité sèche de l'échantillon est mesurée à l'aide d'une balance électronique ou d'un densimètre.

II.8.6.2 Deuxièmement utilisation de méthodes manuelles :**A. Préparation de l'échantillon :**

- Le sol est mélangé manuellement avec de l'eau pour obtenir une teneur en eau spécifique. L'échantillon est pesé avec précision à l'aide d'une balance manuelle.

B. Placement de l'échantillon dans le moule

- Le sol est divisé en couches et placé uniformément dans le moule Proctor manuellement.

C. Application de la pression manuellement

- Un pilon manuel ou un outil de pression manuel est utilisé pour appliquer la pression sur l'échantillon. Le processus est répété pour chaque couche jusqu'à atteindre la densité souhaitée.

D. Mesure de la densité sèche

- Après la fin du processus de compactage, la densité sèche de l'échantillon est mesurée manuellement à l'aide d'une balance et d'autres outils de mesure.

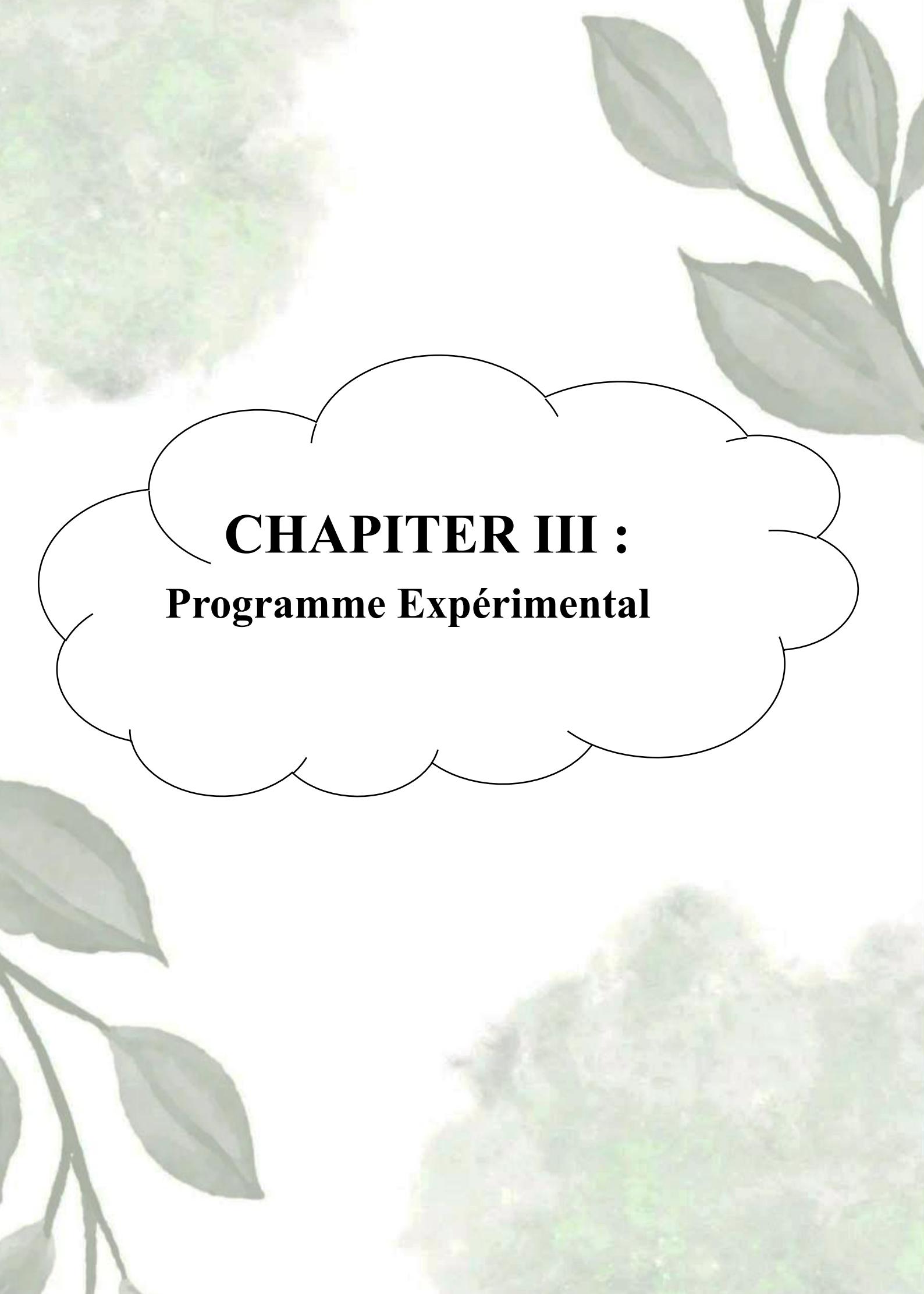
Tableau II.9 : Comparaison entre les deux méthodes.(Costet et Sanglerat, 1981)

Critère	Méthode Automatique	Méthode Manuelle**
Précision	Très élevée	Moyenne
Temps requis	Rapide	Plus lent
Coût	Élevé	Faible
Complexité	Nécessite une formation technique	Simple à exécuter

II.9 Conclusion :

En conclusion, ce chapitre a présenté une analyse méthodique des principales techniques expérimentales de compactage des sols, depuis les essais de référence Proctor jusqu'aux méthodes alternatives telles que le compactage vibratoire, par chocs et statique. Chaque approche a été examinée selon ses principes physiques et ses protocoles opératoires, permettant une compréhension approfondie du comportement des matériaux sous différentes énergies de compactage.

Ce cadre théorique constitue une base essentielle pour évaluer de manière comparative l'efficacité de ces méthodes et orienter leur choix en fonction de la nature du sol et des exigences des projets géotechniques.



CHAPITER III :

Programme Expérimental

III.1 Introduction

Ce chapitre est consacré à l'étude des propriétés d'identification de deux matériaux locaux : le sable de dune et l'argile. Le sable de dune a été prélevé dans la région de Sebseb et l'argile dans la région de Bouhraoua, toutes deux situées dans la wilaya de Ghardaïa.

L'objectif principal est d'analyser les caractéristiques physiques et chimiques de ces matériaux afin de les utiliser dans des mélanges. Ces mélanges ont pour but d'améliorer les performances mécaniques, notamment en termes de compactage et de stabilité.

Avant tout, des essais d'identification (granulométrie, limites d'Atterberg, teneur en carbonate de calcium, etc.) ont été réalisés pour mieux connaître le comportement individuel de chaque sol. Ensuite, des mélanges de sable de dune et d'argile ont été préparés avec différentes proportions(100% S+0)

Le compactage de ces mélanges a été effectué selon deux méthodes : la méthode Proctor modifiée et la méthode de vibration. L'objectif est de déterminer le mélange offrant la meilleure densité sèche et une bonne stabilité, en fonction de la méthode de compactage utilisée.

À travers cette étude, nous cherchons à identifier le dosage optimal entre le sable de dune et l'argile pour obtenir un matériau de remblai ou de fondation performant, adapté aux conditions locales.

III.2 Zone d'Étude :

Avant de procéder aux essais d'identification des matériaux choisis, il est important de situer la zone d'étude. Celle-ci se trouve dans la wilaya de Ghardaïa, une région issue du dernier découpage administratif défini par la loi n°19-12 du 12 novembre 2019. Ghardaïa est située dans le centre nord du Sahara algérien, à environ 600 km au sud d'Alger. Elle s'étend sur une superficie de 26 165,43 km² et compte une population de plus de 409 660 habitants. Administrativement, elle est divisée en 8 daïras et 10 communes (D.S.A, 2021).

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

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

La wilaya de Ghardaïa est délimitée par :

- Au nord : la wilaya de Laghouat (à 200 km)
- Au nord-est : la wilaya de Djelfa (à 300 km)
- À l'est : la wilaya d'Ouargla (à 200 km)
- Au sud : la wilaya de Méneïa (à 270 km)
- À l'ouest : la wilaya d'El Bayadh (à 350 km) (2023)

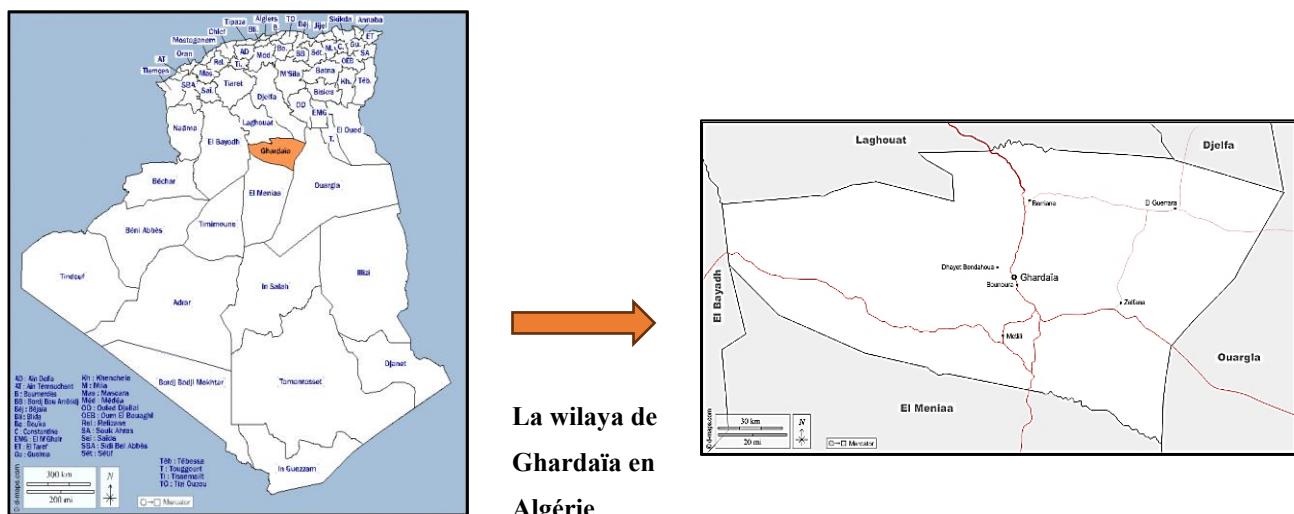


Figure III.1: Situation géographique de la wilaya de Ghardaïa (d-maps.eu 2025)

III.3 Localisation des Sites de Prélèvement des Matériaux:**II.3.1 Sable de dune :**

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

II.3.2 Argile :

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

Le point de prélèvement est localisé aux coordonnées GPS suivantes :

Latitude : N 32° 31' 43.1"

Longitude : E 003° 46' 21.0"

La zone présente deux faciès d'argile distincts :

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

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

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



Figure III. 2: Site d'extraction de l'argile



Figure III. 3: Site d'extraction de sable



Figure III. 4: Massifs du site Bouhraoua.



Figure III. 5 :Sable de dune de

III.4 Programme des essais :

Le site a subi des travaux de terrassement pour une éventuelle reconstitution de sol cette opération de terrassement nous a permis de faire un prélèvement

Sur place, les échantillons ont été prélevés à une profondeur entre 30cm et 50cm.

- Analyse granulométriques par sédimentation
- Les limites d'Atterberg (limite de liquidité et de plasticité, indice de plasticité) pour caractériser la consistance du sol et permettre de ce fait de le classer
- Essais à la tache au bleu de méthylène

Le tableau suivant présente la nature des essais effectués.

Tableau III. 1 :Programmes des Essais pour l'Identification des Matériaux Utilisés (AZZOUZ 2016)

Type de sol	Essais réalisés
Argile	- Analyse chimique - Analyse granulométrique - Limites d'Atterberg - Teneur en CaCO ₃ - Essai au bleu de méthylène
Sable de dune	- Analyse chimique - Analyse granulométrique - Essai d'équivalent de sable

III.5 Essais d'identification :

Les essais d'identification, dans le domaine du génie civil, constituent un outil essentiel pour déterminer les caractéristiques physiques, mécaniques et chimiques des matériaux de construction ainsi que du sol. L'objectif de ces expériences est d'analyser toutes les propriétés des échantillons disponibles afin de les classer selon les critères adaptés, avant de procéder au mélange de l'argile avec le sable.

Il convient de noter que les matériaux ont été extraits manuellement d'un site spécifique et ont subi une étape préliminaire de préparation pour les rendre adaptés à l'étude en laboratoire.

Ces essais jouent un rôle crucial dans l'assurance de la qualité et de la sécurité des projets de construction, car ils permettent d'optimiser l'utilisation durable des ressources naturelles et d'offrir une protection efficace contre les risques potentiels. (Costet, & Sanglerat, 1981)

III.5.1 Les essais sur sable de dune :**III.5.1.1 Analyse chimique :**

Une analyse physico-chimique est effectuée sur les échantillons prélevés soit les sables des dunes et les argiles, ont été appliquées au niveau de laboratoire de travaux publiques de sud (LTPS). Les résultats sont illustrés dans le Table III- 02.

Tableau III.2: Les résultats de l'analyse chimique de sable de dune

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

Au vu les résultats de tableau au-dessus, l'analyse chimique des échantillons de sable de dune des dunes prélevée de la région de Sebseb révèlent que le taux de résidu insoluble de nos échantillons est de 88.91%, alors que pour les meneaux soit Sulfates et les Carbonate de Calcium un taux important de 3.09% et 03% respectivement. Cependant un taux très faible de Chlorures avec un pourcentage de 0.023%. Il est signalé que la présence d'un fort pourcentage en silice qui est supérieur à 80% confirme que le sable de dune de Ghardaïa est un sable siliceux.

III.5.1.2 Analyse granulométrique (NF P94 – 056):

L'analyse granulométrique est une méthode fondamentale permettant de déterminer la répartition des dimensions des particules constituant un matériau granulaire tel qu'un sol, un sable ou un gravier. Elle joue un rôle essentiel dans la compréhension des propriétés physiques et mécaniques du sol, telles que :

- la perméabilité,
- la porosité,
- la résistance à la compression,
- et la capacité de rétention d'eau.

Cette caractérisation est particulièrement utile dans plusieurs domaines d'ingénierie, notamment le **génie civil, l'agriculture, la géologie et l'industrie minière**.

III.5.1.2.1 Méthodes d'analyse granulométrique :

Deux méthodes complémentaires sont utilisées selon la granulométrie des particules :

- **Tamisage à humide après lavage** (norme NF P94-056) :

Adaptée aux particules grossières ($> 80 \mu\text{m}$), cette méthode permet de séparer les grains par classes de dimensions à l'aide de tamis de mailles calibrées.

- **Sédimentation** (norme NF P94-057) :

Employée pour les particules fines ($\leq 80 \mu\text{m}$), cette technique repose sur le principe de décantation dans une solution dispersante. Elle permet d'évaluer la finesse des particules, un critère important pour juger de la qualité d'un matériau destiné à certaines applications.

La combinaison de ces deux méthodes permet une caractérisation granulométrique complète, garantissant une meilleure adéquation entre les propriétés du sol et les exigences du projet.

III.5.1.2.2 Matériel nécessaire :

- Tamis de différentes ouvertures (normés)
- Pipette ou hydromètre
- Solution dispersante (NaOH ou $\text{Na}_4\text{P}_2\text{O}_7$)
- Balance de précision
- Cylindre de sédimentation



Figure III.6: Appareillage d'analyse granulométrique (Ghazal a 2023)

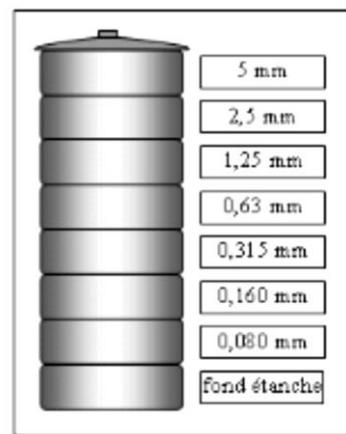


Figure III. 7: Tamis pour analyse granulométrique (Ghazal a 2023)

III.5.1.2.3 Étapes de l'analyse :

- Séchage et pesée de l'échantillon.
- Séparation des particules $> 80 \mu\text{m}$ par tamisage.
- Préparation d'une suspension avec la solution dispersante pour les particules $\leq 80 \mu\text{m}$.
- Mesure de la décantation à l'aide d'un hydromètre ou par la méthode de la pipette.
- Construction de la courbe granulométrique à partir des résultats obtenus.

Les résultats sont représentés graphiquement sous forme de courbes granulométriques (Figure III.8), à partir desquelles divers paramètres caractéristiques (comme le diamètre effectif D_{10} , le coefficient d'uniformité C_u , etc.) peuvent être extraits pour la classification du sol.

Les résultats sont présentés graphiquement sur des courbes dites « courbes granulométriques », de ces courbes nous pouvons tirer certains paramètres et par la suite classer le sol. (Figure III.8)

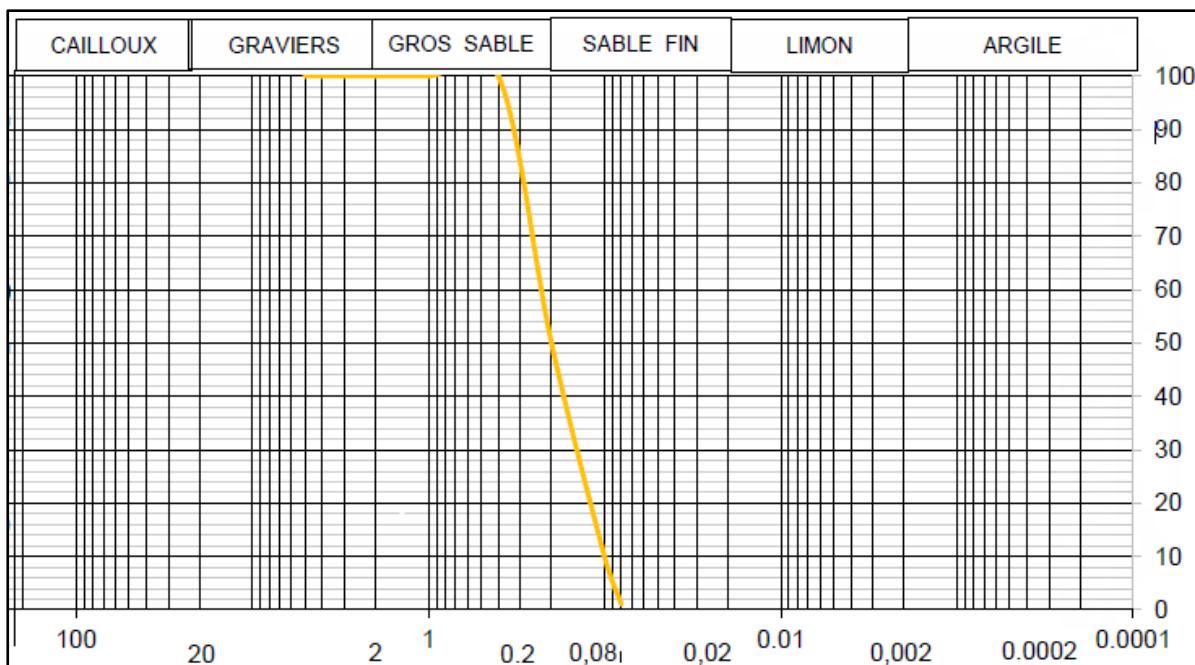


Figure III.8 : courbe granulométrie de sable de dune (AZZOUZ 2016)

Tableau III.3 : Résultats récapitulatif de l'analyse granulométrique du sable de dune.
(AZZOUZ 2016)

Sable de dune	
Gros Sable %	54.66
Sable fin %	45.34
D10(μ)	0.21
D30(μ)	0.25
D60(μ)	0.3
Cu = D60/D10	1.43
Cc = (D30) ² / D10D60	0.089

III.5.1.3 Equivalent de sable : (NFP EN 933-8)

Essai d'équivalence de sable est spécifique aux sols grenue, il nous permet de mettre en évidence la proposition relatif de poussière fin nuisible argileux dans les sols ou les agrégats fins : il est effectuée sur des éléments de diamètre 5 mm

Son importance est capital car la présence des éléments fins peut modifiée le comportement rhéologique du matériau. Et pour pouvoir interpréter correctement le résultat et les indispensables de répète l'essai au moins deux fois.

III.5.1.4.1 But de l'essai :

Cet essai qui s'effectue sur la fraction de sol ou de granulat passant, au tamis à mailles carrés de 5 mm, est réalisé pour déterminer le degré de pollution d'un sol ou d'un sable.

L'essai d'équivalent de sable permet de mesurer la propreté d'un sable donné

III.5.1.4.2 Appareillage :

- Tamis de 5 mm d'ouverture de maille avec fond de tamis.
- Spatule et cuillère.
- Balance permettant de faire les pesées avec une précision de 0.1
- Chronomètre donnant la seconde.
- Règle de 500 mm graduée en mm.
- Goupillon pour le nettoyage des éprouvettes.
- Bac pour tamisage.
- Piston.
- Entonnoir.
- Tube laveur.
- 5 litres de solution lavant.



Figure III.10: L'agitateur électrique



Figure III.9: Outils d'expérimentation

III.5.1.4.3 Mode opératoire :

- Tamiser le sable dans le tamis 5mm et déterminer sa teneur en eau
- Prendre une prise d'essai Mh : $Mh = 120 \times (1 + \frac{W}{100})$
- Verser la solution lavante dans l'éprouvette jusqu'à 10 cm.
- Verser le sable dans l'éprouvette et taper au fond pour éliminer les vides.
- Laisser imbiber pendant 10 min puis agiter dans l'agitateur électrique.
- Laver les bords de l'éprouvette puis commencer à laver le sable par le tube jusqu'à ce que la solution atteigne 38 cm.
- Laisser sédimenter pendant 20 min.
- Mesurer les hauteurs :
 - h1 la hauteur de saleté + sable propre.
 - h2 la hauteur du sable propre mesurée par le piston.
 - H la hauteur du sable propre mesurée par la réglé (hauteur visuelle).



Figure III.11 : Étapes du travail sur l'expérience en laboratoire

Tableau III.4 : Résultats de l'équivalent des sables

Sable	N° d'essai	h1	h2	EV(%)	EV(%) (moyen)
Sable de dune	1	104	92	88.5	87.1
	2	105	90	85.7	

III.5.1.4 Essai au bleu de méthylène (NFP 94-068)

La même procédure utilisée pour l'argile a été appliquée au sable de dune et d'après le tableau récapitulatif des résultats d'identification par (AZZOUZ 2017) nous avons :

A l'Essaa fin de l'expérience, nous avons obtenu le résultat suivant :

Tableau III.5:Résultats de Essai au bleu de méthylène (AZZOUZ 2017)

Paramètre	Sable de dune
Valeur de bleu « Vb »	0.84

III.5.1.5 Caractérisation de sable de dune utilisée :**Tableau III.6: Recapitaf des essais identificationsdu sable de dune(AZZOUZ 2016)**

Essais	Sable de dune	
Granulométrie	Cu	1.43
	Cc	0.089
	LCPC	SB
Bleu de méthylène	Vb	0.84
	Classification	Elément non argileux
Equivalent de sable	ES (%)	87.1
	Degré de propreté	Propre
Poids volumique solide	γ_s (g/cm ³)	1.55

III.5.2 Les essais sur l'argile de Bouhraoua :**III.5.2.1 Analyse chimique :**

Les résultats de l'analyse chimique de l'argile étudié est résumé dans le tableau suivant :

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

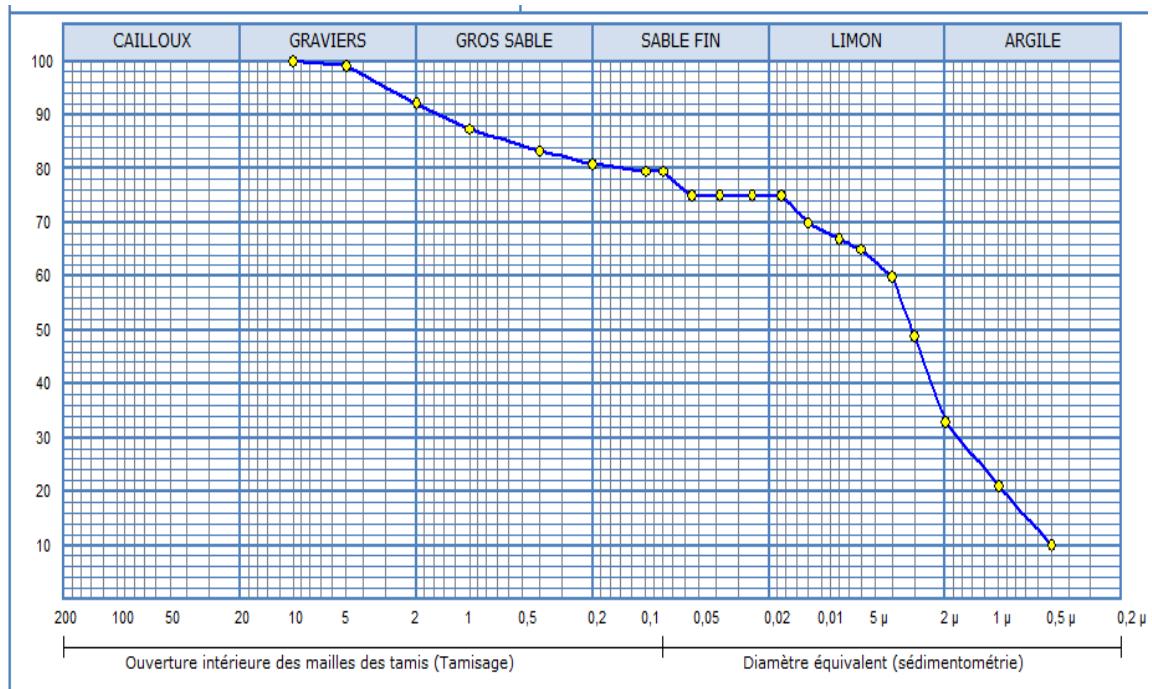
Tableau III.7: Analyse chimique de l' argile étudiée (AZZOUZ 2016)

	Symboles	Unité	Bouhraoua
Résidu insoluble	SiO ₂ +Silice	%	30,494
Sulfates	SO ₃ 2-	%	5,28
Chlorates	Cl -	%	----
Carbonate de Calcium	CaCO ₃	%	09
Matières organiques	MO	%	----

III.5.2.2 Analyse granulométrique (NF P94 – 056):

Elle se fait par tamisage par voie sèche après lavage pour les sols dont les éléments sont supérieurs à 80µm (NF P94 – 056) et par sédimentation pour les éléments inférieurs ou égaux. À 80µm (NF P94 – 057) qui exprime la finesse et oriente en grande partie le choix du matériau de traitement.

