REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE YAHIA FARES DE MEDEA

Faculté de **T**echnologie

Mémoire de fin d'études de Master

Filière : Génie Civil

Spécialité : Géotechnique

Thème

ETUDE DE COMPACTAGE À SEC EN ZONES ARIDES ET SEMI-ARIDES

Préparé et présenté par,

SKENDER Mohamed Islem

IRKI Yacine

Proposé et dirigé par,

Dr. KHIATINE Mohamed

Promotion juin 2022



Remerciements

Nous tenons tout d'abord à remercier Dieu le Tout puissant et miséricordieux, qui nous a donné la force nécessaire et la patience d'accomplir ce modeste travail.

En second lieu, nous tenons à remercier notre encadreur Dr. KHIATINE Mohamed pour leurs précieux conseils, orientation et aide durant la période du travail.

En troisième lieux, nous tenons à remercier tous les enseignants durant le cycle de formation universitaire de l'université Yahia Farés de Médéa « Département de Génie Civil ».

Nos vifs remerciements vont également aux membres du jury pour l'intérêt qu'ils ont porté à notre recherche en acceptant d'examiner notre travail et de l'enrichir par leurs propositions.

Enfin, nous tenons également à remercier toutes les personnes qui ont participé de près ou de loin à la réalisation de ce travail.





Dédicaces

Je rends grâce à Dieu de m'avoir donné le courage et la volonté ainsi que la conscience pour venir à terme de mes études

Je dédie ce modeste travail :

Mes très chers parents. En témoignage de l'amour, du respect et de la gratitude que lui je porte " que dieu vous garde et vous protégée'

Ma chère grand-mère et mon cher grand-père

Ma très chère sœur et mes très chers frères Hichem et Fodhil. Ma très chère femme.

Toutes mes familles Skender et Rahmani.

Toutes mes fidèles amis sans exception.

Tous mes enseignants et surtout notre promoteur.

À mon binôme Yacine.

Islem



Dédicaces

Je rends grâce à Dieu de m'avoir donné le courage et la volonté ainsi que la conscience pour venir à terme de mes études

Je dédie ce modeste travail :

A mes très chers parents

A mes frères et sœurs

A tous mes proches

Yacine

الملخص

توجد في الجزائر مناطق قاحلة وشبه قاحلة . و تعتبر ندرة المياه أحد المعوقات الأساسية أمام بناء الطرق في هذه المناطق. وقد أظهرت التجربة أنه غالبا ما تبلغ تكلفة المياه المخصصة لعملية رص المواد المستعملة في بناء جسم الطريق أكثر من ثلث تكلفة مشروع الطريق. في ظل هذه الظروف فإنه من الواضح أن رص المواد المستعملة في بناء الطرق بنسبة مياه أو رطوبة منخفضة سيعود بمنافع ومكاسب اقتصادية و اجتماعية مؤكدة.

مساهمة هذا العمل هو المشاركة في الجهود البحتية الهادفة إلى التطبيق العملي لهذه التقنية (الرص بنسبة مياه منخفضة) وتطبيقها.يعد تحليل تقنية الرص منخفض الماء في المختبر إحدى المحاولات لتحديد الظروف المناسبة لصلاحيتها.تحقيقا لهذه الغاية ، نقوم بإنجاز تجارب رص حسب أنماط مختلفة على تربة مختارة، دارسين دلائلها على مردودية الرص، مستعينين بتغير كثافة التربة المتراصة بدلالة العمق. استنادا إلى نتائج الدراسات العلمية السابقة و هذه الدراسة، فإن إمكانية الرص بنسبة مياه منخفضة مرتبط بتضافر شروط تخص الاختيار الأمثل لنوعية التربة ونوعية الرص. و يبقى أن تؤكد نتائج هذه الدراسة على أتربة مختلفة في المخبر و في الميدان .

كلمات مفتاحية : رص التربة، المناطق القاحلة، رص التربة بنسبة رطوبة منخفضة، محتوى الماء.

Résumé

En algérie il y a des régions arides et semi-arides. La construction des chaussées dans ces zones est handicapée par la rareté de l'eau. L'expérience a montré que, le coût de l'eau nécessaire au compactage des matériaux peut être au prés de tiers du prix de revient d'une infrastructure routière. Dans ces conditions il est clair que le compactage à faible teneur en eau des matériaux routiers peut représenter un potentiel socio-économique certain.

La proposition proposée dans cette thèse contribue aux efforts de recherche visant à mettre cette technique en pratique.

Nous tentons de déterminer les conditions de sa faisabilité pratique en examinant en laboratoire la technique de compactage à faible teneur en eau.

Pour cela, nous effectuons des essais de compactage sur un sol choisi en utilisant plusieurs configurations d'essais. Et on étudie l'expression des différentes conditions testées sur le rendement du compactage, explicité en termes de profil de densité du sol compacté. Sur la base des résultats obtenus, corroborés par des données de la littérature, on peut suggérer que le compactage à faibles teneurs en eau est faisable par la conjugaison de conditions particulières

portant sur le type de sol et le mode de compactage. Les résultats de cette étude doivent être confirmés par des travaux sur d'autres sols et sur le terrain.

Mots-Clés : Compactage des sols, Zones arides, Compactage à sec, Teneur en eau.

Abstract

In Algeria there are arid and semi-arid regions. Water scarcity makes it difficult to construct roads in these places. Local experience has shown that the cost of water required for material compaction can be more than a third of the entire cost of the road project. Compaction of road materials with low water content can clearly represent a real socioeconomic potential under these conditions.

The contribution offered in this dissertation contributes to the research efforts aimed at putting this technique into practice.

We are trying to determine the conditions of its practical feasibility by examining the technique of low water content compaction in the laboratory.

For this, we carry out compaction tests on a chosen soil using several test configurations. and we study the expression of the different conditions tested on the performance of compaction, explained in terms of the density profile of the compacted soil. On the basis of the results obtained, corroborated by data from the literature, it can be suggested that compaction at low water contents is feasible by the combination of particular conditions relating to the type of soil and the mode of compaction. The results of this study need to be confirmed by work on other soils and in the field.

Key-Words: Soil Compaction, Arid Zones, Dry-soil Compaction, Water Content.



Sommaire



Sommaire

- **REMERCIEMENTS**
- **DEDICACES**
- **الملخص**
- **RÉSUMÉ**
- **ABSTRACT**

SOMMAIRE I

LISTE DES FIGURES v

LISTE DES TABLEAUX VI

LISTE DES ABREVIATIONS VII

INTRODUCTION GENERALE *1*

Chapitre I : GENERALITES SUR LE COMPACTAGE

I.1 INTRODUCTION 3

I.2 GENERALITES SUR LE COMPACTAGE 3

I.2.1 Définition 3

I.2.2 Objectif de compactage 3

I.2.3 Condition de compactage 3

I.2.4 Théorie de compactage 4

I.2.4.1 Les interactions entre les particules 4

I.2.4.2 La structure des sols compacté 5

I.2.4.3 Facteurs d'influences du compactage 9

I.2.4.3.1 Influence de la teneur en eau 9

I.2.4.3.2 Influence de l'énergie de compactage 10

I.2.4.3.3 Influence de la granulométrie 12

I.2.4.3.4 Influence de type de sol 13

I.2.4.3.5 Influence de la méthode de compactage 13

I.3 LES ESSAIS DE COMPACTAGE 15

I.3.1 Essais de compactage au laboratoire 15

I.3.1.1 Compactage par impact 15

I.3.1.2 Compactage statique 16

I.3.1.3 Compactage par pétrissage 16
I.3.1.4 Compactage par vibration 16
I.4 ESSAIS DE COMPACTAGE IN-SITU 18
I.4.1 Essai de la planche 18
I.4.2 Le rôle de la planche d'essai 18
I.4.3 Dimensions de la planche d'essai 18
I.4.4 Mesures concernant l'efficacité d'un compacteur 19
I.5 Les engins de compactage 21
I.5.1 Définition 21
I.5.2 Classement des engins 21
I.5.3 Rouleaux 21
I.5.3.1 Rouleaux à bandage lisse 21
I.5.3.2 Rouleaux à pneus 22
I.5.3.2.1 Généralité 22
I.5.3.2.2 Paramètres de compactage 22
I.5.3.2.3 Classification des compacteurs à pneus 23
I.5.3.3 Rouleaux vibrants 23
I.5.3.4 Rouleaux à pieds dameurs 24
I.5.3.5 Rouleaux à segments 24
I.6 Conclusion 26

Chapitre II : COMPACTAGE A SEC

II.1 INTRODUCTION 27
II.2 HISTOIRE ET EXPÉRIENCES ANTÉRIEURES 27
II.2.1 L'expérience Australienne 27
II.2.2 Expérience Européenne 28
II.2.3 Experience Africaine 28
II.2.4 Expérience Algérienne 30
II.3 RÉPARTITION DES ZONES ARIDES 30
II.4 LE CONTEXTE SAHARIEN 32
II.4.1 Le climat 32
II.4.2 Le relief 33
II.4.3 Principales ressources en matériaux locaux dans le Sud algérien 33

II.4.4 L'hydrogéologie 33
II.5 LA TECHNIQUE ROUTIÈRE SAHARIENNE 34
II.5.1 Principale innovation 34
II.5.2 Les idées générales 34
II.5.3 Principe de la technique 34
II.5.4 Domaine d'application 34
II.6 LES MATÉRIAUX UTILISÉS AU SAHARA ALGÉRIEN 35
II.6.1 Les tufs calcaires 35
II.6.2 Sable gypseux 36
II.6.3 Tout venant 37
II.6.4 Arène granitique 37
II.7 CLASSIFICATION DES MATÉRIAUX 38
II.8 ASPECTS SPÉCIFIQUES DU COMPACTAGE À SEC 39
II.8.1 Variation de la densité sèche en fonction de la teneur en eau 39
II.8.2 Variation de la densité sèche en fonction de la profondeur de couche 41
II.9 RECOMMANDATIONS DE LA NATURE DES MATÉRIAUX DONNANT LES MEILLEURS RÉSULTATS AU COMPACTAGE À SEC 41
II.10 MODALITÉS DE COMPACTAGE À FAIBLE TENEUR EN EAU 42
II.11 MATÉRIAUX ET MISE EN ŒUVRE 43
II.11.1 Terrassement 43
II.11.2 Couche de fondation 43
II.11.3 Couche de base 44
II.11.4 Couche de roulement 45
II.11.4.1 Imprégnation 45
II.11.4.2 Enduits superficiels 45
II.11.4.3 Les enrobés denses classiques 46
II.12 RÉSULTATS DES ESSAIS SPÉCIFIQUES APRÈS MISE EN REMBLAIS : 47
II.12.1 Essais de chargement à la plaque 47
II.13 CONTRÔLE DE COMPACTAGE À SEC 48
II.13.1 Les moyens de contrôle de compactage 48
II.13.2 Spécifications 48
II.13.2.1 En remblai 48