Les résultats sont présentés graphiquement sur des courbes dites « courbes granulométriques », de ces courbes nous pouvons tirer certains paramètres et par la suite classer le sol. (Voir la Graphe III.12) :



Graphe III.12 : Courbe granulométrique de l'argile de Bouhraoua.

La distribution granulométrique pour l'argile obtenue nous montre que : pour Bouhraoua

- 1) Une présence de particule gravier est de (8%),
- 2) La articule sableuse (gros et fin) est de (17%),
- 3) Le pourcentage de particules limoneuses est de (42%)
- 4) Le pourcentage de particule argileuse est de (33%)

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

Également, nous obtenons des résultats identiques à ceux que vous avez découverts dans l'étude d'Azzouz en 2016.

III.5.2.3 Limites d'Atterberg (NF P 94-051):

Les essais permettant la détermination des limites d'Atterberg ont été réalisé conformément à la norme **NF P 94-051**.

III.5.2.3.1 Limite de liquidité WL :

Est calculée à partir de l'équation de la droite moyenne ajustée sur les couples de valeurs expérimentales (N, W).WL : est obtenue pour une valeur N égale à 25 coups exprimée en pourcentage (%).

WL : est obtenue pour une valeur N égale à 25 coups exprimée en pourcentage (%).

$$WL = \omega \left(\frac{N}{25} \right)^{0.121}$$

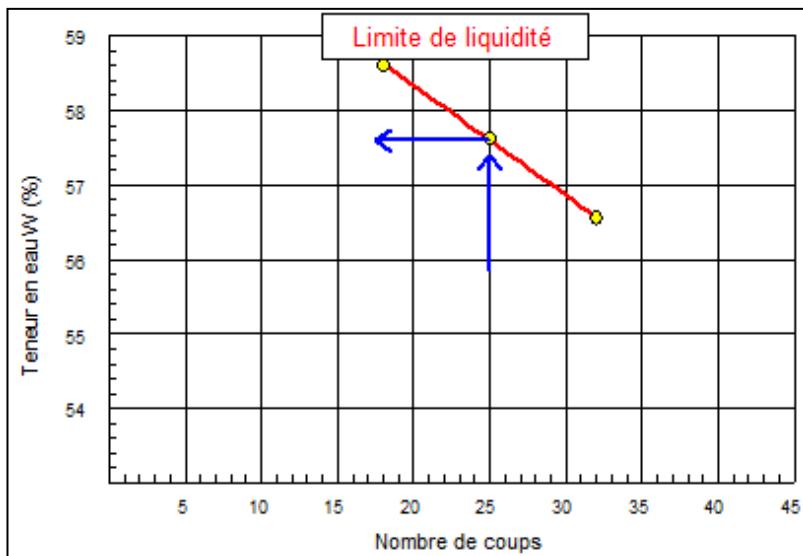


Figure III.13: Graphe Limite de liquidité(Azzouz 2016)



Figure III. 14 : Travail sur l'expérience avec l'équipe du laboratoire

III.5.2.3.2 La limite de plasticité WP :

Est la moyenne arithmétique des teneurs en eau obtenus à partir de ces essais exprimés en pourcentage (%)

III.5.2.3.3 L'indice de plasticité IP :

C'est la différence entre les valeurs de WL et WP il est déterminé les résultats sont récapitulés dans le tableau suivant :

Tableau III.8: les valeurs de l'essai limite Atterberg

Argile	Limite de liquidité (WL)	Limite de plasticité (WP)	Indice de plasticité (IP)
Bouhraoua	54.07%	31.79%	22.28%

Pour les sols fins, il est d'usage de reporter les valeurs de « IP » et « WL » sur un diagramme ayant « IP » en ordonnée et « WL » en abscisse. Ce diagramme est appelé « diagramme de Casagrande»

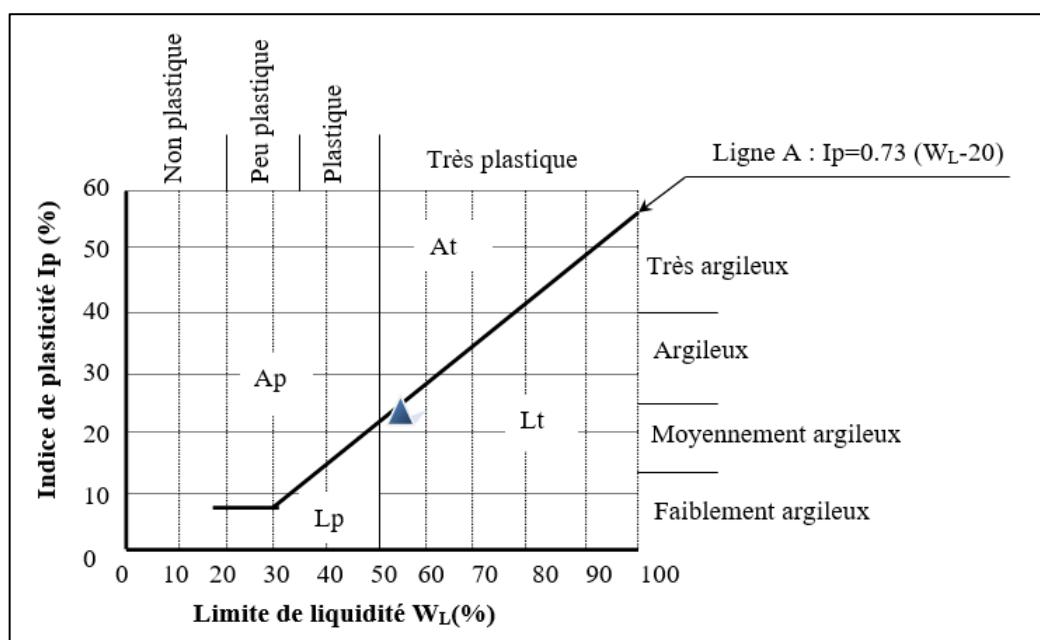


Figure III. 15 : Graphe de Classification d'argile étudiée selon l'abaque de Casagrande

Avec : At : argiles très plastiques. Lt : limons très plastiques

Ap : argiles peu plastiques. Lp : limons peu plastiques.

III.5.2.4 Essai au bleu de méthylène :

Le bleu de méthylène est une molécule organique utilisée dans divers domaines, notamment comme indicateur coloré pour des réactions redox. En génie civil, il joue un rôle essentiel dans la caractérisation des matériaux contenant de l'argile. La valeur de bleu de méthylène d'un sol (VBS) est une grandeur qui reflète globalement la quantité et l'activité de l'argile présente dans un matériau étudié.

III.5.2.4.1 Principe de l'Essai :

L'essai consiste à mesurer, par dosage, la quantité de bleu de méthylène pouvant être adsorbée par le matériau lorsqu'il est mis en suspension dans l'eau. Cette adsorption est directement liée à la surface spécifique des particules constituant le sol ou le matériau. Plus la surface spécifique est élevée, plus la capacité d'adsorption du matériau est importante, ce qui traduit généralement une forte teneur en argile ou en particules fines.

III.5.2.4.2 But de l'Essai :

L'objectif principal de cet essai est d'évaluer les propriétés suivantes :

Capacité d'adsorption du sol : Mesurer la capacité du matériau à retenir des molécules sur sa surface, ce qui est un indicateur clé de sa composition minéralogique.

Détermination de l'argil site : Identifier et quantifier la proportion d'argile présente dans un sable, un granulat ou tout autre type de sol.



Photo III. 16 : Étapes de travail sur l'expérience avec l'équipe du laboratoire

Caractérisation générale des matériaux : Fournir des informations cruciales sur la nature et le comportement des sols, notamment leur plasticité, leur gonflement ou leur aptitude à être utilisé dans des applications spécifiques (remblais, fondations, etc.).

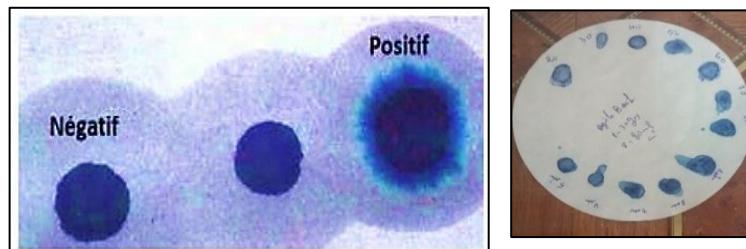


Photo III.17 : Le cas positif et négatif de l'essai de bleu de méthylène

On appelle valeur de bleu de méthylène VB, la quantité exprimée en gramme de bleu de méthylène absorbée par 100 g de fines. De cet essai, nous pouvons tirer :

- VB (valeur du bleu) = V / f
- V : étant le volume final de solution injectée en cm^3
- f : poids sec des fines en grammes de la prise d'essai pour les quantités de sol.

Les résultats obtenus sont repris dans le tableau :

Tableau III.9 : Résultats de l'essai au bleu à la tâche.

Paramètre	Bouhraoua
Valeur de bleu « Vb »	2.75

Les sols ont été classés selon le tableau suivant :

Tableau III.10 : Représente la valeur de bleu de méthylène de quelques sols (Hang1984)

Catégorie de sol	Valeur de bleu de méthylène (VB) (ml/kg)
sol insensible à l'eau	VB < 0.1
sol sablo limoneux, sensible à l'eau	0.2 ≤ VB < 1.5
sol sablo argileux, peu plastiques	1.5 ≤ VB < 2.5
sol limoneux de plasticité moyenne	2.5 ≤ VB < 6
sol argileux.	6 ≤ VB < 8
sol très argileux.	VB > 8

III.5.2.5 Teneur en carbonate de calcium de l'argile étudie :

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

$$CaCO_3(\%) = \frac{\text{volume du } CO_2 \text{ dégagé par 0,5g d'échantillon}}{\text{volume du } CO_2 \text{ dégagé par 0,5g de CaCO}_3 \text{ pur}}$$

Tableau III.11:La classification par CaCO3 de quelques sols (Azzouz en 2016).

CaCO3(%)	Dénomination
0-10	Argile ou limon.
10-30	Argile calcaire.
30-70	Marne.
70-90	Calcaire argileuse.
90-100	Calcaire.

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

III.5.2.6 Caractérisation de l'argile utilisée :**Tableau III.12 : Caractérisation d'argile utilisée**

Parameter des argiles	Argile de Bouhraoua
WL	54.05%
WP	31.79%
Ip	22.28%
AC	--
Vb	2.75
Teneur en carbonate de calcium	09

III.6 Classification des sols :**III.6.1 La classification :**

Pour résoudre les problèmes de mécanique des sols, il est important de caractériser un sol mais aussi de les classer, c'est à dire de les mettre dans un groupe ayant des comportements similaires .

Il existe de nombreuse classification. En général, le simple Identification visuel Permet de donner un nom au matériau : marne bleu, argile jaune, sable fin, ...

Les renseignements nous permettons d'identifier les sols et par conséquent de se faire une idée sur Leurs comportements.

La classification du sol permet également d'estimer comment un type particulier de terre réagira à différentes forces telles que celles exercées par un bâtiment ou une structure routière. Cette information peut aider à prédire comment va se comporter le terrain dans certaines situations afin notamment d'éviter tout dommage potentiel aux personnes et aux biens. Alors Il existe plusieurs systèmes de classification des sols. (Coduto, D. P.& Kitch, W. A. (2016))

III.6.2 Nombreuses classifications dans différents pays :

- ❖ Classification L.C.P.C (Laboratoire Central des Ponts et Chaussées) identique à la classification U.S.C.S⁴
- ❖ Classification U.S.C.S (Unified Soil Classification System) établie par Casagrande⁵
- ❖ Classification A.A.S.H.O (American Association State Highways Officials)⁶
- ❖ Classification G.T.R (Guide des terrassements routier).

III.6.3 La classification L.C.P.C (Laboratoire Centrale des Ponts et Chaussées) :

Classer un sol consiste à l'identifier grâce à des mesures quantitatives et à lui donner un nom afin

de le rattacher à un groupe de sols de caractéristiques semblables. Classification LPC Sol à partir des résultats fournis par

- La granulométrie
- Les caractéristiques de plasticité de la fraction fine (Atterberg)

Les sols sont désignés par le nom de la portion granulométrique prédominante qualifiée par un adjectif relatif aux portions secondaires. (Serratrice. J.F, Soyez. B, 1996)

On distingue trois grands types de sols :

- Les sols grenus : plus de 50 % des éléments en poids > 80 µm,
- les sols fins : plus de 50 % des éléments en poids < 80 µm,
- Les sols organiques dont la teneur en matière organique est > à 10 %.

Sols grenus La classification des sols grenus se fait par la granulométrie et les limites d'Atterberg.

Sols fins La classification des sols fins utilise les critères de plasticité liés aux limites d'Atterberg. Elle est précisée dans le chapitre 3

Selon la position dans le diagramme du point représentatif ayant pour abscisse la limite de liquidité et pour ordonnée l'indice de plasticité, on définit quatre grandes catégories principales :

- les limons très plastiques
- les limons peu plastiques
- les argiles très plastiques
- les argiles peu plastiques

Figure III.18 : Classification des sols grenus en laboratoire (plus 50% d'éléments >0.08mm) (AFNOR,NF P94-050)

Définitions		Symboles	Conditions	Désignation géotechnique
GRAVES	plus de 50 % des éléments > 0,08 mm ont un diamètre > 2 mm	Gb	$C_L = \frac{D_{50}}{D_{10}} > 4$ (*) et $C_F = \frac{(D_{50})^2}{D_{10} \times D_{60}}$ compris entre 1 et 3	grave propre bien graduée
	moins de 5 % d'éléments < 0,08 mm	Gm	Une des conditions de Gb non satisfaite	grave propre mal graduée
	plus de 12 % d'éléments < 0,08 mm	GL	Limite d'Atterberg au-dessous de la ligne A (fig. 2)	grave limoneuse
	plus de 5 % d'éléments < 0,08 mm	GA	Limite d'Atterberg au-dessus de la ligne A	grave argileuse
SABLES	plus de 50 % des éléments > 0,08 mm ont un diamètre < 2 mm	Sb	$C_L = \frac{D_{50}}{D_{10}} > 6$ et $C_F = \frac{(D_{50})^2}{D_{10} \times D_{60}}$ compris entre 1 et 3	sable propre bien gradué
	moins de 5 % d'éléments < 0,08 mm	Sm	Une des conditions de Sb non satisfaite	sable propre mal gradué
	plus de 12 % d'éléments < 0,08 mm	SL	Limite d'Atterberg au-dessous de la ligne A	sable limoneux
	plus de 5 % d'éléments < 0,08 mm	SA	Limite d'Atterberg au-dessus de la ligne A	sable argileux

Lorsque 5 % < % inférieur à 0,08 mm < 12 % → on utilise un double symbole.

III.6.4 La Classification U.S.C.S (Unified Soil Classification System) :

La Classification U.S.C.S (Unified Soil Classification System) est un système utilisé pour classer les sols en fonction de leurs propriétés physiques et mécaniques. Ce système a été développé par le United States Bureau of Reclamation et est largement utilisé dans l'industrie du génie civil.

Le système de classification U.S.C.S divise les sols en deux catégories principales : les sols grossiers et les sols fins. Les sols grossiers sont ceux dont plus de la moitié des particules ont une taille supérieure à 0,075 mm tandis que les sols fins sont ceux dont plus de la moitié des particules ont une taille inférieure à 0,075 mm

En outre, chaque catégorie principale est ensuite subdivisée en fonction d'autres caractéristiques telles que la plasticité, l'humidité ou encore leur comportement face aux vibrations. (Das, B. M. 2017)

Cette classification permet ainsi aux ingénieurs civils d'estimer rapidement certaines propriétés importantes des différents types de sol, ce qui peut être utile pour déterminer le type approprié pour différentes applications. Par exemple, elle permettra notamment d'évaluer si un type particulier de matériau conviendra mieux pour constituer le support d'une route ou celui d'un bâtiment.

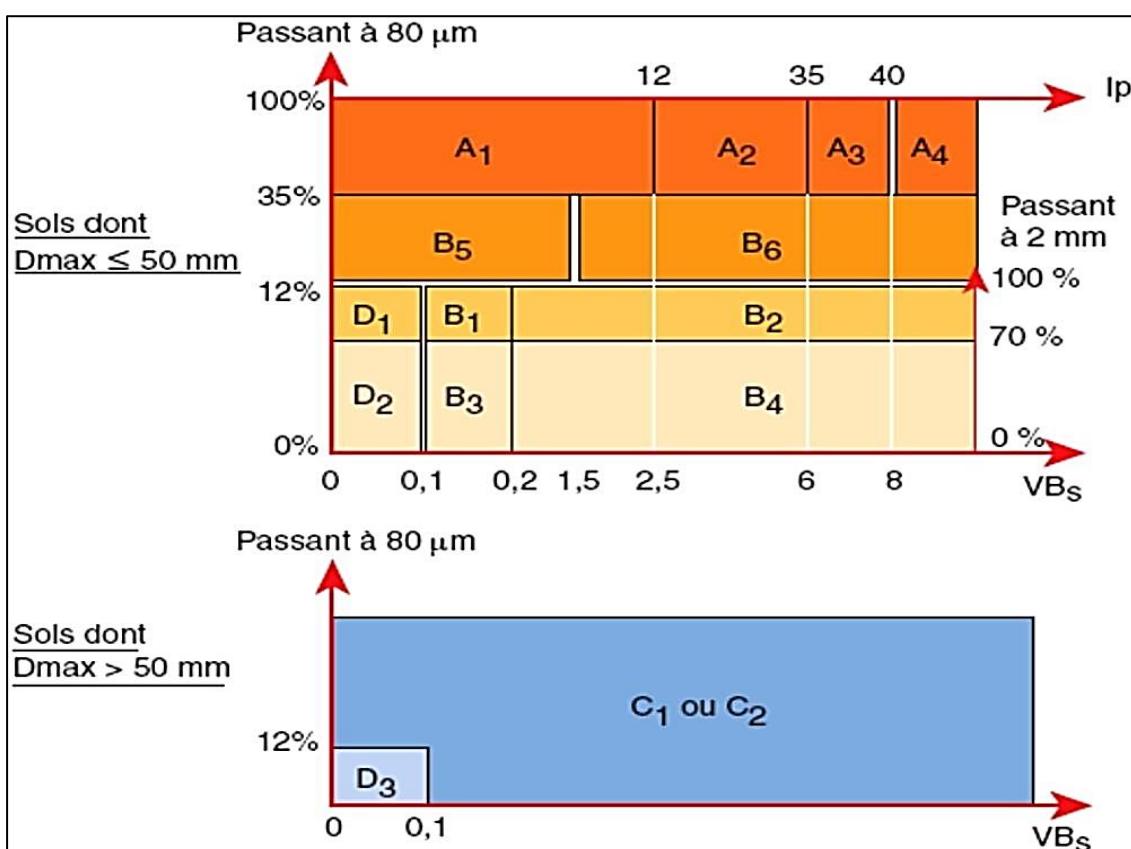
Tableau I.

Figure III.19:Classification des sols (selon U.S.C.S)

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

III.6.5 Classification des sols selon la nomenclature GTR (Guide des Terrassements Routiers) (norme NF P 11 300) :

L'utilisation des terres en remblai est d'abord directement liée à leur classification et à leur comportement lors de leur mise en place. Le **GTR 92** (Guide des Terrassements Routiers, Réalisation des remblais et des couches de forme, **LCPC, SETRA, 1992**) et la norme qui en découle **NF-P 11-300** (septembre 1992) proposent une classification des matériaux utilisables dans la construction des remblais et des couches de forme d'infrastructures routières. Le premier critère d'identification des sols est la granulométrie. En effet, pour des raisons techniques telles que le malaxage, un seuil à 50 mm a été établi. Il permet de distinguer : les sols constitués de particules de diamètre inférieur ou égal à 50 mm ; il s'agit des sols de type A, B, D. Ces sols correspondent aux sols fins ; les sols constitués de particules de diamètre supérieur à 50 mm qui correspondent aux sols C, D. (**Ghazal 2023**)



Fugire III.20: Classification GTR (SETRA-LCPC 1980)

Tableau III.13:Classification GTR (SETRA-LCPC 1980).

Classe	Définition
A	Sols fins (limons, argile, ...)
B	Sols sableux ou graveleux avec fines (sables et graves argileuses,...)
C	Sols comportant des fines et des gros éléments (alluvions, grossières,...)
D	Sols insensibles à l'eau avec fines (sables et graves propres,...)

La classification des sols fins est basée sur la teneur en argile et la granulométrie du sol :

- ✓ VBS : Capacité d'adsorption par le bleu de méthylène ;
- ✓ IP : Indice de plasticité par la méthode des limites d'Atterberg ;

Passant à 80 µm et à 2 mm : pourcentage de particules fines passant aux tamis de 80 µm

III.6.6 Classification du sol études de Ghardaïa selon classification GTR (cas des sols fins) :

Selon la Classification GTR (NF P 11-300)(cas des sols fins),on peut classer le argile comme suit :

Tableau III.14 : Résultats des Analyses des Propriétés Physiques et Mécaniques

Argile Bouhraoua	sable de dune
$D_{max} < 50\text{mm}$	$D_{max} = 0.2\text{mm} < 50 \text{ mm}$
Passant à 80µm =45 % > 35%	Passant à 80µm = 17% < 35%
$I_p = 22.28 \% > 12\%$	-
$VB = 2.75 < 6$	$VB = 0.84 < 1.5$

Sur la base des résultats géotechniques, l'argile est classée en A2 en tant que « sol fin », tandis que le sable de dune est classé en B5 en tant que « sables et graves argileuses » (voir la figure III.29).

● : Sable de dune ... B5 (sables et graves argileuses)

○ : Argile...A2 (sol fin)

Passant à 80 μm

Sols : D_{max} < 50 mm

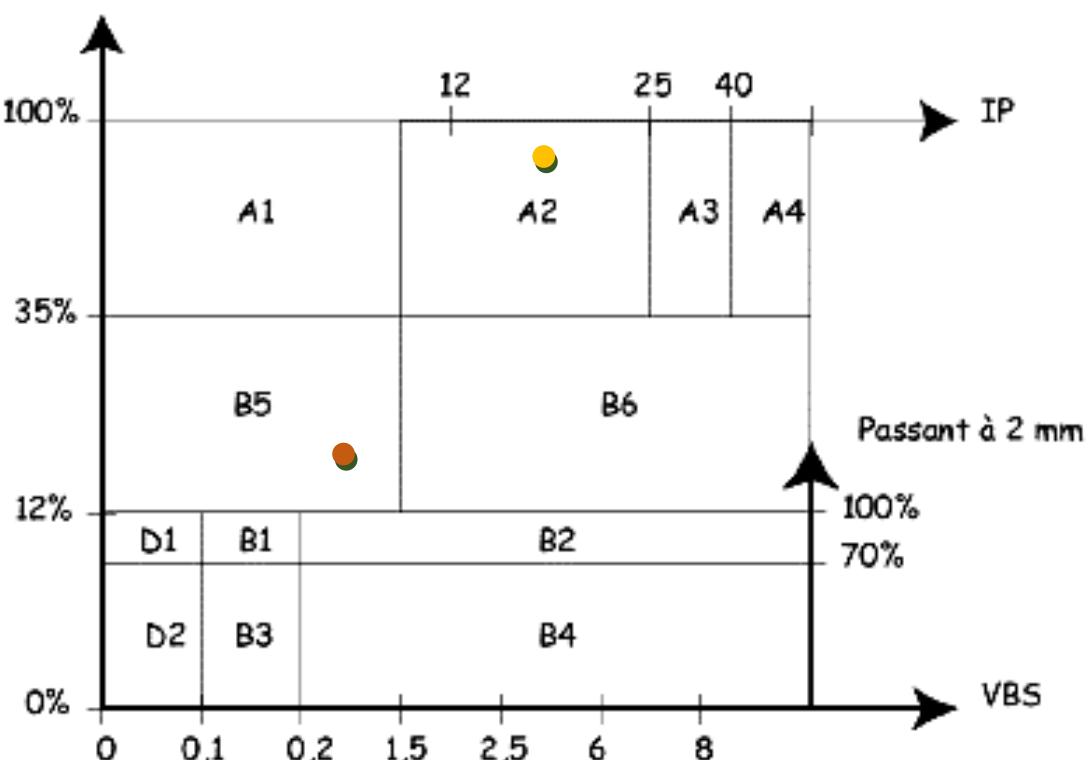


Figure III.21: Graphe Classification des sols fins selon GTR pour l'argile De bouhraoua et sable de dune sebseb

Récapitulatif des essais d'identification :

Tableau III.15: Caractéristique du sable de dune et de l'argile bouharoua

	Matériaux		Spécifications		Remarques
	Argile bouharoua	Sable de dune Sebseb	TRS	GTR	
Analyse granulométrique					
D max (mm)			-	< 50	OK
% < 2 mm			-		NO
% < 80 µm			< 30	< 35	
Cu		1.43	-		
Cc		0.089	-		
Les limites d'Atterberg					
WI (%)	54.07		-		-
Wp (%)	31.79		-		-
IP (%)	22.28		< 13	< 12	NO
Equivalent de sable Es (%)		86.7	-		-
Valeur de bleu VB	2.75	0.84	-	< 15	NO
Analyse Chimique					
Insolubles (%)	30.494	88.91	-	-	
CaCO3(%)	09	3			NO

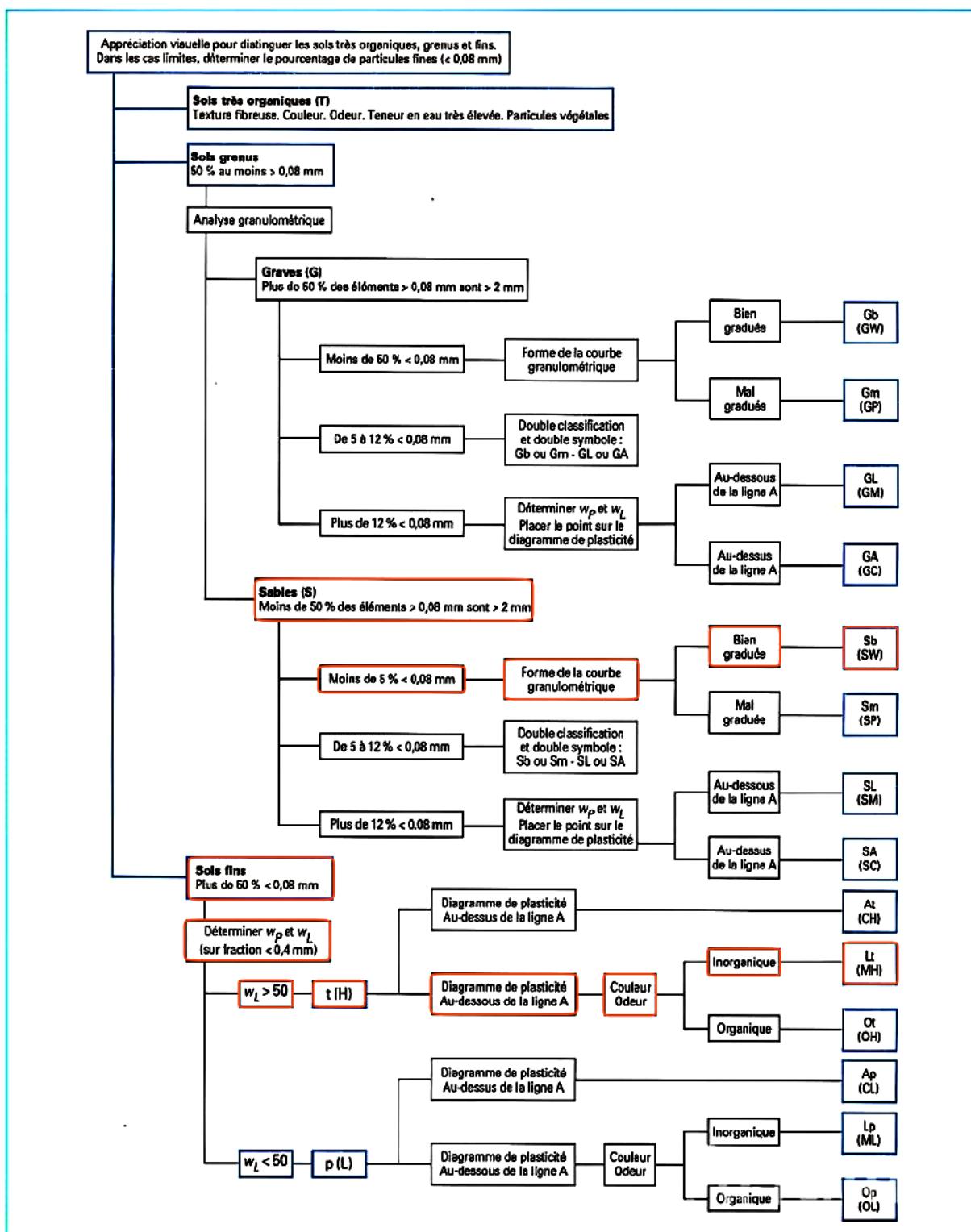


Figure III.22 : Classification LPC-USCS (Magnan, J.-P. 2015)

III.7 Préparation des échantillons :

Pour préparer les échantillons nécessaires à la réalisation des essais Proctor et de la table à secousses, on suit les étapes suivantes :

Tout d'abord, l'argile est broyée dans une machine de concassage de laboratoire, puis placée dans la machine Los Angeles afin d'obtenir une poudre fine facile à tamiser. Ensuite, le matériau broyé est passé au tamis de 2 mm pour éliminer les particules grossières et obtenir un matériau adapté au mélange avec le sable.



Figure III.23 : Tamis de 2 mm pour éliminer les gros grains



Figure III.24: la machine Los Angeles (NF P18-573)



Figure III.25: Concasseur de laboratoire à mâchoire.

Après cela, pour chaque mélange, on prépare une masse totale de 5500 g , selon les proportions suivantes du sable de dune et de l'argile :

- 100 % sable – 0 % argile : 5500 g de sable + 0 g d'argile
- 90 % sable – 10 % argile : 4950 g de sable + 550 g d'argile
- 70 % sable – 30 % argile : 3850 g de sable + 1650 g d'argile
- 50 % sable – 50 % argile : 2750 g de sable + 2750 g d'argile
- 30 % sable – 70 % argile : 1650 g de sable + 3850 g d'argile
- 10 % sable – 90 % argile : 550 g de sable + 4950 g d'argile
- 0 % sable – 100 % argile : 0 g de sable + 5500 g d'argile



Figure III.26:Pesée précise du sable de dune et de



Figure III.27: Mélange manuel des constituants (Sable de dune + Argile)

Une fois les quantités mesurées avec précision, le mélange du sable de dune et de l'argile est effectué manuellement, en veillant à obtenir une homogénéité optimale. Ce mélange homogène sera ensuite utilisé pour réaliser les essais expérimentaux avec précision et fiabilité.

III.8 Essais de compactage

II.8.1 Proctor modifié:

II.8.1.1 Définition :

L'**essai Proctor Modifié** est une méthode de laboratoire standardisée qui vise à déterminer, pour un sol donné, la masse volumique sèche maximale (γ_{dmax} OPM) et la teneur en eau optimale (wOPM) correspondante, sous l'application d'une énergie de compactage spécifique élevée, de l'ordre de 2700 kJ/m³. Cette énergie, significativement supérieure à celle de l'essai Proctor Normal, est conçue pour simuler les efforts de densification produits par les engins de compactage lourds et performants. L'essai Proctor Modifié fournit ainsi des références de compactage adaptées aux exigences des ouvrages soumis à de fortes sollicitations, tels que les couches de chaussées, les pistes d'aéroport, ou les barrages en terre. (**NF P 94-093**)

II.8.1.2 Objectif de l'essai Proctor modifié:

L'objectif principal est d'établir les références optimales de compactage pour un sol donné sous énergie renforcée. L'essai permet de déterminer la teneur en eau optimale et la densité sèche maximale atteignables. Ces paramètres servent ensuite de référence pour les travaux : on pourra ajuster la teneur en eau du sol et le nombre de passes des engins de compactage afin d'atteindre la densité cible sans sous-compactage ni sur-compactage (NF P 94-093, AFNOR 1999).

II.8.1.3 Principe de l'essai :

Le principe de l'essai consiste à préparer plusieurs échantillons homogènes du sol à tester, avec des teneurs en eau différentes. Chaque échantillon est compacté mécaniquement en couches successives dans un moule normalisé, en appliquant un nombre de coups de dame prédéfini à chaque couche. On mesure ensuite la masse volumique sèche de l'échantillon compacté. En reportant la densité sèche obtenue en fonction de la teneur en eau, on obtient une courbe en cloche. Le sommet de cette courbe correspond à la densité sèche maximale et à la teneur en eau optimale (ASTM D1557, NF P 94-093).

II.8.1.4 Équipements et matériel utilisés:

- Moule de compactage : Un cylindre métallique normalisé de 152,4 mm de diamètre et 2 124 cm³ de volume.
- Dame de compactage : Masse de 4,535 kg tombant d'une hauteur de 457 mm.
- Balance de précision : Pour peser l'échantillon humide et sec.
- Étuve : Pour sécher les prélèvements à 105 °C.
- Matériel de préparation : Tamis, auge de mélange, spatule, creuset, pinceau.

Ces équipements sont conformes aux prescriptions de la norme NF P 94-093 (AFNOR, 1999).



Figure III.28: Le moule Proctor



Figure III.29: l'appareil Proctor au laboratoire

II.8.1.5 Procédure étape par étape:

1. Préparation de l'échantillon : Tamiser le sol, déterminer la teneur en eau naturelle.
2. Humidification : Ajouter de l'eau à chaque lot pour obtenir plusieurs teneurs en eau.
3. Compactage : Remplir le moule en cinq couches, chacune compactée par 56 coups de dame.
4. Pesée et prélèvement : Peser le moule avec sol compacté, prélever un échantillon pour détermination de la teneur en eau.
5. Reproduction : Répéter pour chaque teneur en eau. Tracer la courbe densité sèche / teneur en eau (NF P 94-093).



Figure III.30: Étapes d'Exécution de l'Essai Proctor au Laboratoire

II.8.1.6 Énergie de compactage et calculs associés:

L'énergie de compactage appliquée dans l'essai Proctor modifié est de 2700 kJ/m³, soit une intensité environ quatre fois supérieure à celle du Proctor normal. Elle se calcule par la formule :

$$E = (m \times g \times h \times N) / V$$

avec :

- m: masse de la dame (4,535 kg)
- h: hauteur de chute (0,457 m)
- N: nombre total de coups (56 coups × 5 couches = 280)
- V: volume du moule (2 124 cm³)

Ces calculs permettent de vérifier que l'énergie appliquée respecte les exigences de la norme (NF P 94-093).

II.8.2 Méthode de compactage vibratoire (NF P 94-065)**III.8.2.1 Définition :**

Le compactage vibratoire est une technique de densification des sols granulaires par application de vibrations mécaniques soutenues. En laboratoire, on utilise une table vibrante pour soumettre un échantillon de sol à des oscillations verticales. Cette méthode permet d'atteindre la masse volumique maximale d'un matériau pulvérulent, équivalente au cas d'un état fortement compacté par rapport à un état naturel lâche. Cette technique s'applique aux sols non cohésifs (sables, graviers) à drainage libre. (Source : Norme CAN/BNQ 2501-062)



Figure III.31 : l'appareil table vibratoire au laboratoire

III.8.2.2 Objectif de l'essai :

L'objectif principal est de caractériser la compacité d'un matériau granulaire en laboratoire.

On cherche à déterminer la masse volumique maximale sèche obtenue par vibration ainsi que l'indice de densité relative. (Source : Norme EN 13286-5)

III.8.2.3 Principe de fonctionnement:

La table vibrante S238-10 génère des vibrations verticales grâce à un électroaimant. La fréquence (50/60 Hz) est constante, tandis que l'amplitude (jusqu'à 1,8 mm) est réglable. L'efficacité dépend de la masse, la température, l'amortissement et la durée. (Source : Manuel technique S238-10)

III.8.2.4 Description de la table S238-10:

Dimensions : 825×825×407 mm, Masse : 120 kg. La table comprend un plateau vibrant monté sur des entretoises en caoutchouc, un électroaimant, un panneau de commande (interrupteurs, potentiomètre). (Source : Manuel technique S238-10)

III.8.2.5 Appareillage utilisé:

- Moules normalisés.
- Douilles de guidage.
- Masses de surcharge.
- Comparateur à cadran.
- Balance.
- Étuve.(Source : Norme CAN/BNQ 2501-062)

III.8.2.6 Procédure de mise en œuvre:

- Préparation de l'échantillon
- Montage
- Mise sous tension
- Réglage de l'amplitude
- Vibration
- Mesures post-essai (Source : Manuel technique S238-10)



Figure III.32: Étapes d’Exécution de l’Essai table vibratoire au Laboratoire

III.8.2.7 Fréquences, intensité de vibration et réglages possibles:

Fréquence: 50/60 Hz.

Amplitude: 0,1–1,8 mm (à 50 Hz).

Réglage via potentiomètre avec seuils mini/maxi. (Source : Manuel technique S238-10)

III.8.2.8 Énergie de compactage:

L’énergie de compactage développée lors de la méthode vibratoire n’est pas toujours définie de manière standardisée comme dans l’essai Proctor.

III.8.2.8.1 Justification de la formule d’énergie vibratoire:

L’énergie de compactage vibratoire n’est pas explicitement définie dans les normes géotechniques usuelles telles que l’ASTM D4253 ou la norme canadienne CAN/BNQ 2501-062. Ces normes précisent les méthodes de détermination de la densité maximale des sols granulaires par vibration, mais elles ne quantifient pas directement l’énergie mécanique transmise au sol.

Cependant, dans une approche analytique issue de la mécanique vibratoire, il est possible d’estimer cette énergie à l’aide d’un raisonnement basé sur la dynamique des systèmes oscillants.

Lorsqu'un système vibre de manière sinusoïdale (ce qui est le cas d'une table vibrante électromagnétique alimentée en courant alternatif), l'accélération maximale exercée sur une masse peut être exprimée par :

$$a = (2\pi f)^2 \times d$$

où :

- f : est la fréquence des vibrations (en Hz),
- d : est l'amplitude du déplacement vibratoire (en mètres),
- π : est la constante mathématique ($\approx 3,1416$).

Cette accélération, multipliée par la masse vibrante m , donne la force dynamique transmise au sol. En intégrant cette force sur la distance d (amplitude) et la durée t de l'essai, on obtient une estimation de l'énergie totale transmise, selon la relation suivante :

$$E = m \times a \times d \times t$$

avec:

- E : énergie vibratoire estimée (en joules),
- m : masse totale soumise à vibration (kg),
- a : accélération vibratoire maximale (m/s^2),
- d : amplitude de vibration (m),
- t : durée de vibration (s).

Bien que cette formule ne soit pas issue d'une norme officielle, elle constitue une hypothèse de travail fondée sur les principes de la mécanique vibratoire.

Elle repose sur une modélisation empirique cohérente permettant d'estimer l'énergie transmise au sol par l'intermédiaire d'un dispositif vibrant à mouvement sinusoïdal.

Cette relation a été proposée dans le cadre de ce travail à titre d'hypothèse personnelle, dans le but de fournir une estimation approximative de l'énergie appliquée au sol lors du compactage vibratoire, en l'absence d'une référence énergétique explicite dans les normes techniques actuelles

III.9 Conclusion :

Ce chapitre a permis d'établir avec rigueur le cadre expérimental de notre étude. Nous avons d'abord procédé aux prélèvements des matériaux étudiés — le sable dunaire de Sebseb et l'argile de Bouhraoua — lors d'une campagne de terrain ciblée. Ces matériaux ont ensuite fait l'objet d'une caractérisation approfondie à travers des essais granulométriques, la détermination des limites d'Atterberg, les mesures de l'équivalent de sable ainsi que l'essai au bleu de méthylène. Ces analyses ont permis de cerner leurs propriétés physico-chimiques et leur nature intrinsèque.

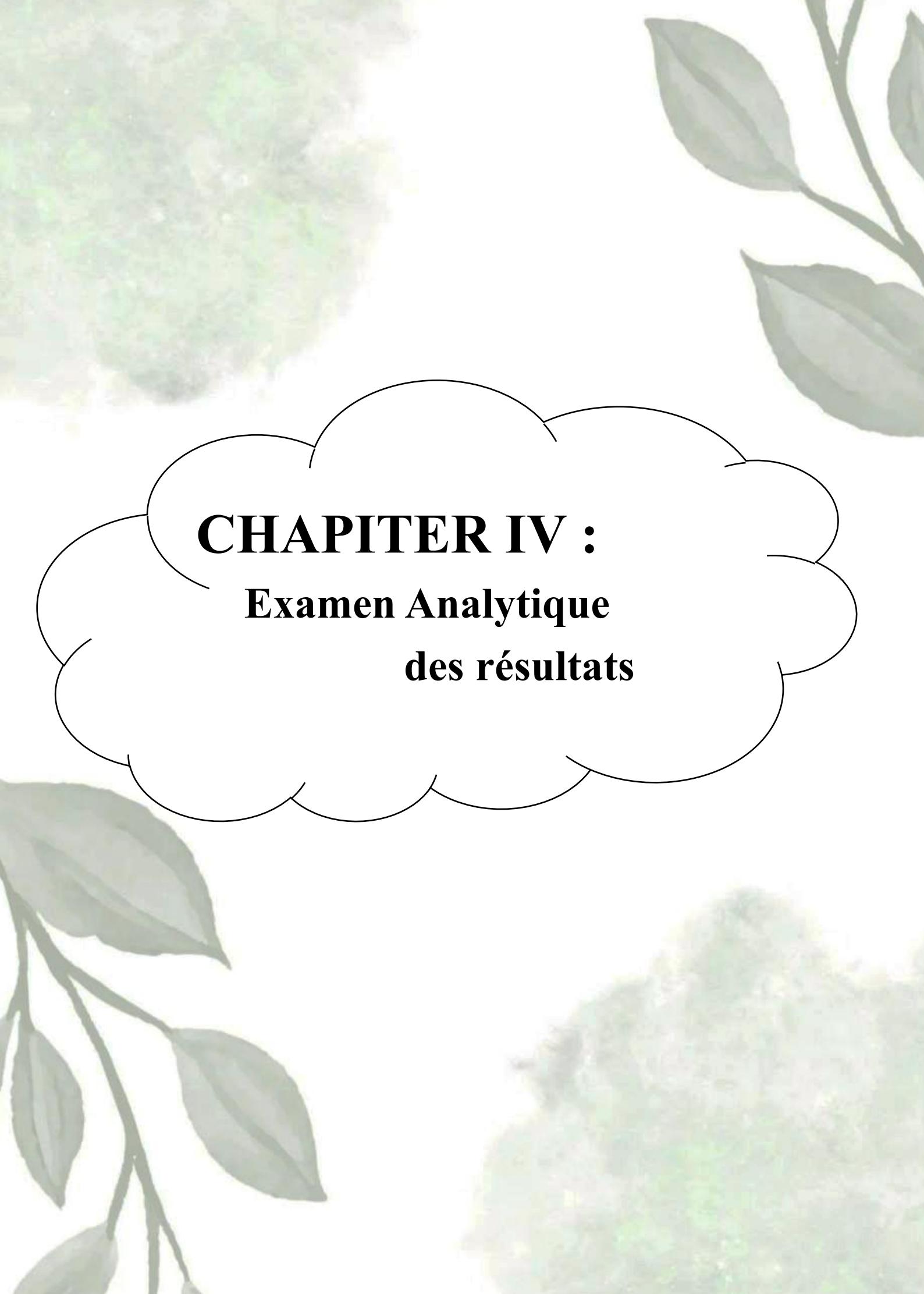
Le sable de dune de Sebseb, dont la granulométrie est composée à 54,66 % de gros sable et 45,34 % de sable fin, présente un indice de plasticité $IP < 12\%$ et une valeur au bleu de méthylène de 0,84. Il a été classé comme B5 (sables et graves argileuses) selon la classification GTR.

L'argile de Bouhraoua, quant à elle, présente une teneur en éléments fins ($< 80 \mu\text{m}$) de 45 %, un indice de plasticité élevé ($IP = 22,28\%$), une limite de liquidité $WL = 54,07\%$ et une valeur au bleu de méthylène de 2,75, ce qui la classe comme A2 (sol fin) selon la même norme.

Sur la base de ces résultats, les matériaux ont été classés selon les systèmes LCPC, USCS et GTR, offrant une lecture normalisée de leur comportement potentiel. Forts de cette compréhension, nous avons ensuite procédé à la préparation soignée des mélanges sable de dune -argile, en garantissant l'homogénéité et la représentativité des échantillons à tester.

Enfin, les protocoles des essais de compactage — à la fois par la méthode Proctor modifiée et par la table vibrante — ont été définis avec précision, tant sur les modalités d'application de l'énergie que sur les paramètres de suivi.

L'ensemble de ce dispositif expérimental, élaboré méthodiquement, constitue une étape préalable essentielle. Il pose les bases nécessaires à l'analyse critique des résultats de compactage présentée dans le chapitre suivant, et contribue à l'atteinte de notre objectif final : valoriser durablement ces matériaux locaux dans le cadre des infrastructures routières.



CHAPITER IV :

Examen Analytique

des résultats

IV.1 Introduction :

Après avoir établi les fondements théoriques du compactage des sols et détaillé les protocoles expérimentaux mis en œuvre dans les chapitres précédents, ce quatrième chapitre est consacré à la présentation, l'analyse et l'interprétation approfondie des résultats obtenus. L'objectif principal est de décortiquer les données issues des essais de compactage Proctor modifié et par table vibrante, réalisés sur les matériaux bruts (sable de dune de Sebseb et argile de Bouhraoua) ainsi que sur leurs différents mélanges.

Cet examen analytique s'attachera à mettre en évidence les relations entre la composition des mélanges, la méthode de compactage employée, et les caractéristiques géotechniques résultantes, notamment la masse volumique sèche maximale (γ_{dmax}) et la teneur en eau optimale (w_{opt}). Une attention particulière sera portée à la comparaison des performances des deux techniques de compactage, afin de discerner leurs efficacités respectives et leurs domaines de pertinence en fonction de la nature des matériaux étudiés.

L'interprétation des courbes Proctor et des résultats de la table vibrante sera enrichie par une discussion des phénomènes observés, tels que l'influence de la cohésion de l'argile, les avantages potentiels des mélanges sable-argile, et l'impact du mode d'application de l'énergie de compactage. En confrontant les résultats expérimentaux aux principes théoriques et aux comportements attendus des sols, ce chapitre vise à dégager des conclusions significatives quant à la proportion optimale du mélange et à l'adéquation des méthodes de compactage pour valoriser ces matériaux locaux dans le contexte des infrastructures routières de la région de Ghardaïa.