II.13.2.2 Au niveau de la couche de forme ou des 40 cm supérieurs situés sous la chaussée 49
II.14 CONCLUSION 49

Chapitre III ÉTUDE EXPÉRIMENTALE

III.1 INTRODUCTION 50
III.2 PROGRAMME EXPÉRIMENTAL 50
III.3 CHOIX DES MATÉRIAUX 50
III.4 LA SITUATION DES MATÉRIAUX 51
III.5 LES ESSAIS AU LABORATOIRE 51
III.5.1 Les essais d'identification 51
III.6 TECHNIQUES EXPÉRIMENTALES 52
III.6.1 Analyse granulométrique (Tamisage à voie humide) 52
III.6.1.1 Analyse par tamisage à voie humide 52
III.6.1.2 Analyse sédimento métrique 53
III.6.2 Détermination de la teneur en carbonate 54
III.6.3 Essai au bleu de méthylène *(NA.19-48)* 55
III.6.4 Equivalent de sable (NF.P.18-598) 56
III.6.5 Les essais de compactages 58
III.6.5.1 Préparation des sols 58
III.6.5.2 Essai Proctor Normal 58
III.7 LES RÉSULTATS DES ESSAIS AU LABORATOIRE 60
III.7.1 Les essais d'identification 60
III.7.2 Essai Proctor 67
III.8 INTERPRÉTATION 70
III.9 CONCLUSION 71
Bibliographie 74

Liste des figures

Figure I-1 : Forces d'attraction et de répulsion en fonction de la distance entre les particules 5
Figure I-2 : Les effets du compactage sur la structure 6
Figure I-3 : Évolution de la structure d'une argile compactée en fonction de teneur en eau et d'énergie de compactage 7
Figure I-4 : Représentation schématique de l'état de saturation 8
Figure I-5 : Limites des domaines D1, D2, D3 et D4 sur le diagramme de l'essai..... 8
Figure I-6 : Allure d'une courbe de compactage. 10
Figure I-7 : Influence de l'énergie de compactage..... 11
Figure I-8 : Influence de la nature du sol sur le compactage 12
Figure I-9 : Influence de la méthode de compactage 14
Figure I-10 : Matériel pour essai de compactage 16
Figure I-11 : Illustration de deux types de compactage au laboratoire. 17
Figure I-12 : Résistance en fonction de la profondeur dans un moule Proctor..... 19
Figure I-13 : Compactage par un rouleau vibrant 19
Figure I-14 : Essais de compactage in-situ sur une planche d'essai. 20
Figure II-1 : Carte mondiale modern des zones arides (UNEP/DEWA). 31
Figure II-2 : Répartition des précipitations dans le nord de L'Algérie FAO 2005..... 32
Figure II-3 : Carte des régions arides et semi-arides de l'Afrique du Nord, par l'Institut International de la (1950). 32
Figure II-4 : Fuseau granulométrique du tuf calcaire utilisé dans la RN° 06 de la..... 35
Figure II-5 : Fuseau granulométrique du Sable gypseux de la région nord d'El-Oued..... 36
Figure II-6 : Fuseau granulométrique des tout-venants de plateau de TinRhert..... 37
Figure II-7 : Fuseau granulométrique des Arènes granitiques de Tamanrasset..... 37
Figure II-8 : fuseau discriminant de Béni-Abbes..... 39
Figure II-9 : Courbe Proctor complète..... 40
Figure II-10 : Variation de la densité en fonction de la profondeur (LCPC, 1987)..... 41
Figure III-1 : L'endroit de l'extraction les échantillons. 51
Figure III-2 : Étapes de réalisation de l'essai tamisage à voix humide. 53
Figure III-3 : La technique de la sédimentométrie. 53
Figure III-4 : Calcimètre Dietrich-Fruhling..... 54
Figure III-5 : manipulation de l'essai de bleu..... 56
Figure III-6 : Equivalent de sable 58
Figure III-7 : essai Proctor normal..... 59
Figure III-8 : Courbe Granulométrique du premier échantillon. 61
Figure III-9 : Courbe Granulométrique du deuxième échantillon. 64
Figure III-10 : Courbe Granulométrique du troisième échantillon..... 66
Figure III-11 : Courbe Proctor du premier échantillon..... 68
Figure III-12 : Courbe Proctor du deuxième échantillon..... 69
Figure III-13 : Courbe Proctor du troisième échantillon. 70

Liste des tableaux

Tableau I-1 : Type de compacteur 23
Tableau I-2 : Application de différents équipements de compactage sur différents types des sols 25
Tableau II-1 : Résultats des essais de charge à la plaque sur les remblais du projetautoroute Marrakech-Skhour Rhamna..... 47
Tableau III-1 : La qualité du sable en fonction de son ES (NF.EN.933-8). 57
Tableau III-2 : Résultats des essais en laboratoire du premier échantillon. 60
Tableau III-3 : Résultats des essais en laboratoire du deuxième échantillon. 62
Tableau III-4 : Résultats des essais en laboratoire pour le troisième échantillon..... 65
Tableau III-5 : Résultats d'essai Proctor pour le premier échantillon..... 67
Tableau III-6 : Les valeurs de la courbe de saturation pour l'échantillon..... 67
Tableau III-7 : Résultats d'essai Proctor pour le premier échantillon..... 68
Tableau III-8 : Les valeurs de la courbe de saturation pour l'échantillon 2 68
Tableau III-9 : Résultats d'essai Proctor pour le troisième échantillon 69
Tableau III-10 : Les valeurs de la courbe de saturation pour l'échantillon 3..... 69
Tableau III-11 : Récapitulation des essais Proctor pour les trois échantillons. 70

Liste des Abréviations

AASHTO	American Association of State Highway and Transportation Officials
ASTM	American Society for Testing and Materials
CaCO3	Teneur en carbonates
CaSO42H2O	Teneur en gypses
CBR	Indice de Portance Californien (California Bearing Ratio).
C_C	Coefficient de courbure.
CECE	Comite for European Construction Equipement
CEMAG	Commission d'Étude des Matériels de Génie Civil
C_U	Coefficient d'uniformité.
D_{max}	Diamètre maximale des particules.
ES	Equivalant de sable.
FNTP	Fédération National des Travaux Public
GTR	Guide des Terrassements Routier
Ip	Indice de plasticité
LCTP	Laboratoire centrale des travaux publics.
OPM	Optimum Proctor Modifié.
OPN	Optimum Proctor Normal.
TRRL	Transport and Road Research Laboratory**.**
W_L	Limite de liquidité.
W_P	Limite de plasticité.
γ_d	Densité sèche critique.
$\gamma_{d\ OPM}$	Densité sèche à l'Optimum Proctor Modifié.
$\gamma_{d\ OPN}$	Densité sèche à l'Optimum Proctor Normal.
ω_c	Teneur en eau critique.
ω_n	Teneur en eau naturelle.
ω_{OPM}	Teneur en eau à l'Optimum Proctor Modifié.
ω_{OPN}	Teneur en eau à l'Optimum Proctor Normal.



Introduction Générale



En Algérie il y a des régions arides et semi-arides. Ces zones nécessitent un développement d'une infrastructure routière moderne qui facilite le trafic d'humains et surtout des ressources naturels (Gaz, Pétrole...etc). Cependant, la réalisation des chaussés dans ces zones est handicapé par la rareté de l'eau nécessaire pour le compactage des matériaux. L'indisponibilité de l'eau rend le compactage dans ces régions très coûteux et difficile à réaliser. Les point d'extraction de l'eau sont loin, les opérations de compactage (le forage de puits, le pompage de l'eau, l'épandage, le malaxage), demandent une organisation de chantier parfois contraignante, notamment pour limiter l'évaporation rapide de l'eau dans l'atmosphère. L'expérience a montré que, le coût de l'eau nécessaire au compactage des matériaux peut représenter jusqu'au tiers du prix d'un projet routier.

L'intérêt pour le compactage des sols à faible teneur en eau a démarré avec le projet de la transsaharienne dans les années soixante-dix.

Les chercheurs redéfinissent des méthodes de compactage plus efficaces et économiques dans le cadre de la mise en œuvre des principes du développement durable. Les efforts pour valoriser les matériaux locaux et conserver les ressources rares ont redémarré l'intérêt des chercheurs pour redéfinir des méthodes de compactage plus efficaces et économiques[1].

Malheureusement, seules quelques études de recherche ont avancé la possibilité de compacter les sols des régions arides à des teneurs en eau bien inférieures à la teneur en eau optimale, avec quelques dispositions constructives spécifiques pour fournir des qualités techniques acceptables dans le sol compacté. Parmi cet effort, il convient de mentionner plusieurs essais menés à Tamanrasset (Algérie), au Kenya et au Soudan lors de la construction de la route transsaharienne dans les années 1970. Il y a eu récemment une compréhension croissante des possibilités socio-économiques du compactage à faible eau dans ces zones, en supposant qu'il est applicable.

Ces travaux n'ont malheureusement pas été poursuivis pour parvenir à des retours d'expériences qui auraient pu trancher la question de la faisabilité d'une telle technique.

A l'appui de quelque rares résultats limités, tirés de la littérature du sujet, on tente par l'interprétation des résultats expérimentaux récoltés par l'encadreur, de démontrer qu'il est possible de compacter des sols à des teneurs en eau faibles, voire nulle, et d'obtenir tout de même des densités sèches aussi importantes que celle qui correspondent à l'optimum Proctor, ou au pire des densités intéressantes. L'objectif principal de ce présent mémoire consiste une étude expérimentale au laboratoire sur la faisabilité du compactage à sec.

Pour cela on interprète des résultats de trois différents matériaux, pour un compactage à faible teneur en eau des remblais et couche de formes. Car cette technique très demandée par le contexte aride.