Cette analyse constituera ainsi une étape cruciale pour formuler des recommandations pratiques et répondre à la problématique centrale de cette étude.

IV.2 Résultats obtenus :**IV.2.1 Préparation des échantillons :**

Comme indiqué dans le chapitre précédent (chapitre III)

IV.2.2 Les essais de compactage :**IV.2.2.1 Essais Proctor modifiés :**

Nous avons humidifié chaque échantillon avec un taux d'humidité spécifique (4 % ; 6 % ; 8 % ; 10 % ; 12 % ; etc...), avant de réaliser l'essai Proctor modifié afin d'évaluer la densité sèche maximale et la teneur en eau optimale de chaque mélange.



Figure IV. 1:Préparation de mélange optimale

Les résultats obtenus à partir de l'essai Proctor sont présentés (**FigureIV.2**) et sur le (**Tableau IV.1**)

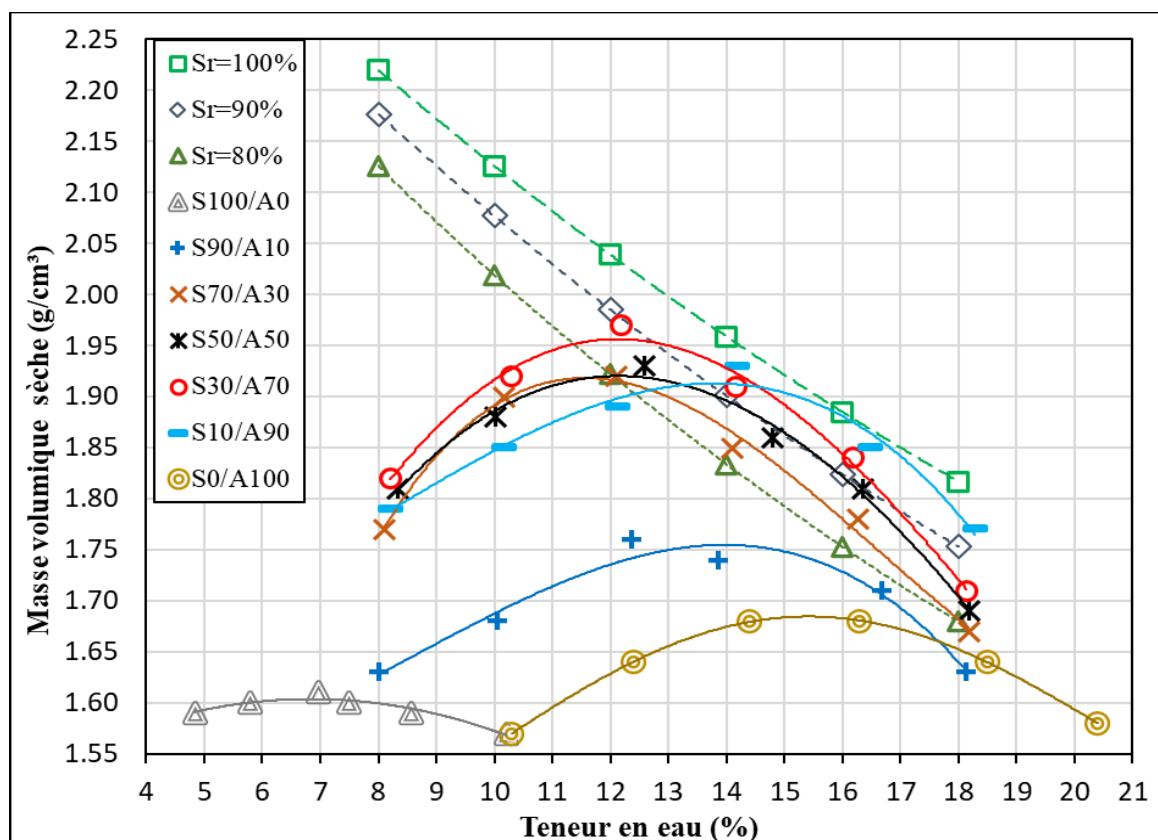


Figure IV. 2:Courbe Proctor modifié pour tous les mélanges (sable de dune + argile)

Tableau IV. 1: Résultats des paramètres de compactage selon la méthode de Proctor pour tous les mélanges.

100% Sable - 0% Argile	w (%)	4.84	5.78	6.96	7.50	8.57	10.2
	ρ_d (g/cm ³)	1.59	1.60	1.61	1.60	1.59	1.57
90% Sable - 10% Argile	w (%)	8.01	10.05	12.36	13.87	16.68	18.14
	ρ_d (g/cm ³)	1.63	1.68	1.76	1.74	1.71	1.63
70% Sable - 30% Argile	w (%)	8.10	10.16	12.11	14.10	16.26	18.18
	ρ_d (g/cm ³)	1.77	1.90	1.92	1.85	1.78	1.67
50% Sable - 50% Argile	w (%)	8.34	10.03	12.59	14.79	16.36	18.19
	ρ_d (g/cm ³)	1.81	1.88	1.93	1.86	1.81	1.69
30% Sable - 70% Argile	w (%)	8.21	10.29	12.19	14.16	16.19	18.14
	ρ_d (g/cm ³)	1.82	1.92	1.97	1.91	1.84	1.71
10% Sable - 90% Argile	w (%)	8.20	10.16	12.11	14.17	16.47	18.28
	ρ_d (g/cm ³)	1.79	1.85	1.89	1.93	1.85	1.77
0% Sable - 100% Argile	w (%)	10.30	12.40	14.40	16.30	18.50	20.40
	ρ_d (g/cm ³)	1.57	1.64	1.68	1.68	1.64	1.58

IV.2.2.2 Essais Table de vibration :

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



Figure IV.3 : les moules de table vibrantes.



Figure IV.4 : préparations des mélanges



Figure IV.5 : places des moules et l'échantillon pour vibrer



Figure IV.6 : Alimentatore II a fréquence fixe
éte réglé sur une fréquence de 80 Hz

À la suite des essais réalisés à différentes teneurs en eau, les résultats obtenus sont présentés ci-après.

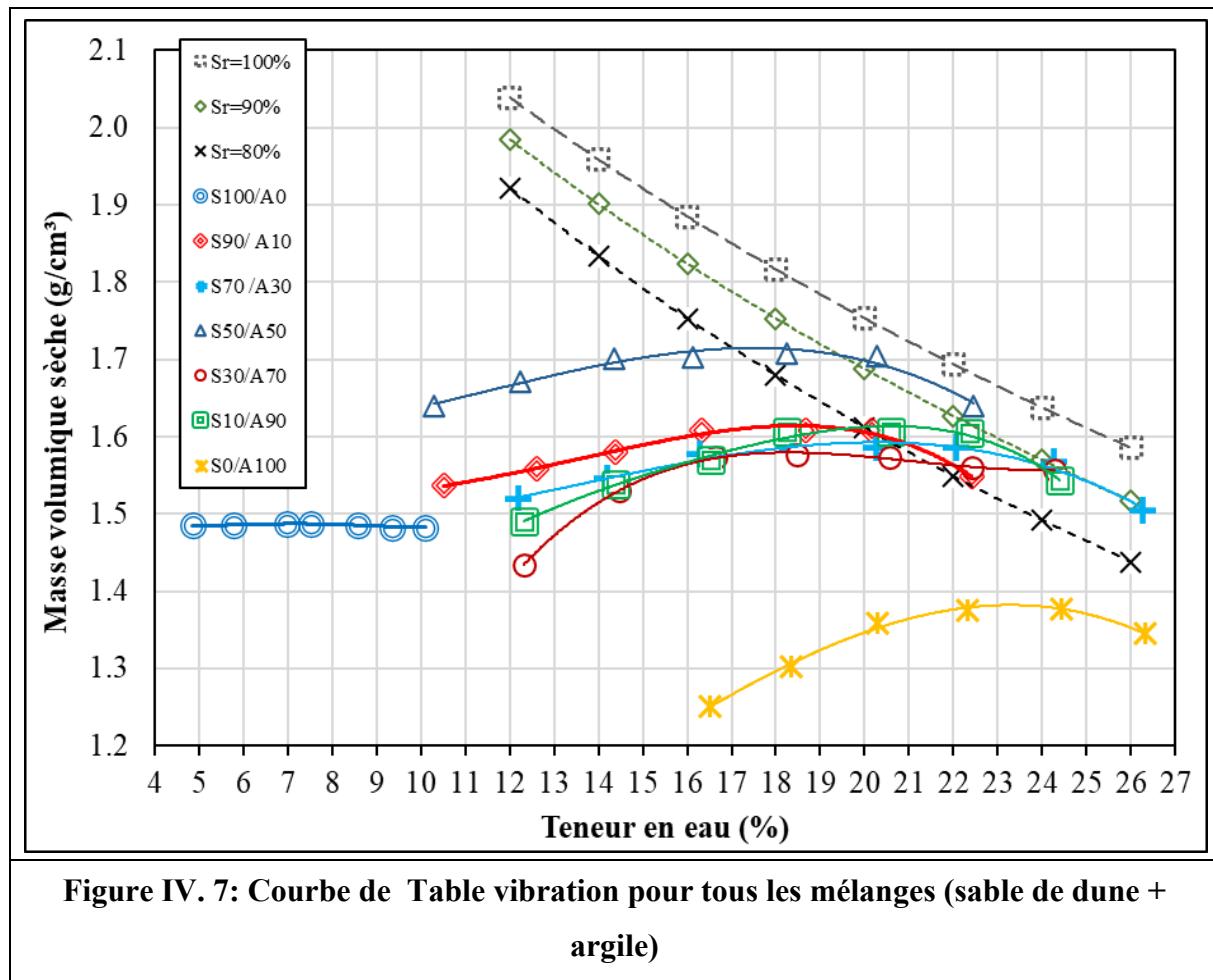
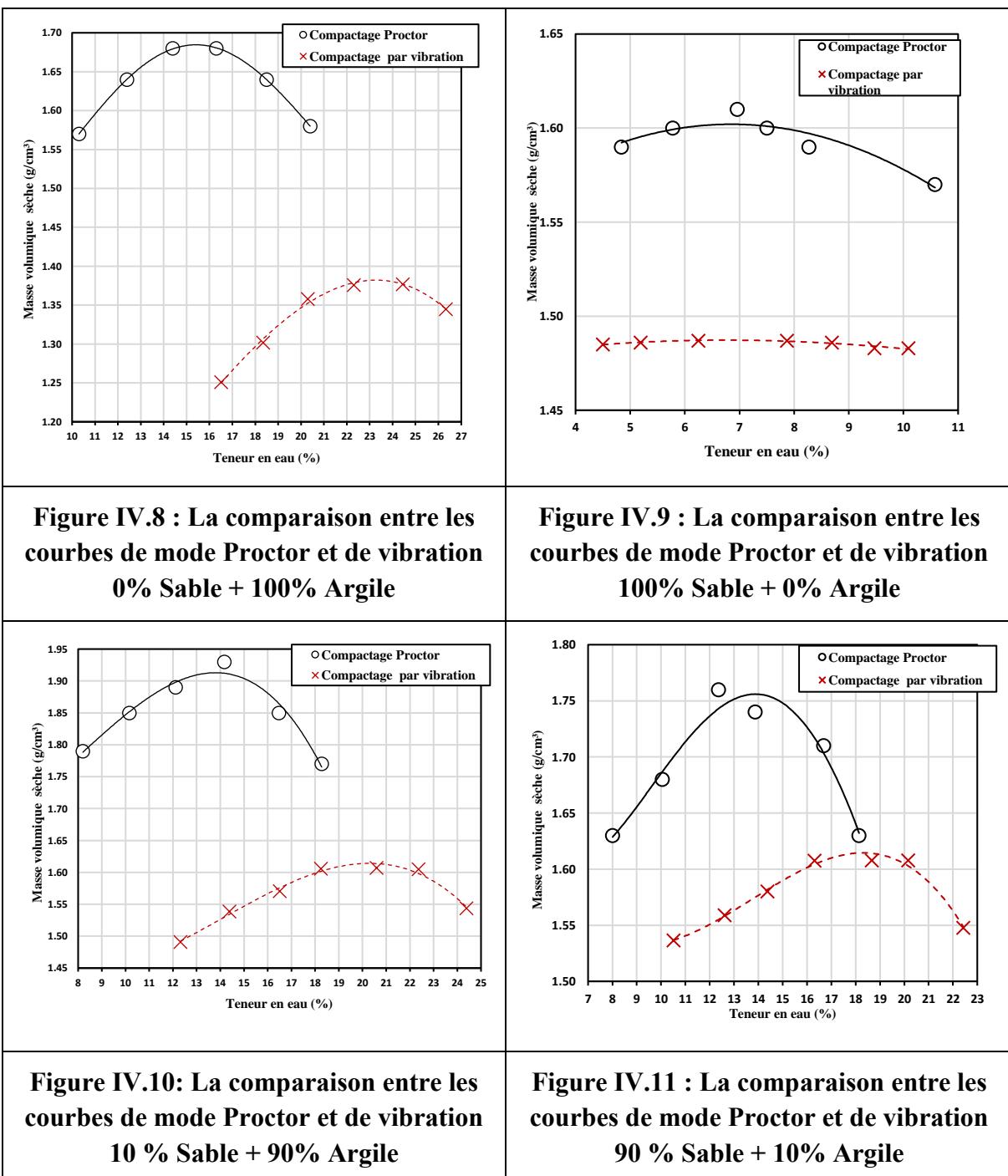
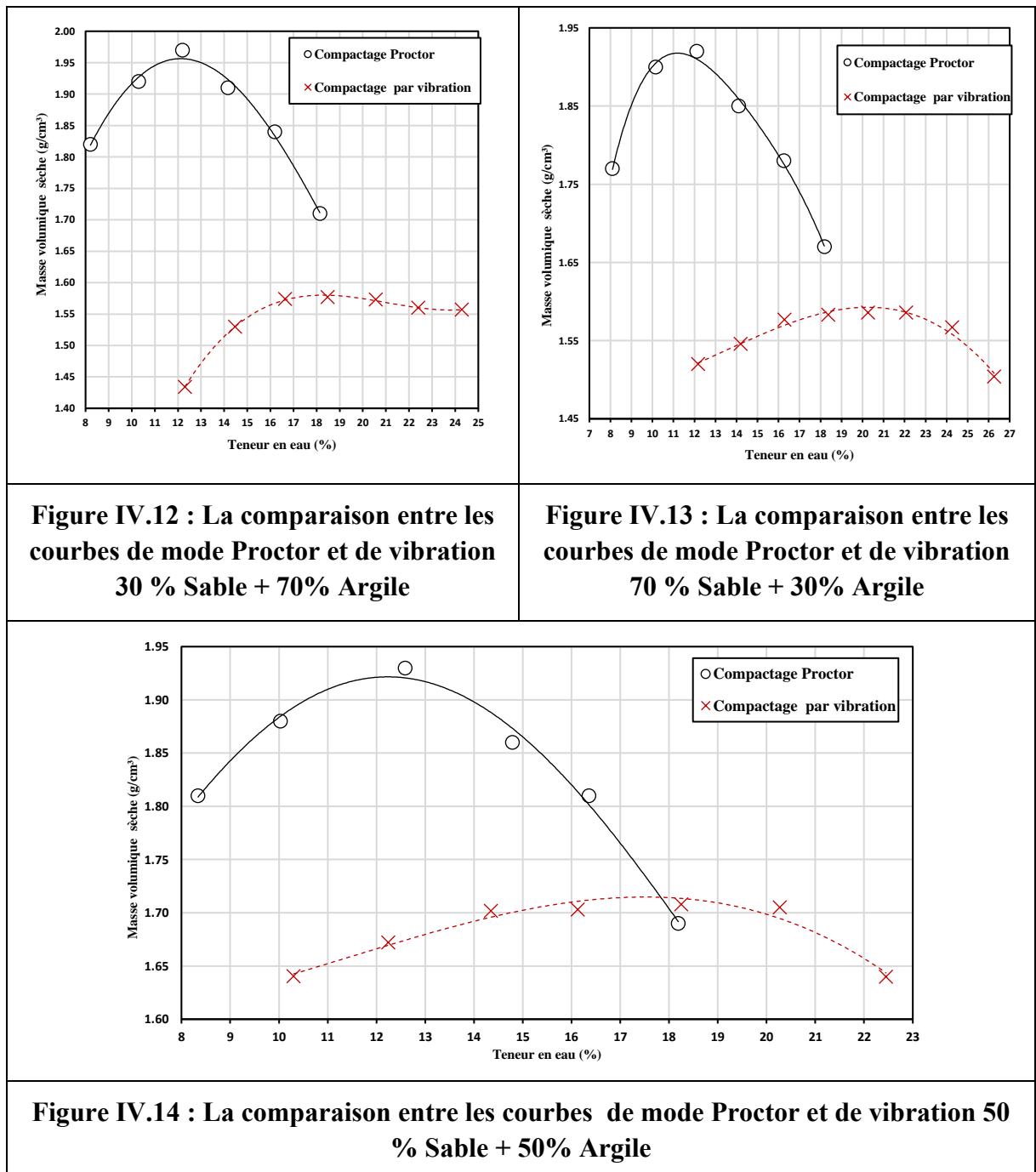


Tableau IV. 2: Résultats des paramètres de compactage selon la méthode de vibration pour tous les mélanges.

100% Sable - 0% Argile	w (%)	4.84	5.78	6.96	7.50	8.57	9.34	10.09	
	ρ_d (g/cm ³)	1.485	1.486	1.487	1.487	1.486	1.483	1.483	
90% Sable - 10% Argile	w (%)	10.51	12.61	14.37	16.31	18.66	20.16	22.42	
	ρ_d (g/cm ³)	1.537	1.559	1.580	1.607	1.608	1.608	1.548	
70% Sable - 30% Argile	w (%)	12.19	14.20	16.28	18.37	20.27	22.07	24.26	26.26
	ρ_d (g/cm ³)	1.520	1.546	1.577	1.583	1.586	1.586	1.567	1.504
50% Sable - 50% Argile	w (%)	10.30	12.25	14.35	16.14	18.25	20.28	22.46	
	ρ_d (g/cm ³)	1.641	1.672	1.702	1.703	1.708	1.705	1.640	
30% Sable - 70% Argile	w (%)	12.31	14.48	16.65	18.49	20.57	22.41	24.29	
	ρ_d (g/cm ³)	4.84	5.78	6.96	7.50	8.57	9.34	10.09	
10% Sable - 90% Argile	w (%)	1.485	1.486	1.487	1.487	1.486	1.483	1.483	
	ρ_d (g/cm ³)	10.51	12.61	14.37	16.31	18.66	20.16	22.42	
0% Sable - 100% Argile	w (%)	1.537	1.559	1.580	1.607	1.608	1.608	1.548	
	ρ_d (g/cm ³)	12.19	14.20	16.28	18.37	20.27	22.07	24.26	26.26

IV.2.3 Comparaison entre l'essai Proctor et l'essai de compactage par vibration :

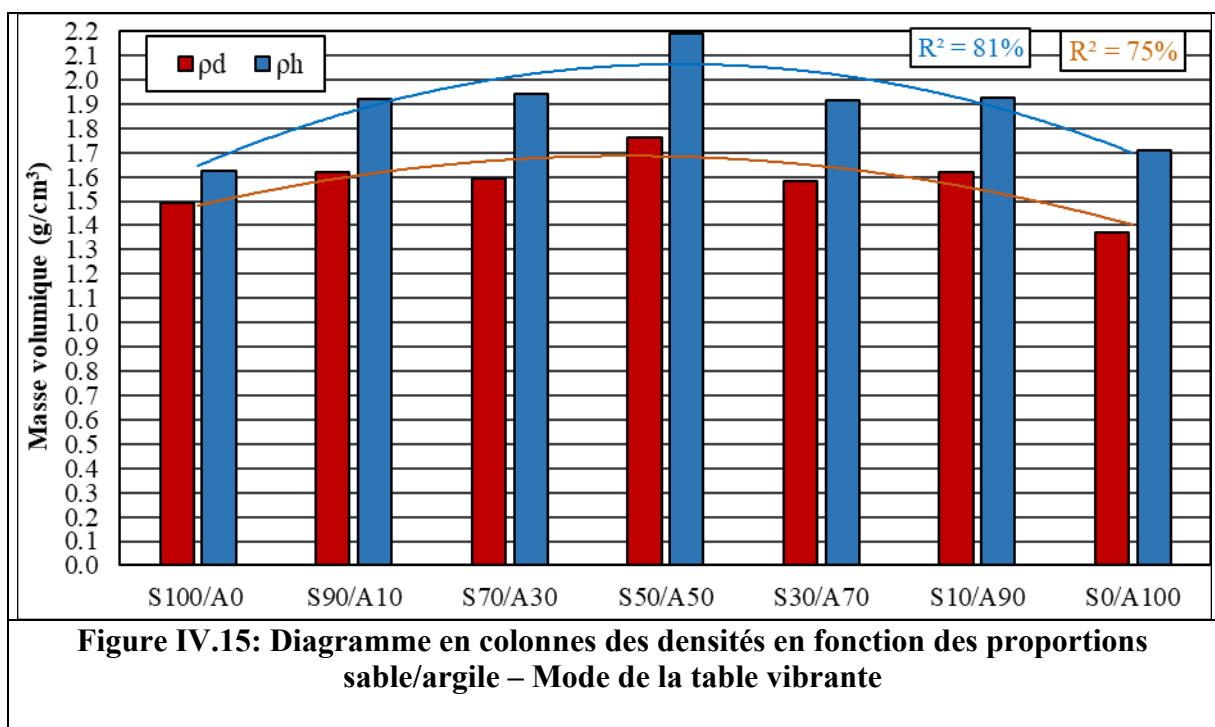




La courbe de compactage du sable de dune est plus large et plus plate, ce qui indique une large plage de teneurs en eau autour de la teneur en eau optimale, et ce pour les deux modes de compactage. Toutefois, il existe une différence importante entre les valeurs de la masse volumique sèche obtenues : la densité maximale mesurée selon l'essai Proctor est nettement plus élevée que celle obtenue par table vibrante.

Les courbes obtenues par la méthode de vibration, pour toutes les combinaisons testées, sont plus larges et plus plates. Elles montrent une large plage de teneurs en eau autour de la teneur optimale, avec une tendance à la stabilisation. Cependant, le pic correspondant à la densité maximale est moins bien défini en mode vibration, contrairement à l'essai Proctor où le sommet de la courbe est net et bien marqué. Cette observation, visible sur l'ensemble des graphiques, suggère que la méthode Proctor est plus efficace pour identifier la teneur en eau optimale et atteindre une densité maximale plus précise."

Les courbes obtenues par la méthode de vibration présentent une allure similaire pour toutes les combinaisons testées. Elles sont caractérisées par une forme plus large et plus plate, traduisant une large plage de teneurs en eau autour de la teneur optimale, avec une tendance générale à la stabilisation. De même, les courbes issues de l'essai Proctor montrent également une certaine similitude d'allure, mais se distinguent par la présence d'un pic bien défini correspondant à la densité sèche maximale.



Les résultats obtenus selon le mode de la table vibrante montrent une augmentation constante de la masse volumique humide, tandis que la masse volumique sèche varie en fonction de la teneur en eau."

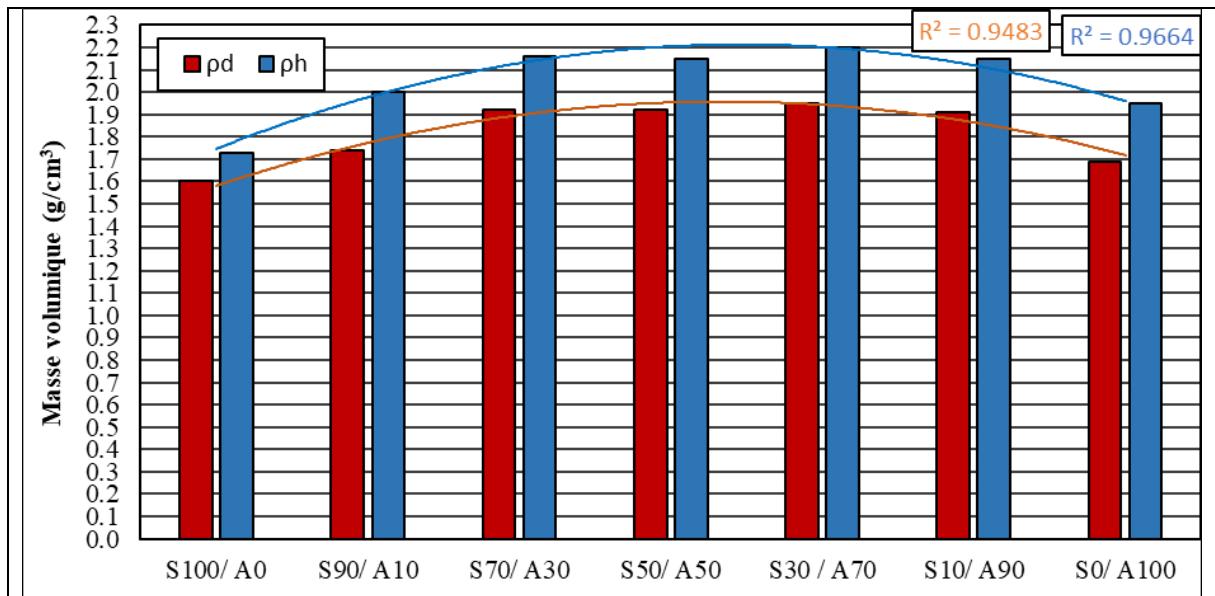


Figure IV.16: Diagramme en colonnes des densités en fonction des proportions sable/argile –Mode Proctor

Les résultats obtenus selon le mode de Proctor montrent une augmentation constante de la masse volumique humide, tandis que la masse volumique sèche varie en fonction de la teneur en eau."

IV.3 Discussion des résultats :

IV.3.1 Interprétation les résultats des essais d'identification :

IV.3.1.1 Analyse chimique (AFNOR.1995) :

D'après les résultats (Table III.1), nous remarquons que la CaCO₃ est l'élément prépondérant. On constate aussi que le taux du carbone très élevé pour l'argile, donc on a des argiles calcaires

IV.3.1.2 Analyse granulométrique (NF P94–056) :

La distribution granulométrique (Figure III.12) pour l'argile obtenue nous montre que : pour Bouhraoua :

- 1) Une présence de particule gravier est de (8%),
- 2) L'articule sableuse (gros et fin) est de (17%),
- 3) Le pourcentage de particules limoneuses est de (42%)
- 4) Le pourcentage de particule argileuse est de (33%)

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

IV.3.1.3 Limite d'Atterberg (NF P 94-051) :

Selon le Diagramme de Casa grande (**Figure III.13**) le sol de Bouhraoua sont classe comme limons très plastique.

IV.3.2 Interprétation les courbes de Proctor modifié :

(**Figure IV.2**) présents la courbe de Proctor, qui se caractérise par une forme arquée s'élevant progressivement avec l'augmentation de la teneur en eau, jusqu'à atteindre une densité sèche maximale, puis décroît au-delà de ce point. Dans un premier temps, l'ajout d'eau aide à lubrifier les particules du sol et à réduire la friction entre elles, ce qui permet un réarrangement plus dense et compact. Cependant, lorsque la teneur en eau dépasse la valeur optimale, l'eau commence à remplir les vides au lieu d'évacuer l'air, ce qui entraîne une augmentation de la porosité et une diminution de la densité sèche du sol.

Interprétation

Les courbes de saturation et de leur relation avec la courbe de proctor :

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

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

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

Das, B. M. (2010)

γ_w : densité humide

γ_d : densité sèche

Sr : Degré de saturation

G_s : Poids spécifique des particules du sol=2.65

W : Teneur en eau

IV.3.3 Interprétation les courbes de Table de vibration :

Concernant la méthode de compactage à l'aide de la table vibrante, les résultats (**FigureIV.7**)

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

IV.3.4 Comparaison entre l'essai Proctor et l'essai de compactage par vibration:

FigureIV.8 montre la différence entre les résultats des essais réalisés selon les méthodes Proctor et table vibrante. On observe à partir des résultats une variation notable au niveau de la densité sèche maximale et de la teneur en eau optimale.

La densité sèche maximale (γ_d max) : diffère en raison de la variation de l'énergie appliquée dans chaque méthode de compactage. La méthode Proctor repose sur des coups réguliers et puissants, générant une pression directe sur les particules du sol, ce qui facilite leur réarrangement efficace et l'expulsion de l'air intersticiel. En revanche, la méthode utilisant la table vibrante dépend d'un ensemble de paramètres tels que la durée, l'intensité des vibrations, la fréquence, ainsi que la masse appliquée sur le sol. Malheureusement, il n'a pas été possible d'estimer la valeur de l'énergie transmise dans cette méthode, faute d'informations précises sur l'intensité et la fréquence des vibrations, contrairement à la méthode Proctor où l'énergie de compactage est bien définie et quantifiable.

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

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

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

IV.3.5 Interprétation des résultats obtenus :

IV.3.5.1 Comportement de l'argile lors du compactage :

Le professeur a décrit l'état de l'argile lorsqu'elle adhère à la paroi du moule pendant le compactage, ce qui illustre la cohésion élevée de ce matériau.

IV.3.5.2 Avantages du mélange sable-argile :

Lorsqu'on mélange du sable avec de l'argile, les défauts propres à chaque matériau pris séparément peuvent être corrigés. Cela améliore le comportement global du mélange.

IV.3.5.3 Préparation des échantillons avant compactage :

Les échantillons étaient préparés par malaxage avant l'ajout de l'eau. Concernant l'ajout de l'eau, il a été précisé qu'elle était généralement introduite par étapes successives, et non en une seule fois.

IV.3.5.4 Proportion optimale du mélange :

Le mélange contenant 30 % de sable et 70 % d'argile (S30–A70) a été identifié comme la composition optimale dans cette expérience, avec une densité sèche maximale et une teneur en eau optimale. Il a été souligné que ce résultat pourrait varier si les échantillons provenaient d'une autre zone géographique.

IV.3.5.5 Effet du mode de vibration :

L'interpénétration des courbes granulométriques résulte du mode de préparation des échantillons. Le chevauchement des particules de sable de dune et d'argile, particulièrement lors de la vibration, crée un enchaînement particulier. Si la vibration avait été appliquée par couches successives (et non en une seule fois), les résultats auraient pu être différents. Il est donc important de documenter ces différences dans l'analyse expérimentale ou la faisabilité de l'essai.

IV.3.5.6 Confirmation expérimentale :

La courbe de saturation doit être vérifiée pour confirmer les résultats. On peut lire la densité sèche maximale sur les courbes pour les mélanges S50–A50 et S30–A70, mais il est important de noter que leurs teneurs en eau optimales diffèrent. La teneur en eau pour le mélange S70–A30 est plus élevée que pour S50–A50.

IV.3.5.7 Interprétation de la différence :

Cette différence s'explique par la nature de l'argile : plus sa quantité augmente dans le mélange, plus elle吸水, en raison de la présence de particules fines. Cela explique l'augmentation de la teneur en eau optimale.

IV.3.5.8 Effet de la cohésion :

La cohésion de l'argile empêche parfois un bon compactage, car les particules restent collées.

Cependant, lorsque des particules de sable sont présentes en quantité optimale, elles peuvent réduire cet effet de cohésion, permettant une meilleure compacité du mélange.

IV.3.5.9 Facteurs principaux influençant la compacité :

Trois ou quatre phénomènes s'entrecroisent :

- Cohésion naturelle de l'argile, qui gêne le compactage.
- Méthode de préparation des échantillons, qui influence la répartition des matériaux.
- Mode d'application du compactage ou de la vibration : sable et argile réagissent différemment.

- Absence de moyens d'observation microscopique, ce qui empêche de voir précisément le degré d'enchaînement des particules avant/après vibration ou compactage.

IV.4 Conclusion

En conclusion, l'analyse détaillée des essais Proctor Normal et Modifié a permis de souligner leur rôle central dans la caractérisation et le contrôle du compactage des sols en génie civil. Il a été clairement établi que le choix de l'essai de référence, Normal ou Modifié, dépend fondamentalement de l'énergie de compactage représentative des sollicitations et des performances attendues pour l'ouvrage.

Les résultats théoriques et les protocoles présentés démontrent que l'essai Proctor Modifié, par l'application d'une énergie supérieure, conduit systématiquement à une densité sèche maximale (γ_{dmax}) plus élevée et à une teneur en eau optimale (w_{opt}) plus faible comparativement à l'essai Proctor Normal. Cette amélioration de la densité se traduit par une meilleure portance potentielle et une plus faible compressibilité, rendant les sols compactés selon cette référence particulièrement adaptés aux infrastructures critiques telles que les couches de forme routières ou les grands remblais. L'essai Proctor Normal demeure quant à lui pertinent pour des applications moins exigeantes où une énergie de compactage modérée est suffisante et représentative.

Ce chapitre a également mis en exergue l'importance cruciale de la teneur en eau lors du compactage et l'influence de la nature du sol (granulométrie, plasticité) sur les paramètres Proctor obtenus. Ces éléments soulignent que la maîtrise du compactage ne se limite pas à l'application d'une énergie, mais nécessite une compréhension fine des interactions sol-eau-énergie. Le choix judicieux de l'essai de référence et le contrôle rigoureux des paramètres sur chantier, en s'appuyant sur les valeurs (γ_{dmax} , w_{opt}) déterminées en laboratoire, sont donc indispensables pour assurer une portance optimale, minimiser les tassements et garantir la stabilité durable des ouvrages en terre.



CONCLUSION GÉNÉRALE

CONCLUSION GÉNÉRALE

Conclusion Générale

La valorisation des matériaux locaux dans les projets d'infrastructure, en particulier dans le secteur routier en Algérie, a constitué le fondement de ce travail de recherche. Dans la wilaya de Ghardaïa, où le sable de dune de Sebseb et l'argile de Bouhraoua sont abondants, nous avons cherché à identifier la méthode de compactage la plus efficace pour optimiser les propriétés géotechniques de leurs mélanges, dans l'objectif de leur utilisation en couche de fondation routière.

Pour y répondre, nous avons étudié les performances au compactage de différents mélanges sable-argile à l'aide de deux méthodes : le Proctor Modifié et la table vibrante. L'approche expérimentale s'est appuyée sur une série d'essais d'identification (granulométrie, limites d'Atterberg, VBS, ES...) et de compactage réalisé sur des mélanges à proportions variables.

Les résultats ont montré que :

- Le Proctor Modifié permet d'obtenir les densités sèches maximales les plus élevées, avec un pic observé pour le mélange S30-A70 ($1,97 \text{ g/cm}^3$ à $w_{opt} \approx 12,19\%$).
- La table vibrante, bien qu'efficace pour les mélanges plus sableux, reste globalement moins performante, avec une densité maximale de $1,719 \text{ g/cm}^3$ pour le même mélange.
- L'ajout d'argile en proportions modérées à fortes améliore notablement l'aptitude au compactage, surtout sous une énergie de compactage élevée comme celle du Proctor Modifié.

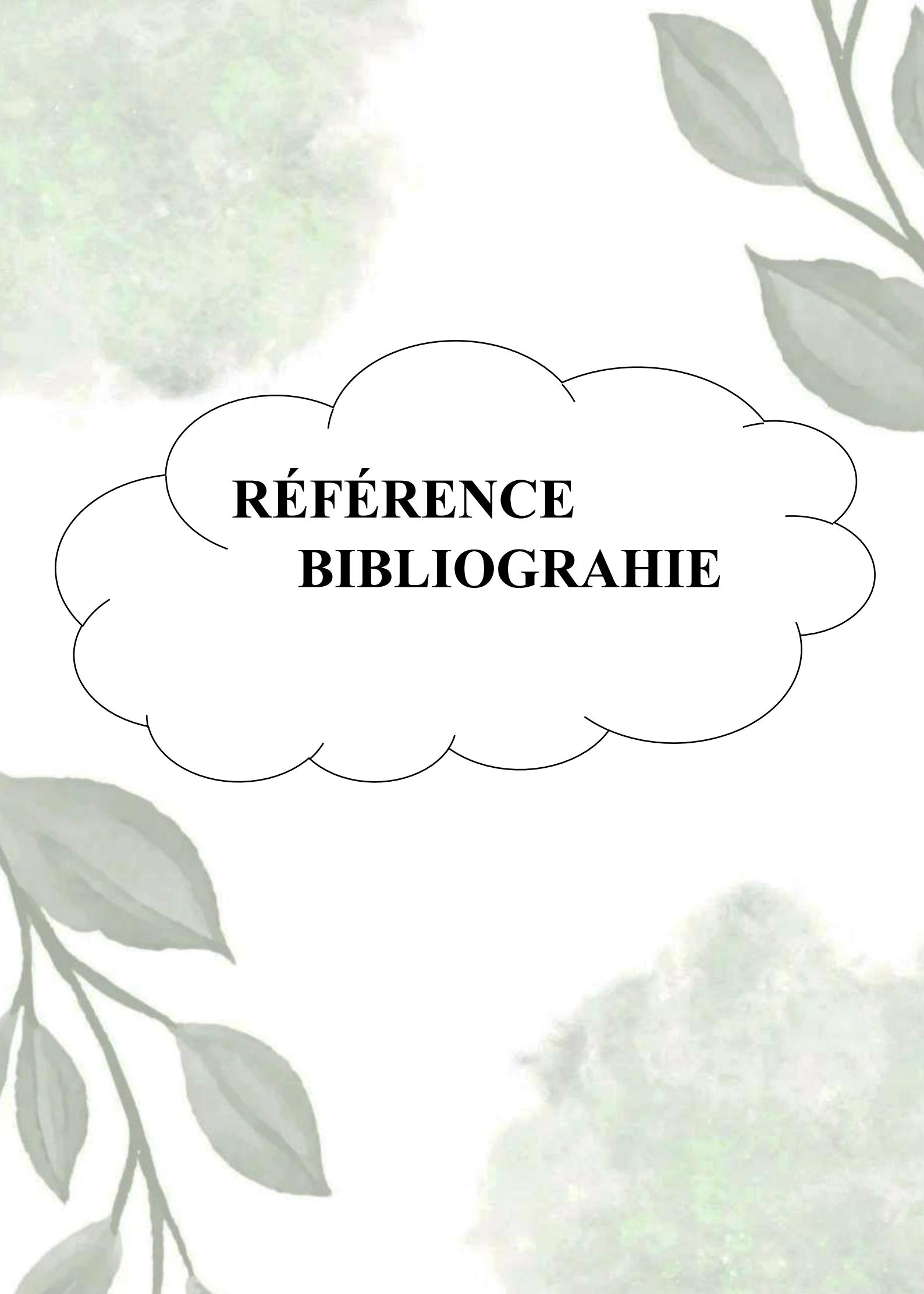
Ce travail a toutefois été confronté à plusieurs contraintes :

- La préparation laborieuse des matériaux, notamment l'argile nécessitant concassage, broyage et tamisage.
- Le volume important d'essais, indispensable pour garantir la fiabilité des résultats.
- Le manque de données précises concernant l'énergie délivrée par la table vibrante, ce qui a limité la comparaison directe avec le Proctor Modifié. Nous avons donc dû proposer une hypothèse de calcul basée sur la mécanique vibratoire.
- Des limites de temps liées à l'organisation du travail expérimental et la rédaction du mémoire.

CONCLUSION GÉNÉRALE

Recommandations

- Pour des applications routières en milieu aride, il est recommandé d'utiliser des mélanges sable-argile avec une teneur en argile comprise entre 50 % et 70 %, compactés selon la méthode Proctor Modifiée, afin de garantir une densité optimale et une meilleure stabilité mécanique.
- Il serait pertinent d'approfondir la recherche sur l'énergie réellement appliquée par les méthodes vibratoires, et de valider expérimentalement les hypothèses formulées dans cette étude.
- Enfin, l'approche adoptée ici pourrait être étendue à d'autres matériaux locaux afin de proposer une démarche de valorisation plus globale, applicable à l'échelle nationale.



RÉFÉRENCE BIBLIOGRAPHIE

Référence bibliographie

- AFNOR. (1992). Norme NF P 18-598 – Essai d'équivalent de sable. Association Française de Normalisation.
- AFNOR. (1992). Norme NF P 94-051 – Essai des limites d'Atterberg. Association Française de Normalisation.
- AFNOR. (1992). Norme NF P 94-056 et NF P 94-057 – Analyse granulométrique par tamisage et sédimentation. Association Française de Normalisation.
- AFNOR. (1999). NF P 94-061-1. Sols : Reconnaissance et essais – Détermination de la masse volumique d'un matériau en place – Partie 1 : Méthode au cône à sable.
- AFNOR. (1999). NF P 94-093. Sols : Reconnaissance et essais – Détermination des références de compactage d'un matériau – Essai Proctor normal – Essai Proctor modifié.
- AFNOR. (1999). Norme NF P 94-093 – Essai Proctor modifié. Association Française de Normalisation.
- ASTM International. (2004). Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Modified Effort (ASTM D1557). ASTM International.
- ASTM International. (2023). ASTM D1557. Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Modified Effort (56,000 ft-lbf/ft³ (2,700 kN-m/m³)).
- ASTM International. (2023). ASTM D698. Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Standard Effort (12,400 ft-lbf/ft³ (600 kN-m/m³)).
- Azzouz, A. (2016). Étude des propriétés géotechniques des sols de Ghardaïa. Laboratoire des Travaux Publics du Sud (LTPS), Algérie.
- Azzouz, F. Z. (2017). Caractérisation Physique Et Mécanique De Mélanges Argile-Sable De Dune Destinés La Réalisation Des Couches Compactées En
- Bergado, D.T., Anderson, L.R., Miura, N., Balasubramanium, A.S. (1996). *Soft Ground Improvement in Lowland and Other Environments*. ASCE Press, New York.
- Bjolgerud, O., Haug, A.K. (1983). *Dynamic consolidation of rockfill at an oil refinery site*. Proc. 8th ECSMFE, Helsinki.

Référence bibliographie

- Bouassida, M. & Hazzar, L. (2008). *Comparison between Stone Columns and Vertical Geodrains with Preloading Embankment Techniques*. 6th Int. Conf. on Case Histories, USA.
- Bowles, J. E. (2012). *Foundation Analysis and Design*. McGraw-Hill Education.
- Budhu, M. (2011). *Soil Mechanics and Foundations*. Wiley.
- Coduto, D. P., Yu, W. A., & Kitch, W. A. (2016). Geotechnical engineering: Principles and practices (2nd ed.). Pearson.
- CORINSA France. (2024). Les fondamentaux du compactage des sols.
- Costet, J. & Sanglerat, G. (1981). *Cours pratique de mécanique des sols* (Vol. 1 & 2). Dunod.
- Costet, J. et Sanglerat, G. (1981). Cours pratique de mécanique des sols (Vol. 1 & 2). Dunod.
- Craig, R. F., & Knappett, J. A. (2019). *Craig's Soil Mechanics*. CRC Press.
- Das, B. M. (2017). Principles of geotechnical engineering (9th ed.). Cengage Learning.
- Das, B. M., & Sobhan, K. (2014). *Principles of Geotechnical Engineering*. Cengage Learning.
- Direction des Statistiques et Analyses (DSA). (2021). Données statistiques sur la wilaya de Ghardaïa. Ministère de l'Intérieur, Algérie.
- D-maps.eu, URL : https://d-maps.eu/area.php?num_con=87&lang=ar
- Gambin, M. (1981). *L'utilisation de la consolidation dynamique pour la réalisation du nouveau port de pêche de Sfax en Tunisie*. Navires, Ports et Chantiers.
- Geotechnique. (2011). Caractérisation des matériaux constitutifs de plate-forme ferroviaire.
- Ghazal, M. (2023). Amélioration des performances mécaniques des mélanges sable-argile dans la région de Ghardaïa. Mémoire de Master non publié, Université de Laghouat.
- Hang, X. (1984). Étude comparative des sols argileux et sableux en génie civil. Revue de Génie Civil.
- Holtz, R. D., & Kovacs, W. D. (2011). *An Introduction to Geotechnical Engineering*. Pearson Education.
- Infociments. (2023). Traitement des sols aux liants hydrauliques. Consulté en 2023 sur
- Infociments. (2024). Le compactage des couches d'assise de chaussée.
- Keller (2000). *Les procédés de vibration profonde des sols*. Brochure 10-2 F, Germany.
- Laboratoire des Travaux Publics du Sud (LTPS). (2023). Manuel technique des essais géotechniques.

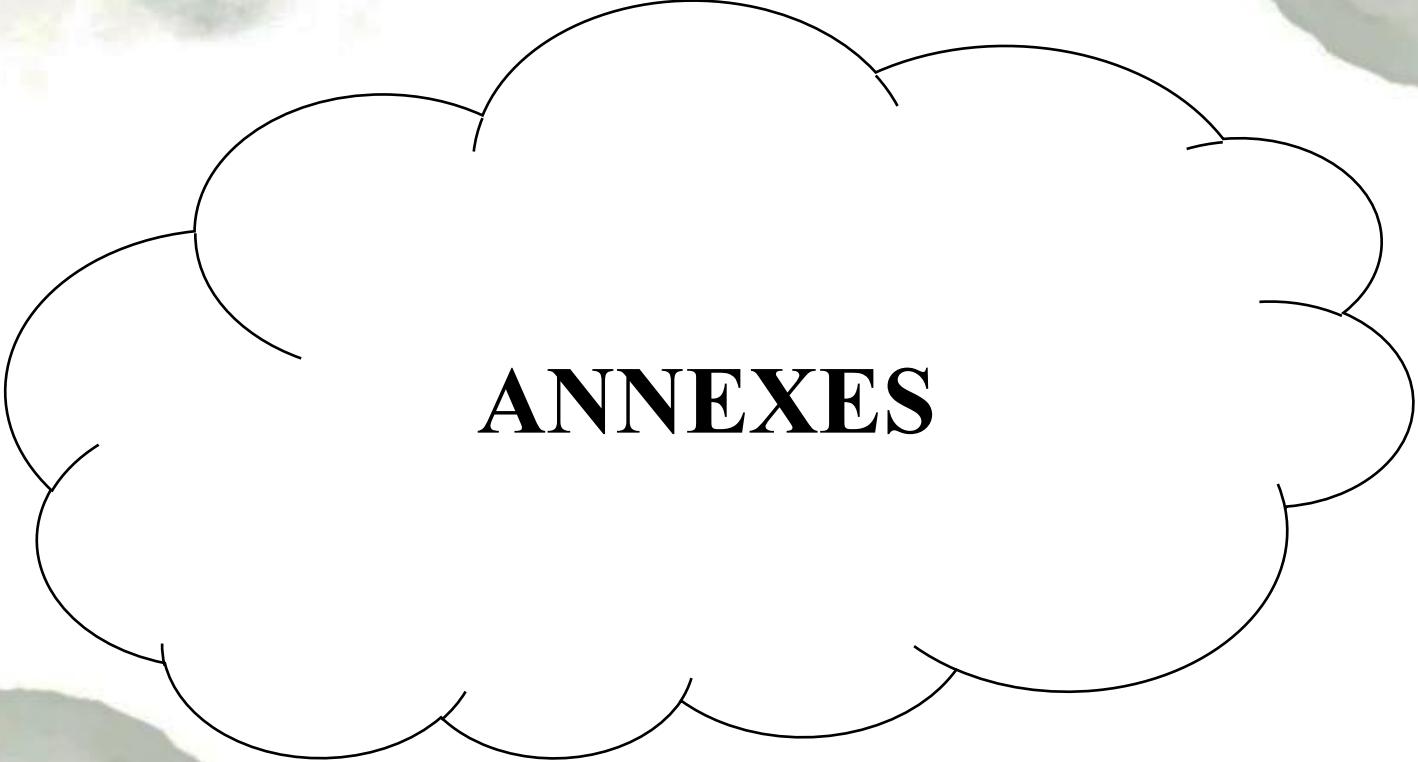
Référence bibliographie

- Lambe, T. W., & Whitman, R. V. (1969). *Soil Mechanics*. Wiley.
- Liausu, P., Iorio, J.P., Hartley, W.F. (2001). *Densification des sols affaissables par compactage dynamique*. Éditions Ponts Formation, Paris.
- Magnan, J.-P. (2015). Pratique du diagnostic des sols et fondations. Paris : Presses des Ponts et Chaussées.
- Manuel Technique S238-10. (s.d.). Table vibrante électromagnétique – Mode d’emploi. Fabricant : La précision des essais en laboratoire.
- Philipponnat, G. & Hubert, B. (2009). *Fondations et ouvrages en terre*. Eyrolles.
- Philipponnat, G. et Hubert, J. (2009). Mécanique des sols et des roches appliquée aux ouvrages de génie civil. Lavoisier.
- Rebaïne, F. (2015). *Étude de l'influence des paramètres de vibro-compaction sur les propriétés mécaniques des anodes crues en carbone*. Université du Québec à Chicoutimi.
- Rollings, R. S., & Rollings, M. P. (2009). *Geotechnical Materials in Construction*. McGraw-Hill Education.
- Serratrice, J.-F. , (2018). Compactage statique des sols : étude comparative en laboratoire .
- Serratrice. J.F, Soyez. B, (1996) ; « Les essais de gentlemen. Bulletin des laboratoires des ponts et chaussées ». N°204. Juillet –Août 1996-réf .4082, pp 65-85
- SETRA & LCPC. (1992). Guide des Terrassements Routiers . Paris : Ministère de l'Équipement, du Logement et des Transports.
- SETRA (ou Cerema). (2023). Guide des Terrassements Routiers (GTR).
- SETRA-LCPC. (1992). Guide des Terrassements Routiers (GTR). Paris: Ministère de l'Équipement, du Logement et des Transports.
- Skempton, A. W. (1953). The colloidal activity of clays. Proceedings of the 3rd International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering , Zurich, Switzerland, pp. 56–60.