Les travaux de recherche sont réalisés en laboratoire et ces matériaux sont tout d'abord caractérisés en réalisant les essais d'identification et de caractérisation géotechniques suivants : analyse granulométrique, essai de sédimentation, teneur en carbonate de calcium $CaCO_3$ et essai Proctor Normal.

Le travail du mémoire présenté en trois chapitres :

Le premier chapitre concerne une étude bibliographique sur les notions de base du compactage des sols.

Le deuxième chapitre est consacré pour présenter l'historique du compactage à faible teneur en eau, illustrant les particularités du contexte du Saharien, la technique routière saharienne et donner certaines caractéristiques géotechniques des matériaux des régions désertiques, la classification des matériaux utilisés en régions désertiques, l'aspect spécifique du compactage à sec, la modélisation de compactage à faible teneur en eau, matériaux et mise en œuvre du corps de chaussée, ainsi que le contrôle de compactage à sec.

Le troisième chapitre est réservé à la présentation du programme expérimental réalisé. On commence par présenter les caractéristiques des matériaux utilisés. On expose ensuite les méthodes et les procédures d'essais employés et les normes suivies pour les réaliser, on donne les résultats obtenus et on les interprète.

Le mémoire se termine par une conclusion générale sur la page effectuée.

Chapitre I

Généralités sur le compactage

I.1 Introduction

Le sol en place est probablement très compressible, très perméable et de faible consistance. Dans le cas où le choix d'un autre site pour l'ouvrage est impossible, la solution possible reste la stabilisation du sol : c.à.d. l'amélioration des propriétés du sol en question[1].

Ce chapitre donne une idée sur le compactage, notre objectif les conditions et les facteurs d'influences, ainsi que la modélisation de cette opération en prenant en considération certains critères.

I.2 Generalites sur le compactage

I.2.1 Définition

Le compactage est un processus cherchant à améliorer la qualité des sols sur un site donne en les densifiant par application d'énergie mécanique. Les termes stabilisation mécanique et densification sont parfois utilises et sont équivalents. Les objectifs vises lors du compactage [3] :

- Une augmentation de la résistance au cisaillement,
- Une augmentation du potentiel de gonflement,
- Une augmentation de la densité,
- Une diminution du retrait,
- Une diminution de la perméabilité,
- Une diminution de la compressibilité[4].

I.2.2 Objectif de compactage

L'opération de compactage conduit à une diminution des vides remplis d'air sans expulsion d'eau. C'est la différence fondamentale entre le compactage et la consolidation[5].

Dans ce qui suit, nous aborderons l'ensemble des aspects liés aux objectifs assainis au compactage des sols.

I.2.3 Condition de compactage

Pour compacter un sol, on fait agir sur lui un engin qui développe, en tout point du sol, des contraintes qui dépendent de la nature de l'engin, de ses caractéristiques, la profondeur du point considéré. Pour compacter un sol, il faut le déformer d'une manière irréversible, donc le cisailler. Alors il faut exercer sur ce dernier des contraintes qui sortent de la courbe intrinsèque[2].

I.2.4 Théorie de compactage

La théorie du compactage se compose :

- Des interactions entre les particules ;
- De la structure des sols compactés[6].

I.2.4.1 Les interactions entre les particules

Les interactions entre les particules d'un sol dépendent en grande partie de leur nature (granulaire ou colloïdale) ; elles se font, soit par contact direct des grains, soit par l'intermédiaire de forces électromagnétiques. Dans le cas des sols granulaires, ce sont les interactions de contact qui prédominent ; par contre, dans le cas des argiles, ce sont les interactions électromagnétiques entre particules et avec le milieu dans lequel elles se trouvent.

A indiqué que les interactions dans les argiles dépendent de quatre types de forces :

- Les forces externes appliquées : elles se traduisent par des contraintes effectives qui dépendent de la surface de contact et de la déformabilité propre des particules.
- Les forces de contact : elles sont directement liées aux forces extérieures appliquées, et elles peuvent être des forces du type sol-sol, sol - air et sol - eau.
- Les forces d'attraction : elles sont essentiellement dues aux forces de Van der Waals.
- Les forces de répulsion : elles varient dans le même sens que la constante électrique, la dimension des ions hydratés, l'épaisseur de la double couche, le pH et l'adsorption d'anions ; mais, en sens contraire de la température, de la valence ionique et de la concentration électrolytique.

Cette théorie a été développée par Le Roux (1972). La (figure I.1) montre les interactions en fonction de la distance entre les particules.

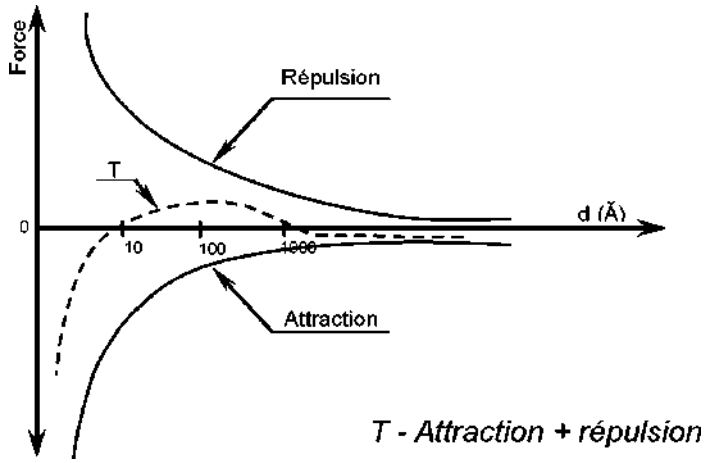


Figure I-1 : Forces d'attraction et de répulsion en fonction de la distance entre les particules

I.2.4.2 La structure des sols compacté

La théorie du compactage est développée largement à partir des années 1930 a expliqué la forme de la courbe de compactage en prenant en compte les interactions physico-chimiques du système sol-eau (figure I-2). Il a indiqué :

- Pour le point A du côté sec, la quantité d'eau est insuffisante pour développer entièrement la double couche, et les forces d'attraction sont prédominantes, ce qui conduit à une structure floculée, à un arrangement désordonné des particules ;
- Du point A au point B, l'augmentation de la teneur en eau permet le développement de la double couche, ce qui provoque une augmentation des forces de répulsion. Ceci conduit à une structure de plus en plus orientée ;
- Pour le point C du côté humide, la double couche continue à se développer et les forces de répulsion à augmenter. La structure du sol devient encore plus orientée.

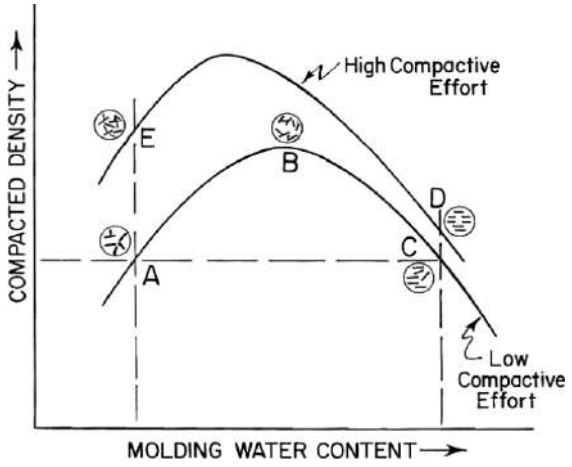


Figure I-2 : *Les effets du compactage sur la structure*

La structure d'un sol à l'aide de trois types d'unités de base :

1) L'arrangement des particules élémentaires (plaquettes) ;

2) L'assemblage des particules (agrégats) ;

3) Les espaces vides.il semble que ce classement convienne très bien pour les sols fins non saturés.

Un schéma de texture pour les sols fins gonflants, et ont indiqué que :

- Si la texture est dominée par l'arrangement des particules élémentaires, on aura une texture « matricielle », qui est typique des sols compactés du côté humide de l'optimum Proctor ;
- Si elle est composée par les mottes en forme de grains, on aura une texture « agrégée », qui est représentative de la majorité des sols naturels ou compactés du côté sec de l'optimum Proctor.

L'évolution de la texture de l'argile pendant le compactage (figure I-3), et l'importance de maintenir une corrélation entre le degré de compactage et la teneur en eau.

Il y a quatre domaines de saturation pour les sols compactés :

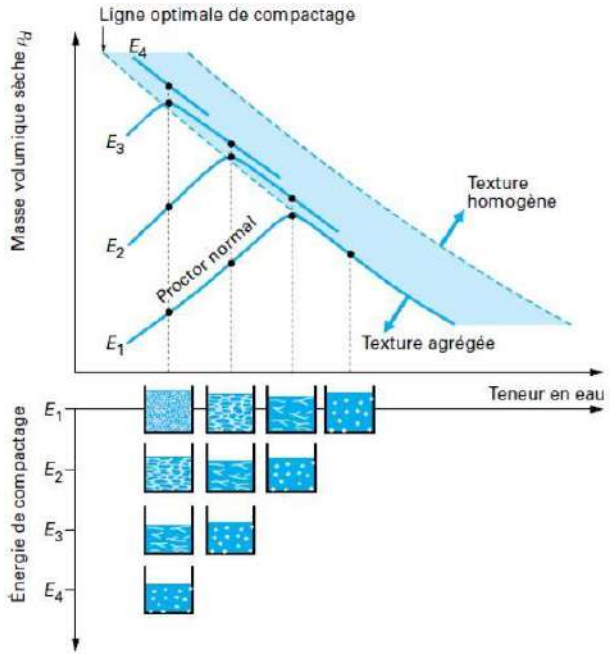


Figure I-3 : Évolution de la structure d'une argile compactée en fonction de teneur en eau et d'énergie de compactage

- D1 : La phase d'air est continue ;
- D2 : La phase d'air est occluse et en contact avec le squelette solide
- D3 : L'air est occlus mais n'est pas en contact avec le squelette solide ;
- D4 : Le sol est saturé par le fluide interstitiel