Référence bibliographie

NORMES DES ESSAIS :

- ✓ NF P 94-056, mars 1996. Sols : reconnaissance et essai - Analyse granulométrique. Méthode par Tamisage à sec après lavage.
- ✓ NFP 94-068, Novembre 1993. Sols : reconnaissance et essai - Mesure de la quantité d'adsorption de bleu de méthylène d'un sol ou d'un matériau rocheux. Détermination de la valeur de bleu de Méthylène d'un sol ou d'un matériau rocheux par l'essai à la tache.
- ✓ NF P 94-051, mars 1993. Sols : reconnaissance et essai – Détermination des limites d'AtteBerg –Limite de liquidité à la coupelle- limite de plasticité au rouleau.
- ✓ AFNOR NF EN 933-8+A1. (2015) : Essais pour déterminer les caractéristiques géométriques des granulats - Partie 8 : évaluation des fines - Équivalent de sable.
- ✓ NF P 94-093, Décembre 1993. Sols : reconnaissance et essai - Détermination des caractéristiques de compactage d'un sol : essai Proctor normal, essai Proctor modifié.
- ✓ NF P 94-065 : Sols – Reconnaissance et essais – Méthode d'essai au compactomètre à table vibrante, AFNOR.



ANNEXES

ANNEXES

ANNEXES 1 : Méthylène sable de dune

Prise D'essai Mh =100 g			
Calcul de la Teneur en Eau			
Tare N°	5	8	
PT	117.66	116.84	
Ph+T	198.18	218.54	Volume de bleu injecté dans la prise d'essai V = 05 cm ³
PS+T	198.11	218.43	Valeur au bleu de la prise d'essai passant à :
ps	80.45	101.59	$V_b = V/Ms = 5 / 99.90 = 0.05$
W (%)	0.09	0.11	
W _{moy}	0.10		
Ps=ph×100 / 100 +w (%) PS = 99.90			

ANNEXES 2 : Essai Equivalent de sable de dune

		Essai n° 1	Essai n° 2	Moyenne
Sable de dune	h ₁ (cm)	104	105	87.1
	h ₂ (cm)	92	90	
	ES = $\frac{h_2}{h_1}$	88.5	85.7	

ANNEXES

ANNEXES 3 : Essai volume et bleu de méthylène d'argile Bouhraoua

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

ANNEXES

ANNEXES 4 : Limite d'Atterberg

LIMITE DE LIQUIDITÉ

	1 ^{er} Essai		2 ^{ème} Essai		3 ^{ème} Essai	
N° de la tare	S3	W9	F3	S1	X10	A14
Poids total humide	21.31	18.79	19.80	18.10	20.16	20.17
Poids total sec	17.59	16.26	16.76	15.99	16.91	17.04
Poids de la tare	14.04	13.86	13.81	13.95	13.68	13.93
Poids de l'eau	3.72	2.53	3.04	2.11	3.25	3.13
Poids du sol sec	3.55	2.4	2.95	2.04	3.23	3.11
Teneur en eau (%)	104.79	105.42	103.05	103.43	100.62	100.64
Moyenne	105.10		103.24		100.63	
LP = 102.72						

LIMITE DE PLASTICITE

	1 ^{er} Essai	2 ^{ème} Essai	3 ^{ème} Essai
N° de la tare	X2	G5	X10
Poids total humide	36.84	36.4	36.30
Poids total sec	36.52	36.11	36.03
Poids de la tare	35.84	35.50	35.47
Poids de l'eau	0.32	0.29	0.27
Poids du sol sec	0.68	0.61	0.56
Teneur en eau (%)	47.06	47.54	48.21
Moyenne	47.06	47.54	48.21
LP = 74.60			

ANNEXES

ANNEXES 5 : ANALYSE SEDIMENTOMETRIQUE

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

ANNEXES

ANNEXES 6 : ANALYSE GRANULOMETRIQUE DESSABLES

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

ANNEXES

ANNEXES 7: TABLEAU DE ESSAI PROCTOR MODIFIE

ESSAI PROCTOR MODIFIE Mélange 3 : 100% sable – 0% argile												
Poids d'eau ajoutée	4%		5%		6%		7%		8%		10%	
Poids total humide	7367		7402		7244		7478		7261		7495	
Poids du moule	3659		3866		3658		3866		3658		3866	
Poids du sol humide	3708		3536		3586		3612		3603		3629	
Poids du sol sec	3565.38		3367.62		3383.02		3375.70		3336.11		3299.09	
Volume du moule	2243		2104		2104		2104		2104		2104	
Densité sèche	1.59		1.60		1.61		1.60		1.59		1.57	
N de la tare	C10	I2	W39	S04	SM	54	S1	A14	K7	56	F19	O8
Poids total humide	134.5	145.6	152.3	130.9	100.8	140.7	127.1	188.1	135.7	122.3	121	100.4
Poids total sec	129.2	139.6	144.9	124.8	96.2	131.7	120.3	175.1	126.7	113.9	111.6	92.7
Poids de la tare	18	17.3	18.2	18	19.2	18.4	18.6	18.7	18.6	18.5	18.1	18.3
Poids de l'eau	5.30	6.00	7.40	6.10	4.60	9.00	6.80	13.00	9.00	8.40	9.40	7.70
Poids du sol sec	111.2	122.3	126.7	106.80	77.00	113.3	101.7	156.40	108.1	95.40	93.50	74.40
Teneur en eau	4.77	4.91	5.84	5.71	5.97	7.94	6.69	8.31	8.33	8.81	10.05	10.35
Moyenne	4.84		5.78		6.96		7.50		8.57		10.20	

ESSAI PROCTOR MODIFIE Mélange 2 : 90% sable – 10% argile												
Poids d'eau ajoutée	8 %		10 %		12 %		14 %		16 %		18 %	
Poids total humide	7357		7693.6		7860		7824.6		7960		7809	
Poids du moule	3652		3795		3678		3652		3795		3652	
Poids du sol humide	3705		3898.6		4182		4172.6		4165		4157	
Poids du sol sec	3430.56		3544.18		3733.93		3660.18		3590.52		3522.88	
Volume du moule	2104		2104		2104		2104		2104		2104	
Densité sèche	1.63		1.68		1.77		1.74		1.71		1.67	
N de la tare	S1	O8	K7	A14	C10	SM	54	56	F19	S04	W39	I2
Poids total humide	126.6	131.3	135.1	103.1	113.3	124.4	140.4	162.5	114.1	144.1	145.9	155.5
Poids total sec	118.8	122.7	124.4	95.4	103.9	113.4	124.9	145.6	100.5	126.1	126.1	134.5
Poids de la tare	18.6	18.3	18	18.7	18	19	18.1	17.8	18.5	18.8	18.3	17.3
Poids de l'eau	7.80	8.60	10.7	7.70	9.40	11.0	15.5	16.9	13.6	18.00	19.80	21.0
Poids du sol sec	100.2	104.4	106.4	76.70	85.9	94.4	106.8	127.8	82.0	107.3	107.8	117.2
Teneur en eau	7.78	8.24	10.06	10.04	10.94	11.65	14.51	13.22	16.59	16.78	18.37	17.92
Moyenne	8.01		10.05		11.30		13.87		16.68		18.14	

ANNEXES

ESSAI PROCTOR MODIFIE Mélange 4 : 50% sable – 50% argile											
Poids d'eau ajoutée	8	10		12		14		16		18	
Poids total humide	7765	8212		8190		30/05/20258336.		5		8218.3	8053
Poids du moule	3652	3866		3652		3866		3802		3866	
Poids du sol humide	4113	4346		4538		4470.5		4416.3		4187	
Poids du sol sec	3808.33	3950.91		4051.79		3921.49		3807.16		3548.31	
Volume du moule	2104	2104		2104		2104		2104		2104	
Densité sèche	1.95	2.07		2.16		2.12		2.10		1.99	
N de la tare	C10	I2	W39	S04	SM	54	S1	A14	K7	56	F19 O8
Poids total humide	121.3	108.9	128.6	141.7	135.9	116.3	138	142.2	114.5	131.4	126.5 136.7
Poids total sec	113.4	101.8	118.3	130.7	122.8	105.4	122.6	126.3	101	115.4	109.8 118.5
Poids de la tare	18	17.3	18.2	18	19.2	18.4	18.6	18.7	18.1	18	18.1 18.3
Poids de l'eau	7.90	7.10	10.30	11.00	13.10	10.90	15.40	15.90	13.50	16.00	16.70 18.20
Poids du sol sec	95.40	84.50	100.1	112.70	103.60	87.00	104.0	107.60	82.90	97.40	91.70 100.2
Teneur en eau	8.28	8.40	10.29	9.76	12.64	12.53	14.81	14.78	16.28	16.43	18.21 18.16
Moyenne	8.34	10.03		12.59		14.79		16.36		18.19	

ESSAI PROCTOR MODIFIE Mélange 3 : 70% sable – 30% argile											
Poids d'eau ajoutée	8 %	10 %		12 %		14 %		16 %		18 %	
Poids total humide	7975	8369		8344.4		8119.1		8025.1		7957.8	
Poids du moule	3652	3866		3678		3678		3678		3678	
Poids du sol humide	4323	4503		4666.4		4441.1		4347.1		4279.8	
Poids du sol sec	4002.78	4093.64		4166.43		3895.70		3747.50		3626.95	
Volume du moule	2104	2104		2104		2104		2104		2104	
Densité sèche	1.90	1.95		1.98		1.85		1.78		1.72	
N de la tare	MT	A14	56	O8	K7	SM	C10	W39	54	S1	I2 W4
Poids total humide	169.8	179.2	222.5	227.8	251	299	178	194	190.8	206.8	172.7 183.6
Poids total sec	158.4	167.1	203.2	208.8	224.9	269.9	158.3	172.2	166.7	180.4	148.5 158.5
Poids de la tare	16.8	18.8	18.4	18.3	18.1	19.2	18	18.2	18.1	18.4	17.3 18.4
Poids de l'eau	11.40	12.10	19.30	19.00	26.10	29.10	19.70	21.80	24.10	26.40	24.20 25.10
Poids du sol sec	141.6	148.30	184.8	190.50	206.8	250.7	140.3	154.0	148.6	162.00	131.2 140.1
Teneur en eau	8.05	8.16	10.44	9.97	12.62	11.61	14.04	14.16	16.22	16.30	18.45 17.92
Moyenne	8.10	10.21		12.11		14.10		16.26		18.18	

ANNEXES

ESSAI PROCTOR MODIFIE Mélange 5 : 30% sable – 70% argile												
Poids d'eau ajoutée	8 %		10 %		12 %		14 %		16 %		18 %	
Poids total humide	7788.5		8127.7		8434.8		8239.1		8180.9		8042.5	
Poids du moule	3652		3678		3795		3652		3678		3795	
Poids du sol humide	4136.5		4449.7		4639.8		4587.1		4502.9		4247.5	
Poids du sol sec	3830.09		4045.18		4142.68		4023.77		3881.81		3599.58	
Volume du moule	2104		2104		2104		2104		2104		2104	
Densité sèche	1.82		1.92		1.97		1.91		1.84		1.71	
N de la tare	MT	A9	W1	FM	C6	IV	ER	MS	CO	TS	A1	HI
Poids total humide	138.3	150.8	41.2	33.8	47.1	68.1	49.3	54.6	46.1	35.5	45.1	40.8
Poids total sec	129.2	140.6	38.2	31.4	42.9	61.8	44.3	49	40.4	31.4	39.4	35.9
Poids de la tare	16.8	18	8.5	8.5	8.5	8.4	8.5	8.5	8.4	7.8	8.3	8.6
Poids de l'eau	9.10	10.20	3.00	2.40	4.20	6.30	5.00	5.60	5.70	4.10	5.70	4.90
Poids du sol sec	112.4	122.6	29.7	22.90	34.40	53.40	35.80	40.50	32.00	23.60	31.10	27.30
Teneur en eau	8.10	8.32	10.1	10.48	12.21	11.80	13.97	13.83	17.81	17.37	18.33	17.95
Moyenne	8.21		10.29		12.00		13.90		17.59		18.14	

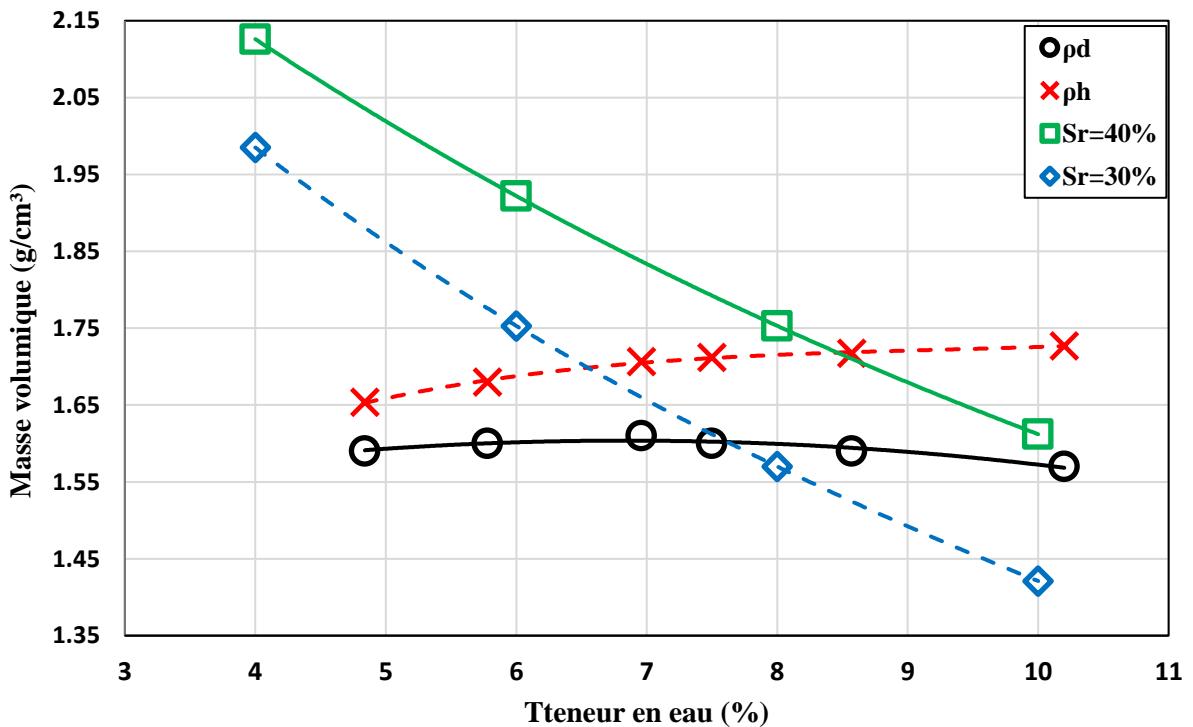
ESSAI PROCTOR MODIFIE Mélange 6 : 10% sable – 90% argile												
Poids d'eau ajoutée	8		10		12		14		16		18	
Poids total humide	7717.7		8156.6		8107.5		8483.6		8173		8250.5	
Poids du moule	3652		3866		3652		3866		3652		3866	
Poids du sol humide	4065.7		4290.6		4455.5		4617.6		4521		4384.5	
Poids du sol sec	3764.54		3900.55		3978.13		4050.53		3897.41		3715.68	
Volume du moule	2104		2104		2104		2104		2104		2104	
Densité sèche	1.79		1.85		1.89		1.93		1.85		1.77	
N de la tare	A14	S1	w39	C10	SM	56	k7	54	504	I2	A1	ER
Poids total humide	88.2	78.2	78.5	63.9	88.5	83.5	104.7	105.9	97.8	96.1	31.4	39.5
Poids total sec	82.8	73.8	72.9	59.7	80.4	77	93.6	95.4	86.3	85.3	27.7	34.9
Poids de la tare	18.8	18.5	18.3	18	19.1	17.9	18.1	18.4	18.9	17.3	8.3	8.6
Poids de l'eau	5.40	4.40	5.60	4.20	8.10	6.50	11.10	10.50	11.50	10.80	3.70	4.60
Poids du sol sec	64.00	55.30	54.6	41.70	61.30	59.10	75.50	77.00	67.40	68.00	19.40	26.30
Teneur en eau	8.44	7.96	10.26	10.07	13.21	11.00	14.70	13.64	17.06	15.88	19.07	17.49
Moyenne	8.20		10.16		12.11		14.17		16.47		18.28	

ANNEXES

ESSAI PROCTOR MODIFIE Mélange 7 : 0% sable – 100% argile											
Poids d'eau ajoutée	10%	12%	14%	16%	18%	20%					
Poids total humide	7538	7734	7689	7978	7723	7857					
Poids du moule	3659	3866	3658	3866	3658	3866					
Poids du sol humide	3879	3868	4031	4112	4065	3991					
Poids du sol sec	3526.36	3453.57	3535.96	3544.83	3444.92	3325.83					
Volume du moule	2243	2104	2104	2104	2104	2104					
Densité sèche	1.57	1.64	1.68	1.68	1.64	1.58					
N de la tare	56	O8	K7	SM	C10	W39	54	S1	I2	W4	MT
Poids total humide	152.3	130.9	102	144	127.2	188	128	122	121	100	134.5
Poids total sec	139.5	120.6	92.9	129.9	113.1	167.1	112.6	107.4	104.7	87.3	114.5
Poids de la tare	18.4	18.3	18.1	19.2	18	18.2	18.1	18.4	17.3	18.4	16.8
Poids de l'eau	12.80	10.30	9.10	14.10	14.10	20.90	15.40	14.60	16.30	12.70	20.00
Poids du sol sec	121.1	102.3	74.8	110.70	95.10	148.9	94.50	89.00	87.40	68.90	97.70
Teneur en eau	10.57	10.07	12.17	12.74	14.83	14.04	16.30	16.40	18.65	18.43	20.47
Moyenne	10.32		12.45		14.43		16.35		18.54		20.44

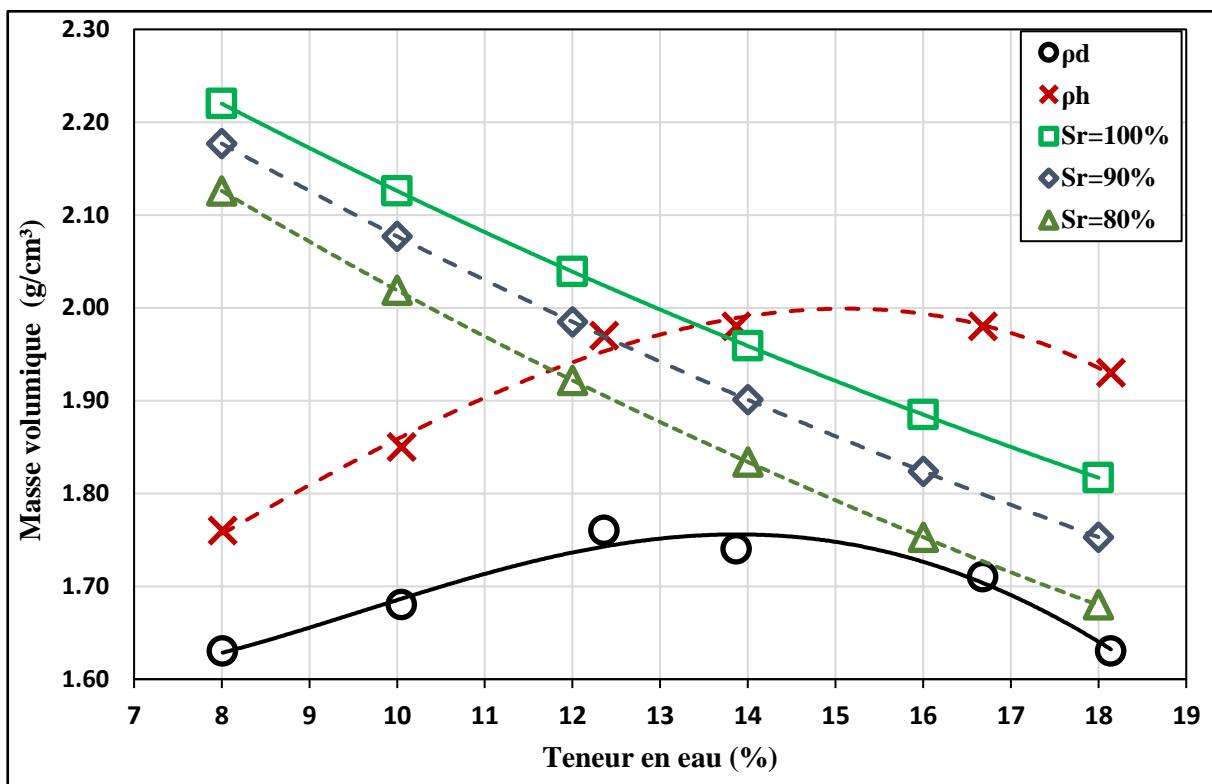
ANNEXES 8: COURBE DE ESSAI PROCTOR MODIFIE