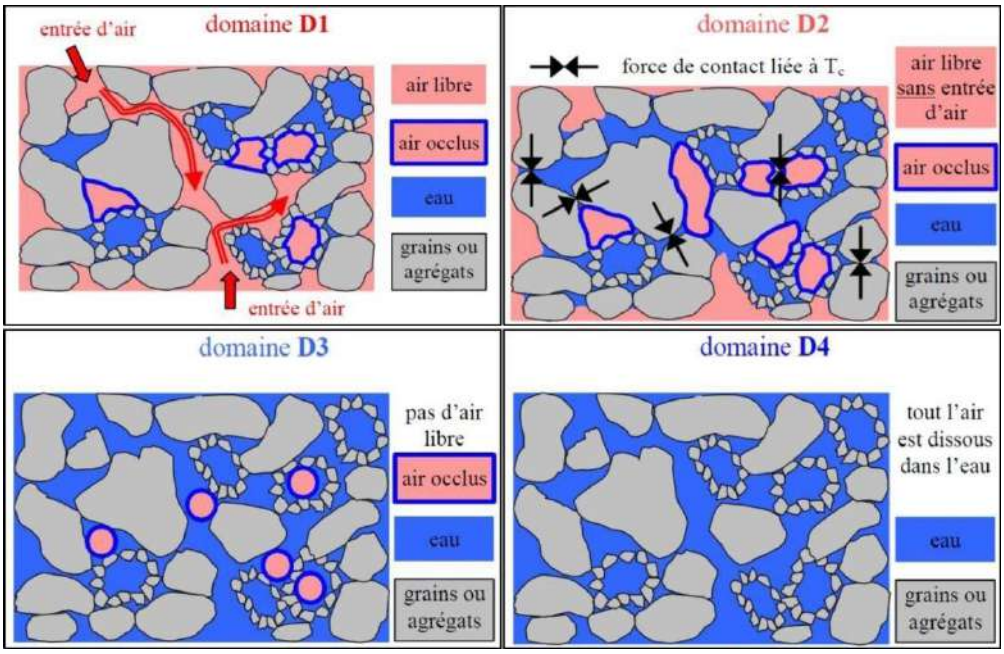


Figure I-4 : Représentation schématique de l'état de saturation

En se basant sur quelques résultats de la littérature, considère que le domaine D2 couvre l'optimum Proctor et une partie du côté humide de l'OPN, et peut être généralisé sur la ligne optimale de compactage (figure I-5) [2].

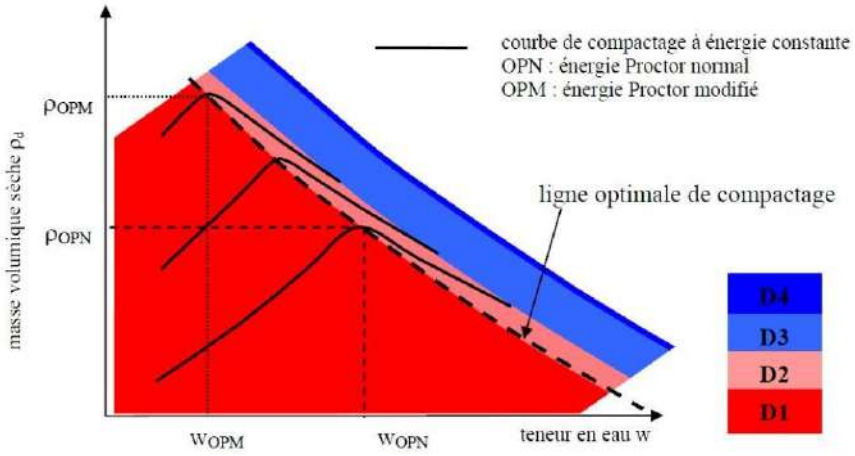


Figure I-5 : Limites des domaines D1, D2, D3 et D4 sur le diagramme de l'essai

I.2.5 *Facteurs d'influences du compactage*

À partir de 1930, il est devenu nécessaire de mieux comprendre le phénomène de compactage et son influence sur les propriétés du sol afin de mieux contrôler le compactage et de développer les engins de compactage, et c'est à l'ingénieur américain que l'on doit les premières études, Le compactage est influencé principalement par :

- La teneur en eau du matériau ;
- L'énergie de compactage ;
- La granulométrie ;
- Le type du sol ;
- La méthode de compactage [7].

I.2.5.1 Influence de la teneur en eau

La teneur en eau joue un rôle important dans la conduite du compactage et suivant sa valeur, on obtient des résultats plus ou moins satisfaisants pour une même dépense d'énergie. Lors d'un essai de compactage, si l'on fait varier la teneur en eau de l'échantillon et que l'on représente graphiquement la variation du poids volumique sec γd en fonction de la teneur en eau ω, on obtient une courbe en cloche. Cette influence peut être expliquée par l'effet d'attraction des forces capillaires qui constitue une résistance au réarrangement des grains. Pour étudier comment la teneur en eau influe sur le compactage d'une terre, Proctor a imaginé de procéder au tassement mécanique d'un échantillon, toujours de même façon, en modifiant seulement le degré d'humidité. Ayant tamisé, puis disposé la terre par couches égales dans un cylindre de dimensions bien définies, il tasse chaque couche à l'aide d'un pilon, toujours de même poids, tombant toujours de la même hauteur, un même nombre de fois n. En faisant varier la teneur en eau.

En particulier si, sur un graphique (figure I-6), on porte en ordonnées les valeurs de la densité apparente d et en abscisses les valeurs de la teneur en eau ω on obtient, pour un nombre déterminé n de corps de pilon, une courbe de compactage passant par un maximum, dont l'abscisse est ωopt.

Lorsque la teneur en eau est élevée, l'eau absorbe une importante partie de l'énergie de compactage sans aucun profil, par contre l'lorsque la teneur en eau est faible l'eau a un rôle lubrifiant important, et la densité sèche augmente avec la teneur en eau [6].

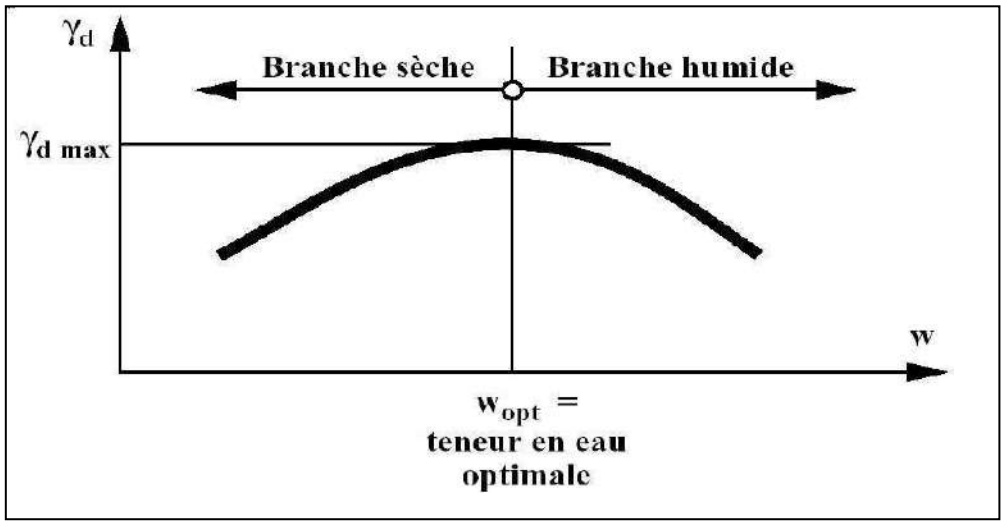


Figure I-6 : Allure d'une courbe de compactage.

I.2.5.2 Influence de l'énergie de compactage

Plus l'énergie de compactage est grande, plus la densité sèche maximale est grande : on obtient une meilleure imbrication des particules de terre, d'où une meilleure résistance au cisaillement et une étanchéité accrue.

Pour des énergies de compactage de plus en plus grandes en prenant les terres avec leur teneur en eau optimale, qui donne un éventail de droite qui montrent que la cohésion c et l'angle de frottement interne φ augmentent avec l'énergie de compactage.

POST et LONDE, dans leur livre sur les barrages en terre compactée, signalent que ces conclusions ne s'entendent que pour les résistances de cisaillement supérieure à celle des terres sableuses, tout au moins pour de très fortes énergies de compactage.

La (figure I-7) illustre, pour un sol constitué de limon argileux, l'influence de l'énergie de compactage sur les densités atteintes en relation avec la variation de la teneur en eau