Mélange : 100 % sable – 0 % argile

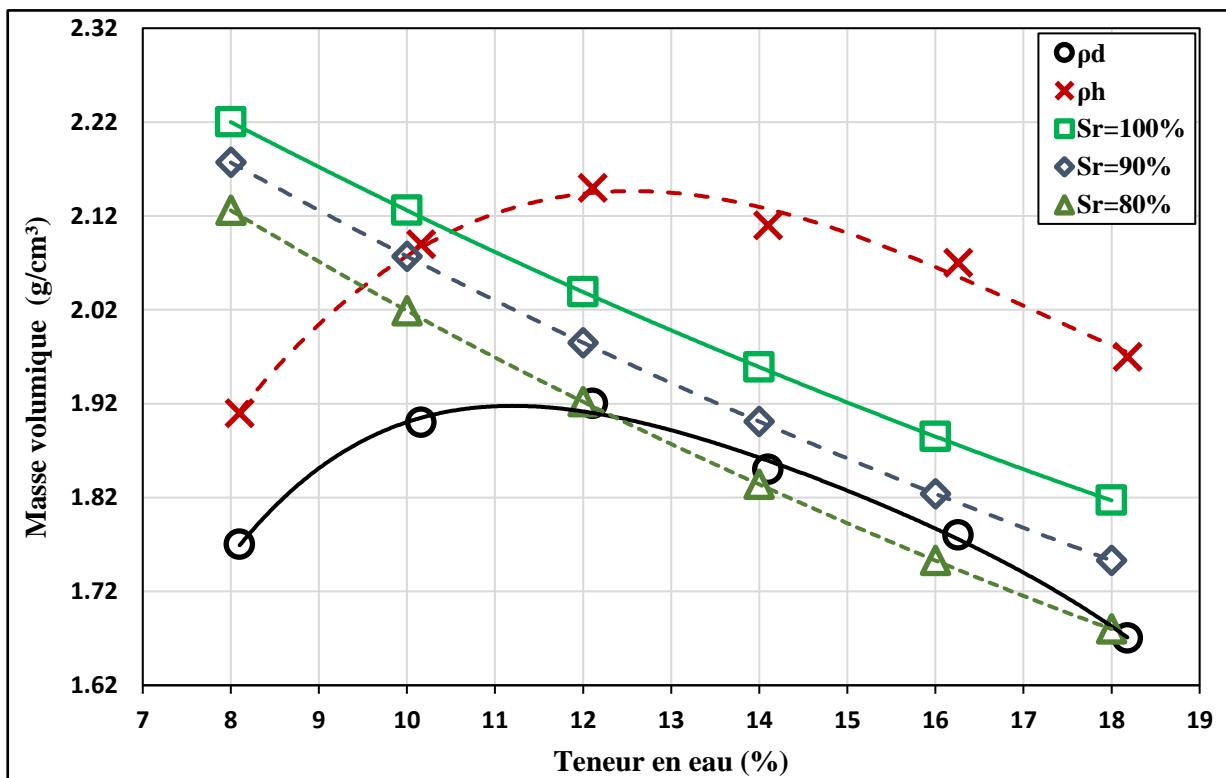


ANNEXES

Mélange : 90 % sable – 10 % argile

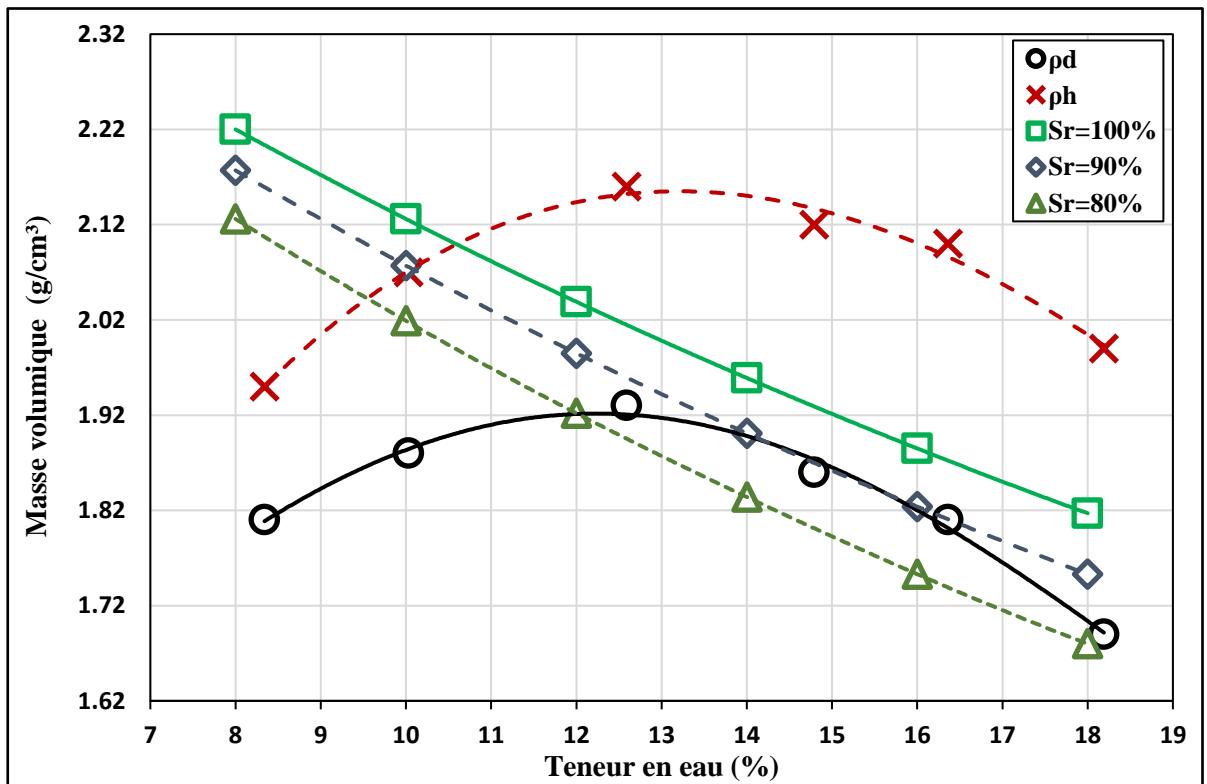


Mélange : 70 % sable – 30 % argile

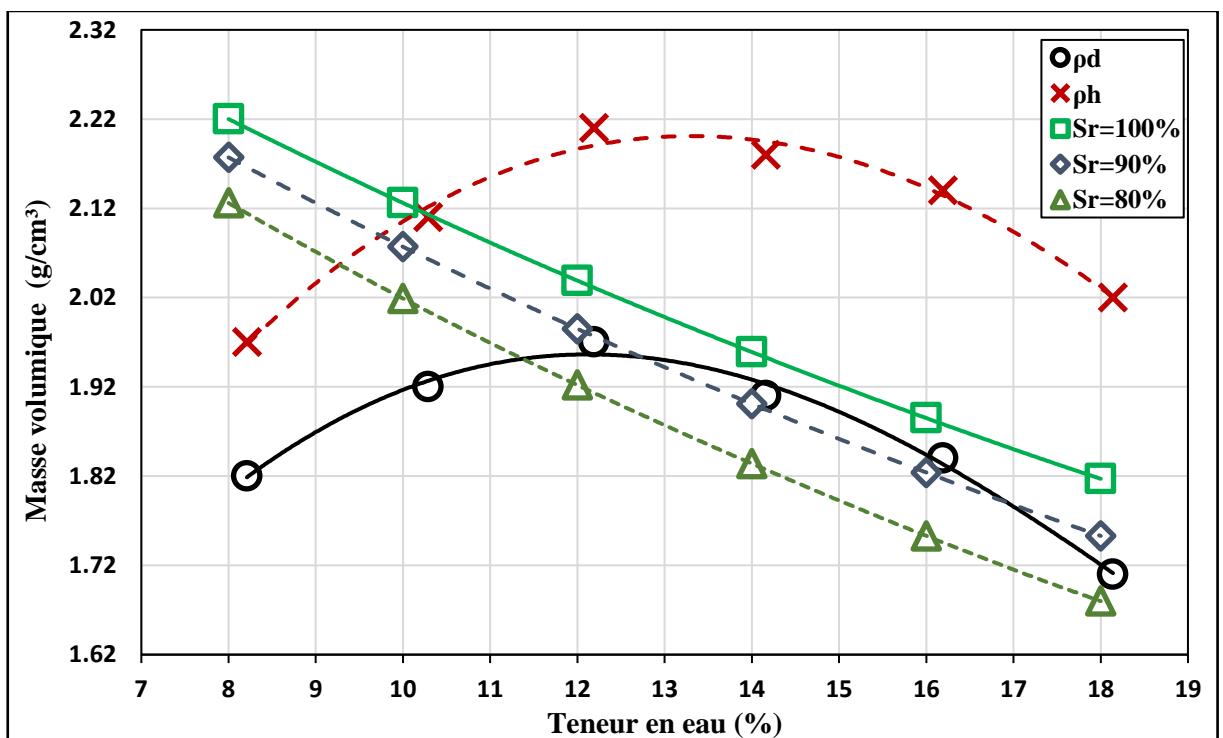


ANNEXES

Mélange : 50 % sable – 50 % argile

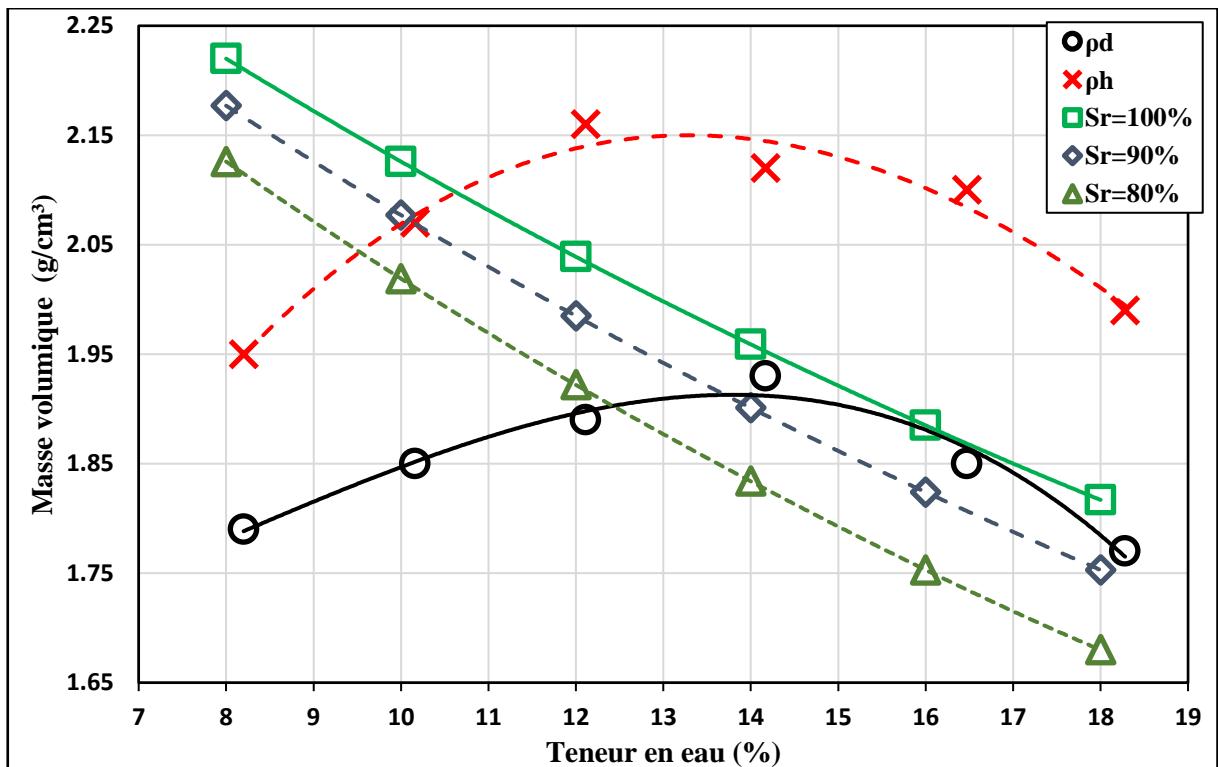


Mélange : 30 % sable – 70 % argile

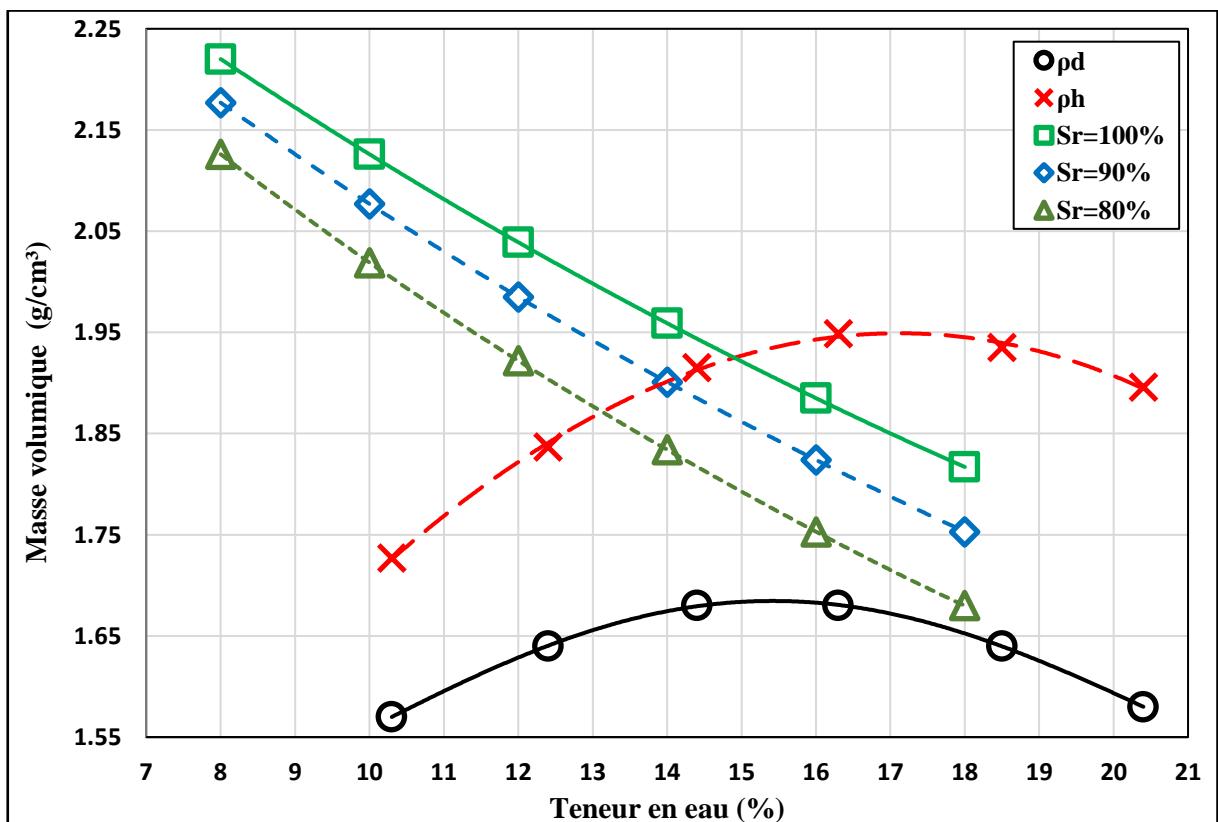


ANNEXES

Mélange : 10 % sable – 90 % argile



Mélange : 0 % sable – 100 % argile



ANNEXES

ANNEXES 9 : TABLEAU DE ESSAI TABLE VIBRATION

ESSAI Table de vibration Mélange : 100% sable – 0 % argile														
Poids d'eau ajoutée	4%		5%		6%		7%		8%		9%		10%	
Poids total humid (g)	12519		12550.2		12582.4		12613		12684.4		12723		12754.6	
Poids du moule (g)	9380.4		9380.4		9380.4		9380.4		9380.4		9380.4		9381.4	
La masse (g)	3138.6		3169.8		3202		3232.6		3304		3342.6		3373.2	
H moule (cm)	15.5		15.5		15.5		15.5		15.5		15.5		15.5	
H Longueur de l'immersion (cm)	4.3		4.3		4.3		4.3		4.15		4.1		4.1	
H sol (cm)	11.2		11.2		11.2		11.2		11.35		11.4		11.4	
Volume du sol (cm ³)	2031.30		2031.30		2031.30		2031.30		2058.51		2067.58		2067.58	
ρ humide	1.55		1.56		1.58		1.59		1.61		1.62		1.63	
ρ Densité	1.49		1.49		1.49		1.49		1.49		1.48		1.48	
Poids total humid	I2	54	C10	SM	A14	S1	ER	A1	A14	S1	54	SM	O8	W39
Poids total sec	81.9	75.3	87.4	93.4	105.2	102.8	140.8	120.4	114.4	111.6	107.8	127.7	112.4	123.5
Poids de la tare	79.4	72.3	83.4	89.5	99.4	97.5	132.2	113.3	106.9	104.2	99.8	118.1	103.8	113.9
Poids de l'eau	18.5	18.5	17.7	18.4	18.7	18.8	18.4	18.7	18.8	18.5	18.3	18.7	18	18.2
Poids du sol sec	2.5	3	4	3.9	5.8	5.3	8.6	7.1	7.5	7.4	8	9.6	8.6	9.6
Teneur en eau	60.9	53.8	65.7	71.1	80.7	78.7	113.8	94.6	88.1	85.7	81.5	99.4	85.8	95.7
Moyenne	4.84		5.79		6.96		7.53		8.57		9.74		10.03	

ESSAI Table de vibration Mélange : 90 % sable – 10 % argile																		
Poids d'eau ajoutée	8%		10%		12%		14%		16%		18%		20%		22%		24%	
Poids total humid (g)	13034.8	13059.9		13560.2		13039.8		13861.4		13750.3		13859.7		13759.7		13708.7		
Poids du moule (g)	9380.4	9380.4		9380.4		9380.4		9380.4		9380.4		9380.4		9380.4		9380.4		
La masse (g)	3654.4	3678.5		4179.8		3659.4		4481		4369.9		4479.3		4379.3		4328.3		
H moule (cm)	15.5	15.5		15.5		15.5		15.5		15.5		15.5		15.5		15.5		
H Longueur de l'immersion (cm)	3	3.5		2.3		4.3		2.25		2.8		2.7		2.5		2.4		
H sol (cm)	12.5	12		13.2		11.2		13.25		12.7		12.8		13		13.1		
Volume du sol (cm ³)	2267.08		2176.40		2394.04		2031.30		2403.10		2303.35		2321.49		2357.76		2375.90	
ρ humide	1.61		1.69		1.75		1.80		1.86		1.90		1.93		1.86		1.82	
ρ Densité	1.49		1.54		1.56		1.58		1.61		1.61		1.55		1.52			
Poids total humid	82.1	75.3	87.4	93.4	105.2	102.8	40.8	30.4	114.4	111.6	107.8	127.7	113.4	123.5	132.3	139.7	150.1	154.5
Poids total sec	75.1	73	80.8	86.3	95.4	93.5	36.8	27.6	100.8	98.7	98	105.9	98.4	104.8	111.2	117.6	124	127.4
Poids de la tare	18.5	18.4	18	18.8	18.7	18.8	8.4	8.5	18.7	18.4	18.3	18.8	18.3	18.2	18.1	18	17.9	17.8
Poids de l'eau	7	2.3	6.6	7.1	9.8	9.3	4	2.8	13.6	12.9	9.8	21.8	15	18.7	21.1	22.1	26.1	27.1
Poids du sol sec	56.6	54.6	62.8	67.5	76.7	74.7	28.4	19.1	82.1	80.3	79.7	87.1	80.1	86.6	93.1	99.6	106.1	109.6
Teneur en eau	12.37	4.212	10.51	10.52	12.78	12.45	14.08	14.66	16.57	16.06	12.3	25.03	18.73	21.59	22.66	22.19	24.6	24.73
Moyenne	8.29		10.51		12.61		14.37		16.31		18.66		20.16		22.43		24.66	

ANNEXES

ESSAI Table de vibration Mélange : 70 % sable – 30 % argile																				
Poids d'eau ajoutée	8%		10%		12%		14%		16%		18%		20%		22%		24%		26%	
Poids total humid (g)	12569.60	12711.60	12870.80	12961.20	13230.30	13378.40	13560.00	13698.00	13823.00	13816.00	9380.40	9380.40	9380.40	9381.40	9381.40	9381.40	9381.40	9381.40	9381.40	
Poids du moule (g)																				
La masse (g)	3189.20	3331.20	3490.40	3580.80	3849.90	3998.00	4178.60	4316.60	4441.60	4441.60	15.50	15.50	15.50	15.50	15.50	15.50	15.50	15.50	15.50	
H moule (cm)	15.50	15.50	15.50	15.50	15.50	15.50	15.50	15.50	15.50	15.50	15.50	15.50	15.50	15.50	15.50	15.50	15.50	15.50	15.50	
H Longueur de l'immersion (cm)	4.40	4.50	4.20	4.30	3.90	3.70	3.40	3.20	2.90	2.60										
H sol (cm)	11.10	11.00	11.30	11.20	11.60	11.80	12.10	12.30	12.60	12.90										
Volume du sol (cm ³)	2013.17	1995.03	2049.44	2031.30	2103.85	2140.12	2194.53	2230.81	2285.22	2339.63										
p humid	1.58	1.67	1.70	1.76	1.83	1.87	1.90	1.93	1.94	1.90										
p Densité	1.47	1.52	1.52	1.55	1.58	1.58	1.59	1.59	1.57	1.50										
N de la tare	MT	504	O8	S6	I2	C10	W39	I29	A1	ER	A9	F1	SM	S1	SV	S2	TM	S3	TM	S4
Poids total humid	77.2	72.4	74.6	65.2	59.1	75.7	90.9	91	37.1	41	94	93.1	175.2	151.5	127.8	104.1	84.4	66.7	49	31.3
Poids total sec	72.6	68.4	69.6	60.6	54.5	69.5	82.4	81.5	33.2	36.3	82.4	81.3	149.5	128.6	107.7	89.2	71.7	57.2	42.7	28.2
Poids de la tare	18.9	18.9	18	18	17.2	18	18.2	18.8	8.3	8.5	17.9	18.4	18.5	19.1	19.7	19.3	19	18.3	17.6	16.9
Poids de l'eau	4.6	4	5	4.6	4.6	6.2	8.5	9.5	3.9	4.7	11.6	11.8	25.7	22.9	20.1	14.9	12.7	9.5	6.3	3.1
Poids du sol sec	53.7	49.5	51.6	42.6	37.3	51.5	64.2	62.7	24.9	27.8	64.5	62.9	131	109.5	88	69.9	52.7	38.9	25.1	11.3
Teneur en eau	8.566	8.081	9.69	10.8	12.33	12.04	13.24	15.15	15.66	16.91	17.98	18.76	19.62	20.91	22.84	21.32	24.1	24.42	25.1	27.43
Moyenne																				

ESSAI Table de vibration Mélange : 50 % sable – 50 % argile																			
Poids d'eau ajoutée	10%		12%		14%		16%		18%		20%		22%						
Poids total humid (g)	13242.5		13422.5		13602.5		13788.8		14024.7		14204.8		14134.8						
Poids du moule (g)	9380.4		9380.4		9380.4		9380.4		9380.4		9380.4		9380.4						
La masse (g)	3862.1		4042.1		4222.1		4408.4		4644.3		4824.4		4754.4						
H moule (cm)	15.5		15.5		15.5		15.5		15.5		15.5		15.5						
H Longueur de l'immersion (cm)	3.7		3.6		3.5		3.2		2.8		2.5		2.4						
H sol (cm)	11.8		11.9		12		12.3		12.7		13		13.1						
Volume du sol (cm ³)	2140.12		2158.26		2176.40		2230.81		2303.35		2357.76		2375.90						
p humid	1.80		1.87		1.94		1.98		2.02		2.05		2.00						
p Densité	1.64		1.67		1.70		1.70		1.71		1.71		1.64						
N de la tare	A12	54	A13	54	A14	54	C10	W39	C11	W40	C12	W41	C13	W42					
Poids total humid	126.5	118.9	111.3	103.7	96.1	88.5	78.9	98.9	118.9	138.9	158.9	178.9	198.9	218.9					
Poids total sec	115.4	110.8	101.6	94.2	86.4	79.7	70.6	87.5	103.4	120.3	135.6	151.9	166.5	182.2					
Poids de la tare	20.4	20	19.6	19.2	18.8	18.4	18	18.4	18.8	19.2	19.6	20	20.4	20.8					
Poids de l'eau	11.1	8.1	9.7	9.5	9.7	8.8	8.3	11.4	15.5	18.6	23.3	27	32.4	36.7					
Poids du sol sec	95	90.8	82	75	67.6	61.3	52.6	69.1	84.6	101.1	116	131.9	146.1	161.4					
Teneur en eau	11.68	8.921	11.83	12.67	14.35	14.36	15.78	16.5	18.32	18.4	20.09	20.47	22.18	22.74					
Moyenne	10.30		12.25		14.35		16.14		18.36		20.28		22.46						

ANNEXES

ESSAI Table de vibration Mélange : 30 % sable – 70 % argile														
Poids d'eau ajoutée	12%		14%		16%		18%		20%		22%			
Poids total humid (g)	13165.2		13588.6		13885.3		14038.8		14209.7		14282			
Poids du moule (g)	9380.4		9380.4		9380.4		9380.4		9380.4		9380.4			
La masse (g)	3784.8		4208.2		4504.9		4658.4		4829.3		4901.6			
H moule (cm)	15.5		15.5		15.5		15.5		15.5		15.5			
H Longueur de l'immersion (cm)	2.5		2.2		1.9		1.7		1.4		1.3			
H sol (cm ³)	13		13.3		13.6		13.8		14.1		14.2			
Volume du sol (cm ³)	2357.76		2412.17		2466.58		2502.86		2557.27		2575.40			
humid	1.61		1.74		1.83		1.86		1.89		1.90			
Densité	1.43		1.53		1.57		1.58		1.57		1.56			
N de la tare	54	A14	V4	IV	54	A14	MF	SD	W39	C10	O8	56	O9	56
Poids total humid	113	123.5	30.4	27.9	75.9	92.3	116	132.1	125.8	139.2	120.6	128.7	136.8	144.9
Poids total sec	102.3	111.9	27.6	25.5	67.7	81.8	100.6	114.6	107.5	118.5	102	108.3	113.6	119.9
Poids de la tare	18.4	18.8	8.4	8.8	18.4	18.8	19.2	19.6	18.4	18	18.3	18	17.7	17.4
Poids de l'eau	10.2	11.6	2.8	2.4	8.2	10.5	15.1	17.5	18.3	20.7	18.6	20.4	23.2	25
Poids du sol sec	83.9	93.1	19.2	16.7	49.3	63	81.4	95	89.1	100.5	83.7	90.3	95.9	102.5
Teneur en eau	12.16	12.46	14.58	14.37	16.63	16.67	18.55	18.42	20.54	20.60	22.22	22.59	24.19	24.39
Moyenne	12.31		14.48		16.65		18.49		20.57		22.41		24.29	