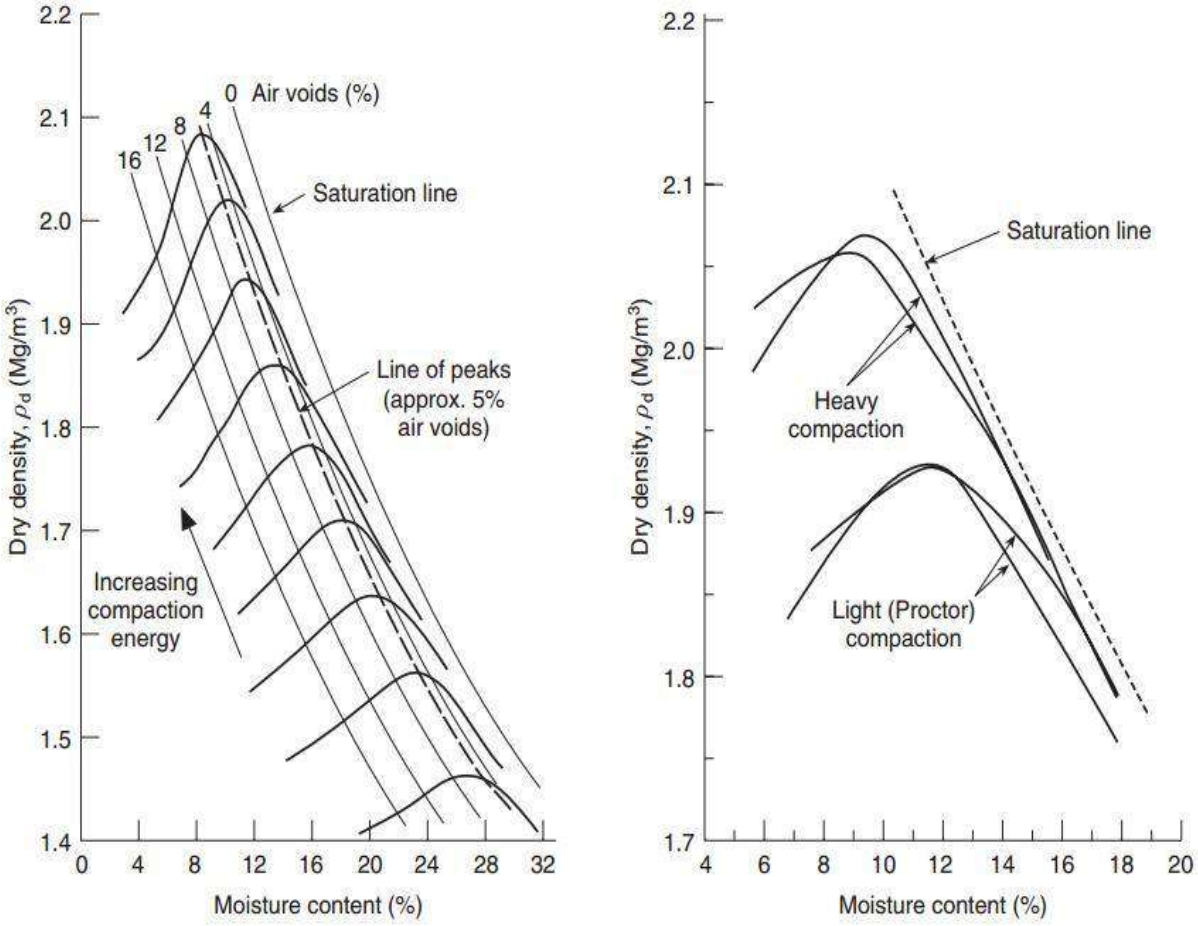


Figure I-7 : Influence de l'énergie de compactage

Proctor Normal : Dame de 2.5 kg, 27 coups par couche ;CBR (Heavy) : Dame de 4.5 kg, 27 coups *par couche.*

L'analyse de la (figure I-7) offre des informations complémentaires à savoir :

- Une augmentation de l'énergie de compactage à gauche de l'optimum Proctor de teneur en eau conduit à une augmentation de la résistance.
- Une augmentation de l'énergie de compactage à droite de l'optimum Proctor de teneur en eau peut entrainer un gain ou une perte de résistance.
- Pour une même énergie de compactage et une même densité, le compactage du coté sec donne une résistance plus élevé que le coté humide[4].

I.2.5.3 Influence de la granulométrie

Le compactage des cinq sols suivant l'essai Proctor Normal. Les allures *(*figure I-8*)* des courbes de compactage varient avec la composition granulométrique des sols. Une granulométrie uniforme (sables) conduira à une faible compacité, alors qu'une granulométrie étalée (sol bien gradué) présente un maximum très marqué, et elle permettra l'obtention d'une compacité élevée.

Donc il est observé expérimentalement qu'après un ensemble des essais de compactage sur cinq échantillons de sols, ***l'optimum Proctor*** est très net tant que la granulométrie du sol est étalée. La présence de particules de différentes tailles améliore le compactage en permettant aux particules fines de s'incruster dans les vides laissés par les plus grosses.

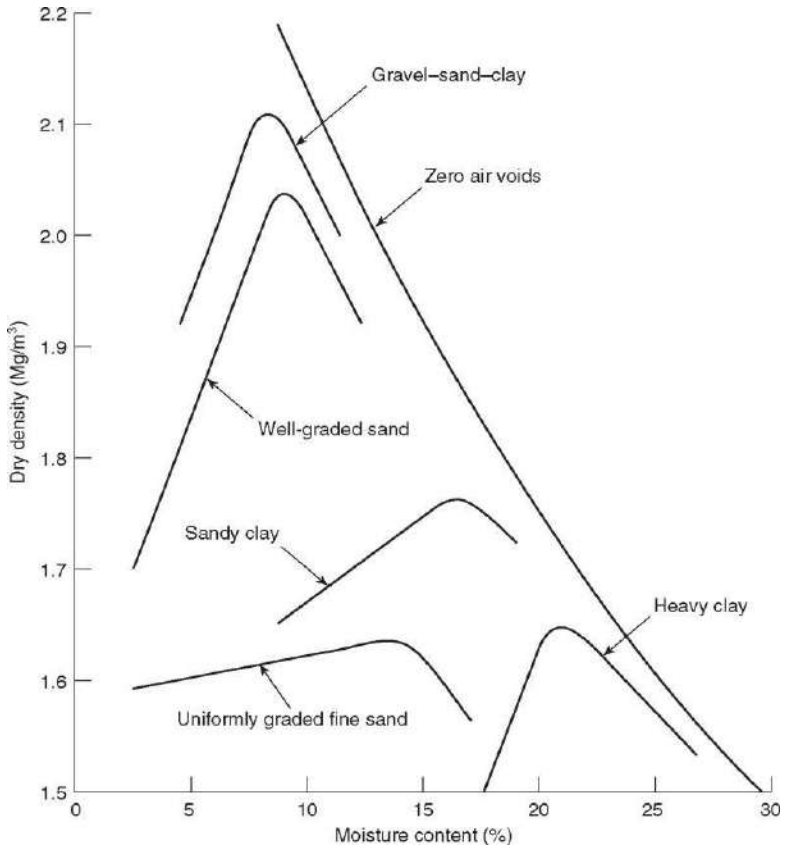


Figure I-8 : Influence de la nature du sol sur le compactage

I.2.5.4 Influence de type de sol

Les courbes de compactage varient avec la nature du sol (figure I-9). Un sol dont le compactage sera fortement influencé par la teneur en eau présentera une courbe de compactage avec un maximum très marqué. A l'inverse, un sol dont la teneur en eau influence peu le compactage sera caractérisé par une courbe de compactage très plate. Les sols de ce type font généralement les meilleurs remblais.

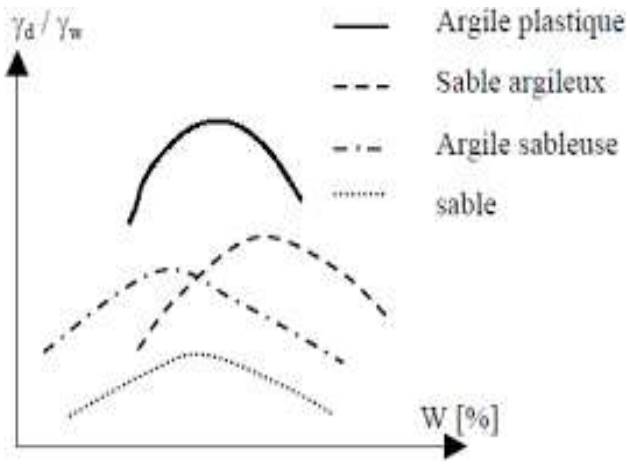


Figure I-9 : L'influence de type de sol sur le compactage

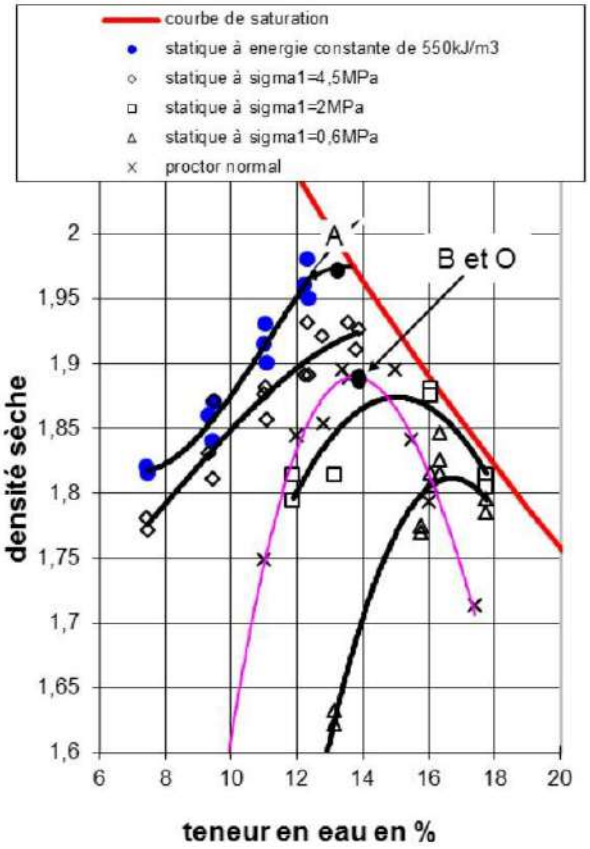
On voit que les sables sont très peu sensibles à l'eau en ce qui concerne le compactage, tandis que s'ils contiennent une fraction argileuse, leur courbe s'infléchit de manière importante[1].

I.2.5.5 Influence de la méthode de compactage

Les variations de comportement hydraulique et mécanique d'un même sol compacté selon différentes méthodes sont dues au fait que ces méthodes induisent des déformations de cisaillement d'amplitudes très différentes.

Au niveau du laboratoire, on distingue deux types de compactage qui sont souvent utilisés :

- **Le compactage dynamique :** L'énergie de ce mode de compactage est transmise depuis la surface du matériau compacté par propagation d'ondes de compression et de cisaillement.
- **Le compactage statique :** c'est une charge statique (le poids) et une charge vibratoireavec une fréquence choisie. L'énergie mise dans le sol est une énergie statique plus une énergie dynamique vibratoire dans le temps (elle est sommée sur le temps, plus le temps est long plus l'énergie transmise au sol est importante).



Définitions	W : Teneur en eau (%)	γ_d/γ_w : densité sèche	Énergie (KJ/m^3)
O : Optimum Proctor Normal	13,8	1,89	550 délivrée
A : compactage statique	13,8	1,96	550 fournie
B : compactage statique	13,8	1,89	300 fournie

Figure I-9 : Influence de la méthode de compactage

I.3 LES ESSAIS DE COMPACTAGE

I.3.1 Essais de compactage au laboratoire

Le principe des essais au laboratoire est de compacter un échantillon de sol, avec une teneur en eau connue, dans un moule, aux dimensions normalisées, par l'action de la chute d'une dame. Le poids et la hauteur de chute de cette dernière sont également normalisés. La teneur en eau du sol testé est maîtrisée en étuvant l'échantillon, puis par adjonction de quantités précises d'eau. Une série d'essais est réalisée pour différentes teneurs en eau, le résultat de chacun produisant un couple de valeurs (w, γd), donc un point de la courbe de compactage courbe (A.S.T.M) : (American Society for Testing and Materials). Les essais peuvent être réalisés dans deux types de moules, et selon deux modalités, ce qui fait quatre types d'essais. D'autres types, moins couramment utilisés existent également. Ces essais ont pour objet de tracer les courbes de compactage.