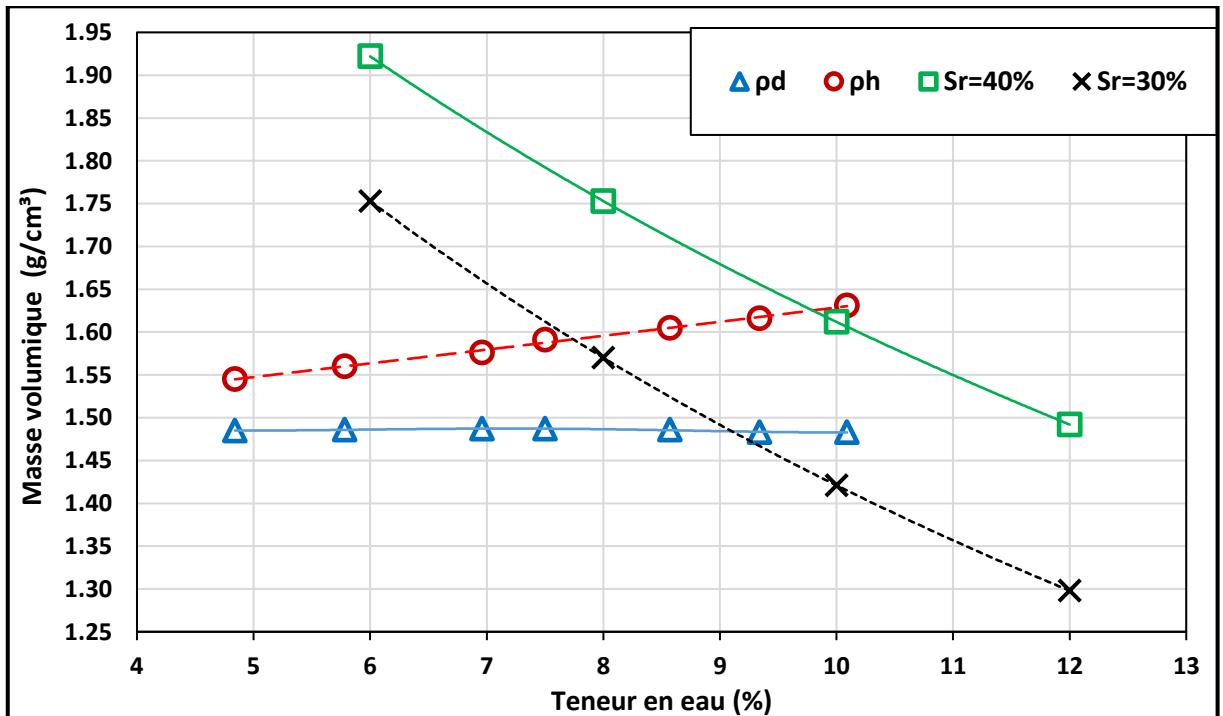
ESSAI Table de vibration Mélange : 10 % sable – 90 % argile														
Poids d'eau ajoutée	12%		14%		16%		18%		20%		22%			
Poids total humid (g)	12802.8		13102.4		13270.4		13606.3		13762.8		13858.9			
Poids du moule (g)	9380.4		9380.4		9380.4		9380.4		9380.4		9380.4			
La masse (g)	3422.4		3722		3890		4225.9		4382.4		4478.5			
H moule (cm)	15.5		15.5		15.5		15.5		15.5		15.5			
H Longueur de l'immersion (cm)	4.2		3.8		3.5		3.2		2.9		2.8			
H sol (cm)	11.3		11.7		12		12.3		12.6		12.7			
Volume du sol (cm ³)	2049.44		2121.99		2176.40		2230.81		2285.22		2303.35			
P humid	1.67		1.75		1.79		1.89		1.92		1.94			
P Densité	1.49		1.54		1.54		1.61		1.60		1.59			
N de la tare	P3	X2	F13	S1	Q12	Z3	F13	S1	Q12	Z3	M18	K8	M19	K9
Poids total humid	118.3	112.8	130.3	112.4	89.4	95.4	130.3	112.4	89.4	95	136.4	142.8	150.9	157.6
Poids total sec	107.5	102.3	116.3	100.6	79.4	84.4	113.5	97.6	77.3	81.8	115	120.1	125.2	130.3
Poids de la tare	18.3	18.6	18.8	18.7	17.9	18.8	18.8	18.7	17.9	18.4	18.9	19	19.1	19.2
Poids de l'eau	10.8	10.5	14	11.8	10	11	16.8	14.8	12.1	13.2	21.4	22.7	25.7	27.3
Poids du sol sec	89.2	83.7	97.5	81.9	61.5	65.6	94.7	78.9	59.4	63.4	96.1	101.1	106.1	111.1
Teneur en eau	12.11	12.54	14.36	14.41	16.26	16.77	17.74	18.76	20.37	20.82	22.27	22.45	24.22	24.57
Moyenne	12.33		14.38		16.51		18.25		20.60		22.36		24.40	

ANNEXES

ESSAI Table de vibration Mélange : 0 % sable – 10 % argile												
Poids d'eau ajoutée	16%		18%		20%		22%		24%			
Poids total humid (g)	12403.7		12893.7		12988.4		12974		13098.7			
Poids du moule (g)	9380.4		9380.4		9380.4		9380.4		9380.4			
La masse (g)	3023.3		3513.3		3608		3593.6		3718.3			
H moule (cm)	15.5		15.5		15.5		15.5		15.5			
H Longueur de l'immersion (cm)	2.2		2.9		3.3		3.7		3.5			
H sol (cm)	13.3		12.6		12.2		11.8		12			
Volume du sol (cm ³)	2412.17		2285.22		2212.67		2140.12		2176.40			
P humid	1.25		1.54		1.63		1.68		1.71			
P Densité	1.25		1.30		1.36		1.38		1.38			
N de la tare	I2	54	I2	54	56	W39	56	W39	O8	504	O8	504
Poids total humid	132	111.3	133	109.6	147.3	146.5	147.3	146.5	111.6	148.1	111.6	148.1
Poids total sec	115.8	98.4	115.8	95.2	125.6	124.8	124.1	122.8	93.2	122.8	92.4	120.8
Poids de la tare	18.8	18.4	18.8	18.4	18.5	18.2	18.5	18.2	18.3	18.8	18.3	18.8
Poids de l'eau	16.4	12.9	17.4	14.4	21.7	21.7	23.2	23.7	18.4	25.3	19.2	27.3
Poids du sol sec	97	80	97	76.8	107.1	106.6	105.6	104.6	74.9	104	74.1	102
Teneur en eau	16.91	16.13	17.94	18.75	20.26	20.36	21.97	22.66	24.57	24.33	25.91	26.76
Moyenne	16.52		18.34		20.31		22.31		24.45		26.34	

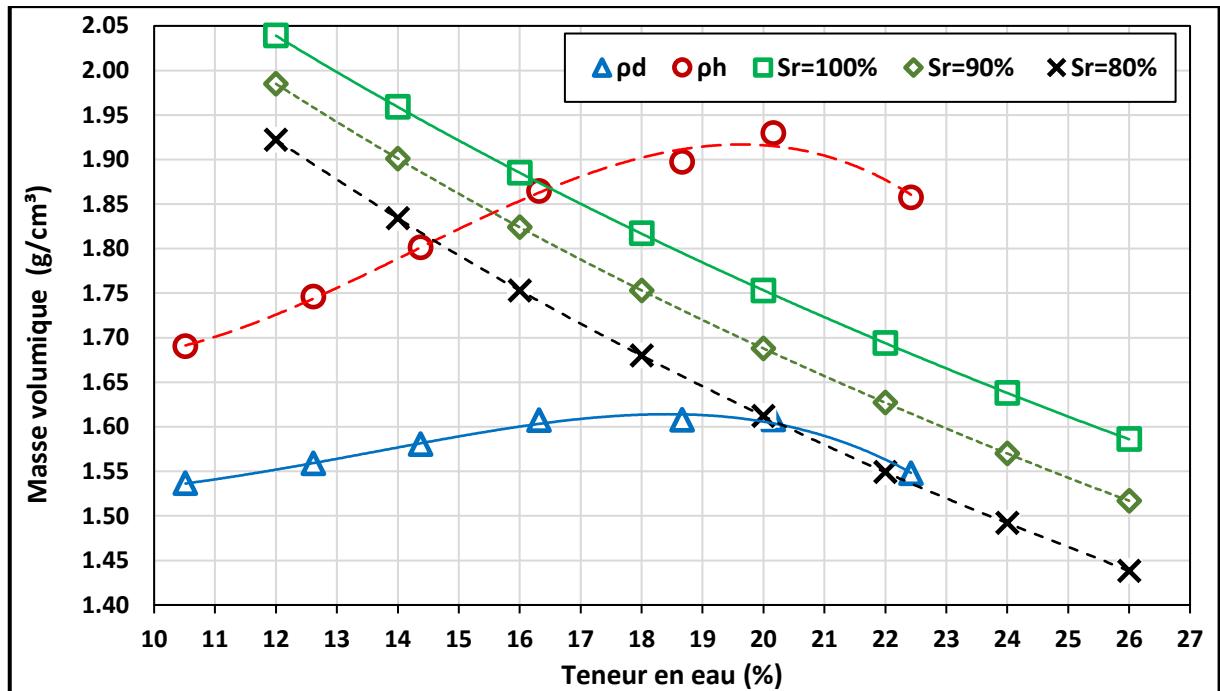
ANNEXES 10 : COURBE DE ESSIA TABLE VIBRATION

Mélange : 100 % sable – 0 % argile

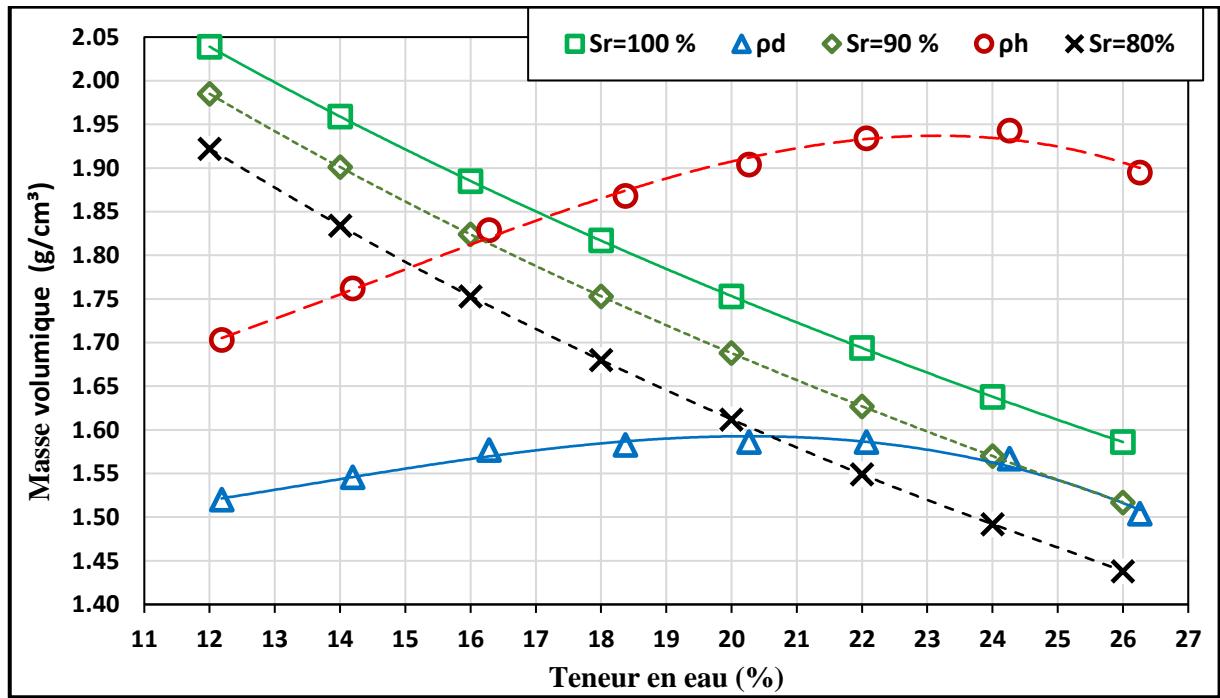


ANNEXES

Mélange : 90 % sable – 10 % argile

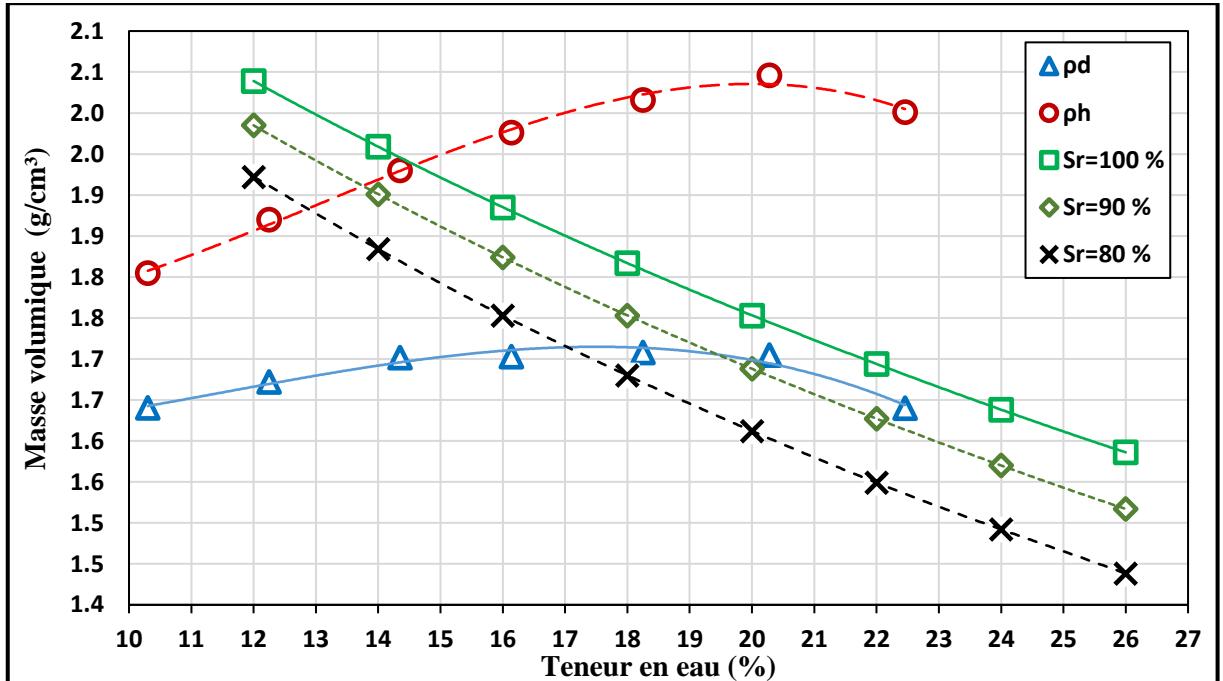


Mélange : 70 % sable – 30 % argile

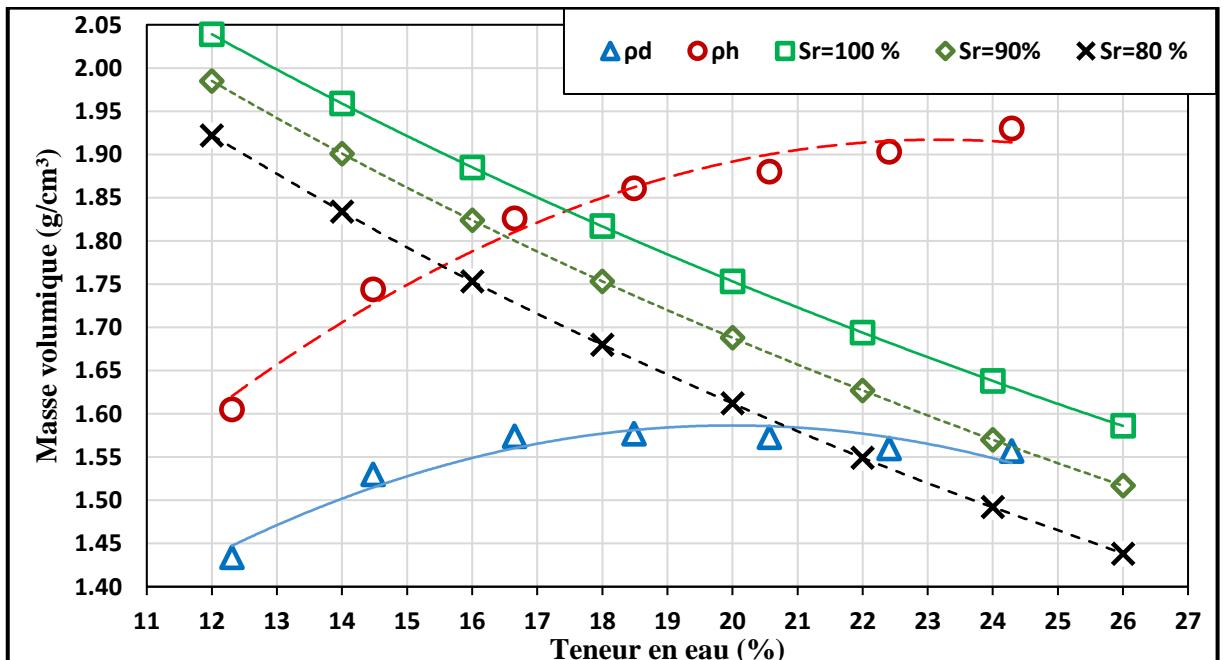


ANNEXES

Mélange : 50 % sable – 50 % argile

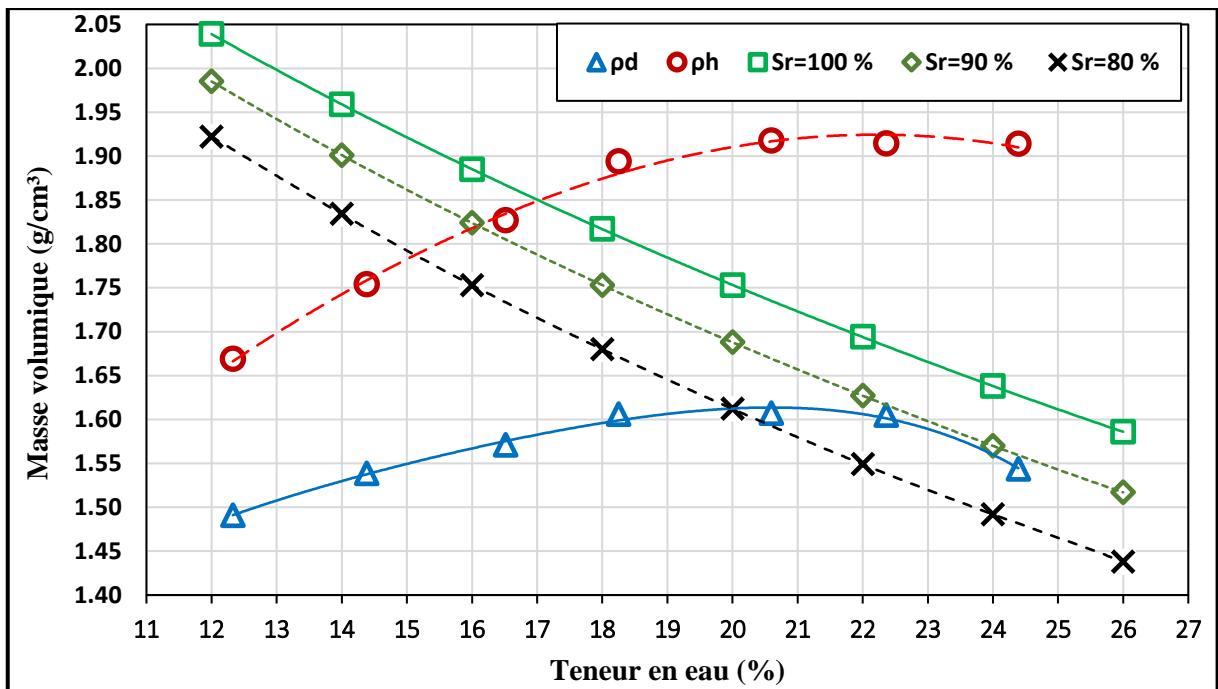


Mélange : 30 % sable – 70 % argile

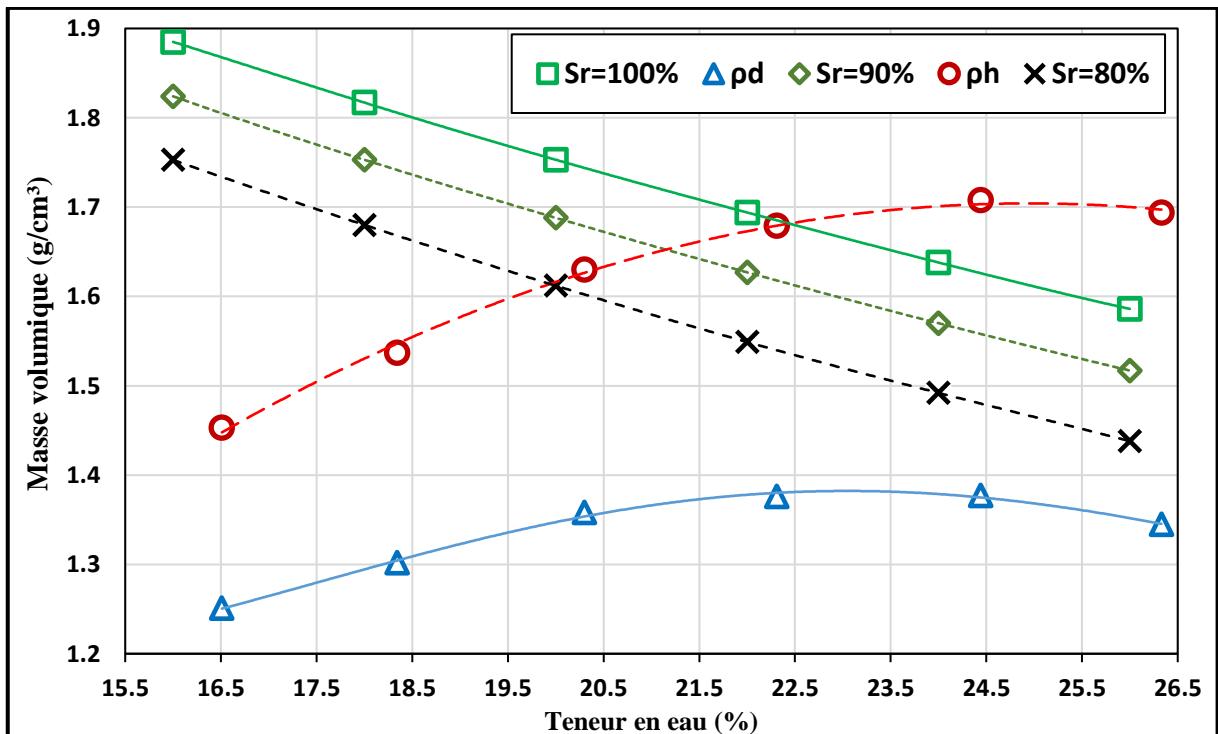


ANNEXES

Mélange : 10 % sable – 90 % argile



Mélange : 0 % sable – 100 % argile



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



كلية العلوم و التكنولوجيا
قسم الري و الهندسة المدنية

ترخيص يادع مذكرة الماستر

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

الطالب(ة): يوطبة ابراهيم وصلاح سفيان

الشعبة: هندسة مدنية

التخصص: هيكل

نحو الأستاذة

الإمضاء	الصفة	الرتبة والجامعة الأصلية أو المؤسسة	الاسم واللقب
	رئيس	أستاذ محاضر أ (جامعة غردية)	عزيز محمد نجيب
	ممتحن	أستاذ محاضر أ (جامعة غردية)	دمدوم عبد الله
	مؤطر	أستاذ مساعد أ (جامعة غردية)	عزوز فاطمة الزهراء

نر خص يابداع النسخة النهائية لمذكرة الماستر يعني ان:

ETUDE COMPARATIVE ENTRE DEUX MODES DE COMPACTAGE D'UN MATERIAU LOCAL

أشهد أن الطالبة قد قام /قاموا بالتعديلات والتصحيحات المطلوبة من طرف لجنة المناقشة

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

القسم، أنس، مصادقة



امضاء المسئول عن التصديق