Des processus de compactage dans un laboratoire peuvent être classifiés au-dessous de quatre catégories à savoir :

- Compactage par impact;
- Compactage statique;
- Compactage par pétrissage ou la méthode « Kneading » ;
- Compactage vibrant.

I.3.1.1 Compactage par impact

Développée à l'origine par le Proctor en 1933 à l'aide de la stabilisation de barrage en terre (Proctor, 1933), le compactage d'impact est une des techniques de compactage les plus utilisées aujourd'hui. L'essai Proctor Normal ou (standard), baptisé du nom de son promoteur, implique fondamentalement de laisser tomber un marteau d'un poids connu d'une taille d'ensemble sur l'échantillon. L'essai est relativement facile et bon pour exécuter, toutefois quelques inconvénients existent dans l'essai signalé que l'essai de compactage d'impact n'est pas approprié au matériel non-cohérent contenant des sables et/ou des pierres écrasées. Senti (1968) explique plus loin que l'essai

est impossible avec le matériel non-cohérent (figure I-10), car le matériau se déplace sous la dame, et par conséquent les valeurs de densité obtenues seront faibles[7].



Figure I-10 : Matériel pour essai de compactage

I.3.1.2 Compactage statique

Le compactage statique est de comprimer un échantillon pesé d'avance dans un moule cylindrique en le plaçant dans une machine d'essai de compression. Des forces de compression sont progressivement augmentées jusqu'à ce que la densité sèche maximum soit atteinte [1].

I.3.1.3 Compactage par pétrissage

Inspiré par l'action de malaxage produite par le rouleau à pieds de mouton dans le compactage in-situ, Le développement d'un compacteur de malaxage automatique ; cette méthode n'est pas appropriée au compactage des matériaux granulaires tels que le sable. Cependant, des valeurs de densités sèches maximales (densité double) ont été réalisées aux teneurs en eau très basses par le compactage vibratoire[2].

I.3.1.4 Compactage par vibration

Le compactage des sols et des agrégats granulaires est souvent confondu par le manque d'une méthode appropriée à cet essai. D'autres méthodes de compactage telles que le compactage d'impact a été considérées inappropriées pour rendre ces types de sols compacts dus à leur nature non-cohérente. Ainsi, de nouvelles méthodes telles que le compactage vibrant a été développées afin d'essayer d'améliorer le contrat entre ces types de sols.

Et puisque les vibrations d'utilisation d'équipement de compactage in-situ pour rendre des agrégats compacts effectivement, le compactage vibratoire rapporte une meilleure corrélation entre les

résultats sur le terrain et les résultats de laboratoire. Les résultats par des moyens vibratoires peuvent être réalisés de deux manières comme illustré sur la (figure I-11) : Illustration de deux types de compactage au laboratoire.



a 1 : compactage a marteau vibrante b 1 : compactage a table vibrante

Figure I-11 : Illustration de deux types de compactage au laboratoire.

La différence entre les deux procédures est que la méthode de la table vibrante (figure I-11 b1) place une charge statique sur l'échantillon contenu dans un moule et applique des vibrations verticales continues à partir du fond. En revanche, la méthode du marteau vibrant (figure I-11 a1) utilise un marteau vibrant qui est placé sur l'échantillon contenu dans le moule et applique des forces vibratoires pendant un temps spécifique. Cette méthode est considérée meilleure, étant donné qu'elle simule les résultats in-situ. Le premier qui a effectué une enquête et une recherche complètes sur l'utilisation de l'essai vibrant de compactage de marteau était Parsons. En se basant sur cinq facteurs différents affectant l'essai :

- Type de taille de marteau et de bourreur utilisé ;
- Importance de charge statique appliquée ;
- Période de fonctionnement du marteau ;
- Taille et forme de moule ;
- Tension assure au marteau[2].

I.4 ESSAIS DE COMPACTAGE IN-SITU

I.4.1 Essai de la planche

Avant la construction d'un remblai, il est recommandé de réaliser une planche d'essai afin de fixer les conditions de mise en place des matériaux et de choisir les moyens de compactage les plus performants. Les couches et le nombre de passe du compactage sont déterminés lors de ces essais.

Suivant l'objectif recherché, ces planches portent des noms variés : planche d'essais lorsqu'il s'agit de déterminer les performances d'un engin, planche de vérification lorsqu'il s'agit seulement de confirmer (ou d'infirmer) une capacité que l'on croit connaitre, mais dont on n'est pas absolument certain, planche de référence lorsqu'il s'agit de définir la qualité que l'on obtient normalement en appliquant strictement un compactage déterminé pour qu'en cours de réalisation du chantier, on puisse comparer facilement la qualité obtenue à celle souhaitée[2].

I.4.1.1 Le rôle de la planche d'essai

La planche d'essai est destinée à fixer les conditions de mise en œuvre du remblai et à déterminer les meilleures modalités d'exécution. Elle doit être systématiquement prévue avant la construction du remblai. Elle peut être avantageusement utilisée pour la confection d'une piste d'accès ou d'un batardeau de protection. La planche d'essai ne peut être intégrée au remblai que dans le cas où elle ne constituera pas, ensuite, une zone de faiblesse. Elle est obligatoirement exécutée avec le matériel proposé par l'entreprise, notamment pour régaler, niveler, compacté, ce qui permet d'en vérifier l'aptitude[7].

I.4.1.2 Dimensions de la planche d'essai

La dimension de la planche d'essai est celle qui permet une mise en œuvre satisfaisante, soit 20 mètres en longueur et 4 à 5 mètres en largeur. Sachant que les 2*50 cm en bords ne sont pas pris en compte et en prévoyant 5m supplémentaires aux deux extrémités pour la manœuvre des engins. Il est recommandé d'exécuter ensuite au moins trois couches de remblai afin de :

- S'affranchir des phénomènes d'assise;
- Contrôler l'accrochage des couches;
- Tester deux ou trois épaisseurs de couche différentes. Si les essais portent sur plusieurs compacteurs et/ou plusieurs matériaux, le nombre de planches ou leur surface est augmenté d'autant.

Des résultats de laboratoire (figure I-12) obtenus sur un sol argileux montrent également que la résistance (ce qu'il peut interpréter en termes de densité) varie en fonction de la profondeur dans le cas d'un moule de compactage[2].

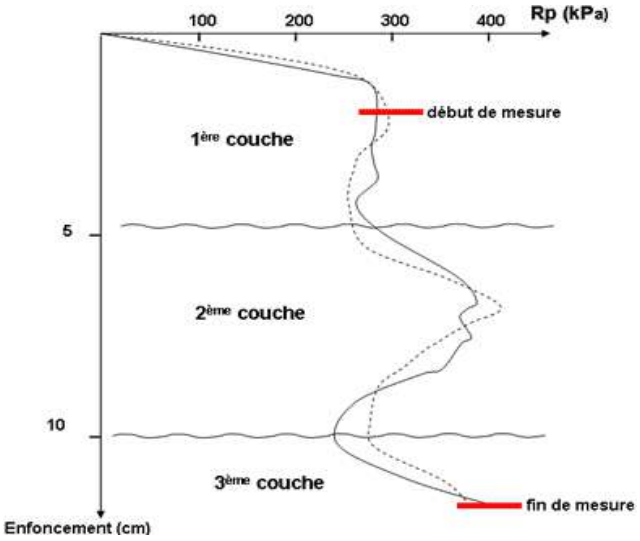


Figure I-12 : Résistance en fonction de la profondeur dans un moule Proctor

I.4.1 Mesures concernant l'efficacité d'un compacteur

Il s'agit de déterminer l'épaisseur adéquate des couches et le nombre correspondant de passages du compacteur[4].

Cependant, l'efficacité d'un compactage décroît en fonction de la profondeur que l'action de compactage soit statique ou appliquée avec un rouleau vibrant, ce qui correspond à la (figure I-13).

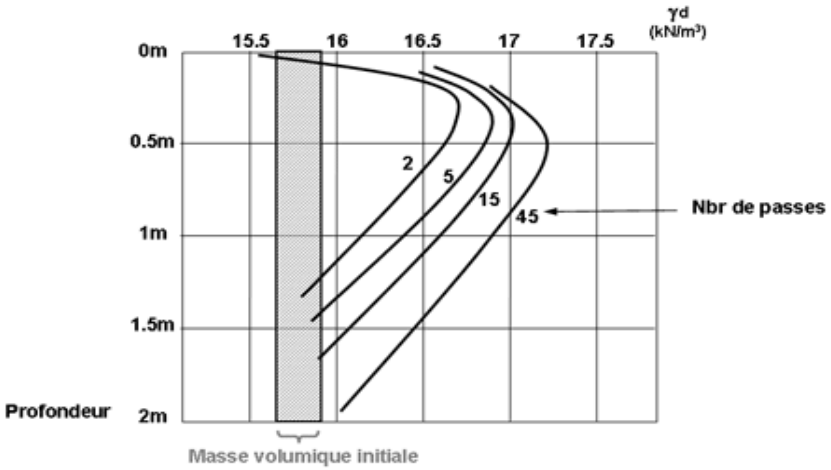


Figure I-13 : Compactage par un rouleau vibrant

En règle générale, pour une épaisseur donnée, l'ensemble de la planche reçoit un compactage considéré comme minimal, par exemple 6 passes, puis est divisé en 3, 4 ou 5 parties qui reçoivent chacune un compactage supplémentaire par rapport à la précédente, de manière à obtenir par exemple, un tronçon de 6 passes, un autre de 8 passes, le suivant de 10 passes, le dernier de 12 passes (une passe correspond à un aller simple du compacteur).

Des mesures de teneur en eau et de densité sèche sont ensuite effectuées dans la partie centrale de chacune des sections (où il n'y a pas d'effet de bord ou de chevauchement).

Le nombre optimal de passes permettant d'atteindre la densité sèche désirée doit être généralement compris entre 6 et 12, afin d'obtenir un remblai de compacité suffisamment homogène et d'optimiser l'utilisation des engins.

Les deux schémas de la (figure I-14) permettent de voir encore deux phénomènes. Sur la (figure I-14 a), on considère un sol à une teneur en eau donnée, et on représente l'évolution de la densité moyenne d'une couche d'épaisseur fixée en fonction du nombre de passages d'un compacteur. Sur la (figure I-14 b), On considère aussi le même sol à une épaisseur donnée, et on représente l'évolution de différents états hydriques en fonction du nombre de passages d'un compacteur. Ceci peut être utilisé en termes de planches d'essai de compactage pour rechercher les conditions optimales.

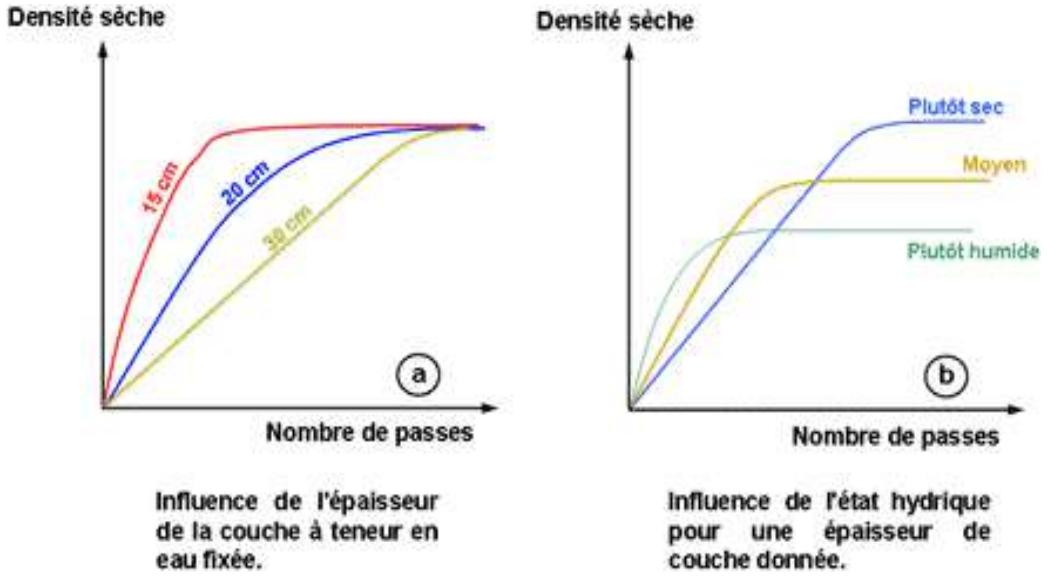


Figure I-14 : Essais de compactage in-situ sur une planche d'essai.

Cette épaisseur, après compactage, doit toutefois rester comprise entre 0,20 et 0,50 m. Il faut vérifier que toute l'épaisseur de la couche est bien compactée. L'exécution d'une tranchée peut permettre de constater l'homogénéité du matériau compacté[2].

I.5 Les engins de compactage

I.5.1 Définition

Nous appellerons engin de compactage, tout matériel de génie civil destiné à compacter un sol ou une couche de chaussé. Mais, avant de décrire les différents engins, nous allons tenter de les classer et de donner quelques notions générales applicables à tous les engins quelles que soit leur nature.

I.5.2 Classement des engins

Il est indispensable de procéder à un classement de ces engins, ne serait-ce que pour pouvoir décrire chacun des types retenus. De nombreuses classifications ont été tentées. Nous mentionnerons celle du Comitee for European Construction Equipement (C.E.C.E), de la fédération nationale des travaux Public (F.N.T.P) et de la Commission d'étude des matériels de Génie Civil (C.E.M.A.G).

La Recommandation pour les terrassements routiers, complétée par la note technique sur le compactage des remblais de tranchées, contient un autre classement que nous utiliserons en y adjoignant, d'une part, un classement morphologique des rouleaux vibrants, et d'autres part, quelques indications sommaires sur les rouleaux à bandages lisses, certes périmés aujourd'hui, mais qui nous paraissent cependant mériter encore une mention, fût-elle historique[2].

I.5.3 Rouleaux

I.5.3.1 Rouleaux à bandage lisse

Les rouleaux à bandage lisse sont les premiers engins de compactage apparus dans la technique, puisque dès 1830 l'ingénieur français Fortin proposa de compacter le macadam par un rouleau pesant 2400 kg, large de 0.75 kg. Description générale et classements

Les engins sont composés d'un châssis très robuste portant la chaîne cinématique (qui comprend le moteur), la cabine, le poste de commande et les roues.

Les roues, qui constituent l'élément compacteur, sont des cylindres en acier d'un diamètre variant de 0.40 m et 2 m. La surface cylindrique s'appelle le bandage lisse. Ces roues comportent, en effet, trois types de dispositions différentes correspondant à trois classes morphologiques différentes :

- Les rouleaux compresseurs tricycles qui comportent une roue large à l'avant souvent divisée en deux éléments contigus. Ce cylindre est de faible diamètre et il est placé dans l'axe du comparateur. Cette roue est directrice, mais non mortice;
- Les rouleaux compresseurs tandems comportent deux cylindres de même largeur à l'avant et à l'arrière ; le deuxième recouvrant exactement le premier. La direction est obtenue en donnant un angle aux axes des deux axes des deux cylindres. Cet engin est très employé pour le compactage des enrobés, mais comme cela a été indiqué précédemment, il ne doit alors venir qu'en deuxième position derrière un compacteur à pneus lourd (ou un engin vibrant).
- La troisième disposition (rouleau à bandages lisses triaxial) est moins fréquente et se rencontre ou s'est rencontrée dans des fabrications américaines, anglaises, danoises et russes. Il lui est reproché une maniabilité et une stabilité insuffisantes. Un constructeur anglais a rendu le bâti de cette machine articulé, ce qui lui donne des capacités d'évolution beaucoup plus importantes[8]. L'épaisseur des couches est généralement entre 15 cm et 25 cm.

I.5.3.2 Rouleaux à pneus

I.5.3.2.1 Généralité

Apparu en France vers les années 1950, ce type d'engins s'est bientôt imposé par ses qualités qui lui ont conféré un quasi université d'emploi. Sols cohérents ou couches de chaussées, graves simples ou graves traitées, enduits superficiels ou enrobés, peuvent être compactés avec ces matériels. Tractés à leurs débuts, ils sont rapidement devenus automoteurs et le nombre de modèles existants ainsi que la variété des solutions, témoignent de l'intérêt porté à ce type d'engin.

I.5.3.2.2 Paramètres de compactage

La partie « active » du point de vue compactage étant constituée par le train de roulement du compacteur à pneus, il convient de lui accorder la plus grande attention.

En effet, l'action du compacteur à pneus bien connue aujourd'hui et que nous n'entendons pas développer ici, fait appel à trois valeurs fondamentales :

- La charge par roue;
- La géométrie du pneumatique et sa pression de gonflage ;
- Le nombre de passe.

I.5.3.2.3 Classification des compacteurs à pneus

Classification des compacteurs à pneus on distingue essentiellement trois types de compacteurs à pneus :

- Compacteurs à pneus tractés à une rangée de roues, très lourds (60 - 100 tonnes) ;
- Compacteurs à pneus tractés à deux rangées de roues, légers (< 15t) ;
- Compacteurs à pneus automoteurs. L'épaisseur des couches compactées pour les engins de compactage à pneus peut varier généralement entre 15 cm et 25 cm.

Tableau I-1 : Type de compacteur

Type de compacteur	**Poids**
Compacteurs à pneus tractés à une rangée de roues	très lourds (60 - 100 tonnes)
Compacteurs à pneus tractés à deux rangées de roues	légers (< 15t)
Compacteurs à pneus automoteurs	

I.5.3.3 Rouleaux vibrants

Derniers apparus sur le marché, les rouleaux vibrants qui ont cependant plus de 20 ans d'existence, se sont maintenant imposés pour à peu près tous les travaux de compactage.

En diminuant ou même en supprimant les frottements entre les grains, la vibration facilite le compactage, comme le montre son utilisation dans le serrage des bétons. Elle permet des actions en profondeur notables, surtout lorsque le rouleau est lourd.

Ces engins sont utilisables pour le compactage des matériaux à angle de frottement interne élevé ce qui explique que leur domaine d'action préférentiel soit celui des assises de chaussées :

- Rouleau mono axe tracté;
- Rouleau monocylindre autotracté;
- Rouleau automobile monocylindre;

- Rouleau tandem transversal;
- Rouleau tandem longitudinal;
- Rouleau automobile mixte vibrant à pneus ;
- Combinaison d'attelages.
- L'épaisseur des couches compactées peut varier entre 15 cm et 30 cm

I.5.3.4 Rouleaux à pieds dameurs

Ce sont des compacteurs très anciens utilisés aux Etats-Unis dès le début des années 30 [8].C'est le type de rouleau qu'utilisait Proctor.

Les compacteurs à pieds dameurs, actuellement sur le marché, sont de trois types :

- Les tandems, à articulation centrale ;
- Les tricycles;
- Les quadri-roues.

Ils ont comme éléments agissants, des cylindres métalliques hérissés de protubérances de forme généralement fixe appelées pieds de mouton ; mais nous verrons qu'il existe d'autres formes de protubérance de noms différents (pieds d'éléphant)

- Rouleaux à pieds de mouton tractés ;
- Rouleaux à pieds dameurs automoteurs ;
- Rouleaux à grille

L'épaisseur des couches est de l'ordre de 15 cm[2].

I.5.3.5 Rouleaux à segments

Les compacteurs automoteurs à pieds dameurs sont caractérisés par des vitesses de travail relativement élevées qui permettent l'obtention de rendement important malgré leur limitation du point de vue de l'épaisseur des couches à compacter[2].

En fin, il est à noter que le passage répété d'engins lourds et le désherbage ont eu notamment une influence notable sur le tassement. On parle alors de compactage, c'est à dire de diminution de la porosité du sol. La notion de porosité est importante pour le fonctionnement du sol car elle conditionne la circulation de l'air et de l'eau[9].

Le tableau suivant illustre l'application de différents équipements de compactage sur différents types des sols

Tableau I-2 : *Application de différents équipements de compactage sur différents types des sols*

Rouleaux de compactage	**Types de sols**	**Efforts de compactage**
Rouleaux à pieds de moutons	Sols sableux fins ; sables limoneux ; argiles ; argiles graveleuses.	Kneading (malaxage)
Rouleaux à pieds dameurs	Tous les sols, à l'exception les sables purs et les argiles pures	Kneading (malaxage)
Rouleaux vibrants à cylindres lisses	Sable ou gravier; sols sableux et graveleux.	Vibratoire (pour les sols granulaires).
Rouleaux à pneus	Sable ou gravier; sols sableux fins ; asphalte.	Statique ou kneading

I.6 Conclusion

Dans le domaine de génie civil il est nécessaire d'affronter les problèmes immenses et complexes que pose le compactage des sols et des matériaux granulaires pour bien maitriser l'art de construction en évitant les dégâts et en assurant une bonne stabilité et durabilité à l'ouvrage. A cause de la diversité des difficultés liées à un ensemble de paramètres naturels et artificiels tout ingénieur ou concepteur est amené à bien comprendre les phénomènes physiques, et les comportements aléatoires des sols. Alors le compactage des sols est un ensemble de procédures qui permettent d'améliorer et obtenir un bon comportement des remblais et des couches de forme à court et à long terme sans avoir de problème dans le futur.

Cette contribution bibliographique a mis en évidence l'ensemble des aspects liés au compactage des sols.



Chapitre II

Compactage à sec



II.1 INTRODUCTION

En 1933 que l'Ingénieur américain PROCTOR mit en évidence l'influence de la teneur en eau et de l'énergie de compactage sur le poids spécifique sec d'un sol grâce à l'essai qui porte son nom Essai proctor, le compactage des sols se fait à l'optimum Proctor, c'est-à-dire que l'essai Proctor réalisé au laboratoire fournit la teneur en eau optimale à laquelle il faut compacter le sol pour obtenir la densité sèche maximale. Seulement, la nature n'offre pas toujours aux ingénieurs la bonne teneur en eau particulièrement en région désertiques et arides où l'obtention de la teneur en eau optimale Proctor nécessite un apport de quantités considérables en eau.

Cet apport est doublement injustifié : d'abord économiquement, puisqu'il nécessite des dépenses supplémentaires tel que le forage, le pompage, le transport, l'épandage, le malaxage, en plus d'une difficile organisation de chantier surtout quand il faut éviter l'évaporation de l'eau entre l'incorporation et la fin du compactage. Ensuite, le contexte environnemental ne permet pas un usage irrationnel de l'eau, particulièrement dans les zones où le climat est aride, et où il est préférable de préserver les ressources hydriques au profit des riverains.

Cependant, le compactage à sec, ou à faible teneur en eau, peut présenter une solution écologique et économique évidente au niveau des zones arides et en milieu désertique. Ce type de compactage est possible pour certains sols et avec certains engins, notamment les compacteurs vibrants.

II.2 HISTOIRE ET EXPÉRIENCES ANTÉRIEURES

La recherche sur le compactage à des faibles teneurs en eau a connu une grande activité à la fin des années 60. Cette recherche a porté principalement sur les types de matériaux qui pourraient répondre à ce mode de compactage et aux engins qui pourraient réussir cette opération. Des études couvrant de larges intervalles de teneurs en eau ont été alors réalisées [1].

II.2.1 L'expérience Australienne

- **En Australie,** des travaux s'étalant entre 1962-1973 ont été résumés par the Australian Road Research Board dans un rapport. Des précautions climatiques et de temps ont été pris pour réaliser ce mode de compactage ainsi que l'utilisation des engins lourds de compactage a été favorisée. Des sols supports dans les zones arides ont été compactés à sec mais les matériaux de chaussées ont été à l'optimum Proctor au rouleau. Dans les régions à argiles

expansives, des essais ont été effectués pour compacter à la teneur en eau d'équilibre finale estimée afin de minimiser la variation de volume et les fissures[1].

II.2.2 Expérience Européenne

- **En Europe,** dans le passé, on note très peu de travaux sur le compactage à sec. En Angleterre et en France. Des recherches s'intéressent plus à des techniques de construction dans les zones arides. Dans ce contexte, des sables ont été compactés à sec en Angleterre**.**
- **En France**, des travaux sur des sables quartzeux compactés à sec se sont révélés particulièrement intéressants**.** La plus grande densité sèche a été obtenue à une teneur en eau nulle et de bons résultats ont été obtenus par une large gamme de rouleaux vibrants.
- **The Norwegian Road Research Laboratory** a étudié le compactage à sec d'un gravier du Kenya et a conclu que le meilleur résultat du compactage est obtenu quand la teneur en eau utilisée est proche du zéro[1]**.**

II.2.3 Experience Africaine

- **En Afrique du sud,** l'université de Pretoria a accompli une étude en trois parties sur le compactage des sols en zones arides**.** Les travaux ont consacré une large partie sur l'étude des additifs pour améliorer le compactage. Cette étude a été suivie par un rapport sur l'utilisation de ces additifs**.** Des additifs qui sont des agents actifs de surface qui réduisent la tension de surface de l'eau et l'amènent à mouiller plus efficacement la surface des grains à compacter. Une panoplie de ces produits a été développés et proposés sur le marché. Le rouleau à impacts a été développé en Afrique du sud à l'origine pour compacter les sols mous mais il s'est avéré très efficace pour le compactage à des profondeurs de 2 à 4 mètres des sables uniformes à de très faibles teneurs en eau**.**
- **En Afrique du Nord**, aussi des essais sur des graviers naturels bien gradués utilisés comme matériaux de remblai ont été effectués au Maroc avec un succès relatif.
- **Au Soudan**, un essai de compactage à grande échelle a été entrepris par la **T.R.R.L** avec la collaboration de **the Sudanese Roads and Bridges Public Corporation**. Le site expérimental est situé à 27 km à l'ouest de Sennar. Ce site construit en juin 1978 sur le projet routier de Wad Madani-Sennar-Kosti a été conçu pour étudier le compactage à sec d'une argile silteuse noire qui sera utilisée dans la construction de remblai de chaussées et les sols supports[2].

- **Au sud du Mali**, des essais de compactage à sec ont été réalisés sur des routes en gravier et ont donné de résultats particulièrement satisfaisants. La technique est depuis très utilisée dans les autres régions, elle est menée par **U.N.D.P Sahelian Feeder Road Project.t**
- **Au Niger**, une autre expérience aussi de compactage à sec a été conduite dans le cadre des travaux de réalisation de la route Tahoua-arlit, afin d'évaluer l'intérêt de l'emploi, a leur teneur en eau naturelle : d'un sable fin *0/1 mm* présentant un équivalent de sable de l'ordre de *50* (sol B_1) pour constituer le remblai ; d'un tout-venant de reg qui est une grave bien graduée *0/100 mm* ayant *5* à *20 %* de fines (sol C_l à C_2) pour réaliser la couche de base de la chaussée[2].

Après une étude de compactage en laboratoire à la dame *Proctor* et à différentes énergies, des essais de compactage en vraie grandeur de compactage au moyen de rouleaux vibrants et d'un compacteur à pneus utilisé en atelier après le rouleau vibrant ont été effectués.

Les résultats (densités moyennes) ont permis de montrer que le compactage à faible teneur en eau du sable pouvait être utilisé sous réserve de prévoir un traitement de la partie supérieure du remblai (couche de forme) par arrosage ou apport d'une grave en couche mince. La dispersion des résultats obtenus sur le tout-venant de reg n'a pas permis de dégager une méthode de compactage à sec de ce matériau[2].

- **Au Maroc,** le compactage à sec peut représenter une solution écologique et économique dans la mesure où il favorise la réutilisation des matériaux résultants des déblais, présents dans leur état hydrique sec ou très sec. L'opportunité s'est présentée au Maroc lors des projets autoroutiers **Settat- Marrakech** et **Marrakech-Agadir**. Pendant la réalisation de ces deux chantiers, la Société Marocaine des Autoroutes du Maroc **(ADM)** a été confrontée à des matériaux schisteux présents sur le site à l'état sec voir très sec. Conventionnellement, le réemploi de ces matériaux en l'état est exclu. Par ailleurs, le changement de l'état hydrique par humidification n'était pas envisageable, à cause de l'aridité du site et des ressources en eau que **(ADM)** a souhaité préserver au maximum. Le souci majeur a été de préserver l'environnement, donc **(ADM)** a opté pour la réutilisation maximale de ces matériaux évitant ainsi la multiplication des dépôts et des emprunts. Et surtout préserver les ressources en eau. Pour ce faire, **(ADM)** a engagé des études en vrai grandeurs avec différents matériaux pour étudier la possibilité de les réutiliser à l'état très sec qui ont abouti à l'optimisation de la réutilisation et à l'emploi de ces matériaux dans leur état très sec.

Cette expérience a été concluante et a permis l'édification des remblais jusqu'à 12m de hauteur. A noter que le Maroc est le seul pays au monde à avoir construit le plus d'autoroutes en utilisant cette technique, qui a permis la préservation d'environ 4 milliards de litres d'eau et éviter la multiplication des dépôts et des emprunts qui tachent souvent l'environnement proche de l'autoroute[1].

II.2.4 Expérience Algérienne

Un programme d'essais a été tracé dans les *années 1970*, pour appuyer et suivre les projets de construction des routes dans le sud du pays. A cet effet une planche expérimentale a été réalisée à Tamanrasset. Les laboratoires Nationaux des Travaux Publics ont réalisé les essais et interprété les résultats. Ils ont retrouvé trois rapports sur le compactage à sec de *Tamanrasset*, la première date de décembre *1975*, un autre en *aout 1976*, et un dernier du *13* avril *1977*. Le rapport trouvé sur l'étude *1977* au **(LCTP)** est incomplet. Il cite cinq planches expérimentales, les matériaux utilisés dans ces planches sont des matériaux locaux, les arènes granitiques et le tout venant des plateaux *TVP*. Si l'on se base sur le rapport, l'étude n'était pas vraiment concluante.

Ces planches d'essais ont confirmé l'excellence du comportement des *TVP* à tout point de vue et mis à jour une différentiation au niveau des arènes. Une différence de granulométrie relativement minime amène des gains non négligeables sur les densités et les essais de portance. On aura intérêt à rechercher préférentiellement ces zones d'arènes grises, évaluer leur importance par rapport aux arènes jaunes (profondeur, été). Ces planches ont aussi mis en évidence l'importance des matériaux choisis, plus que l'importance du rouleau, bien que ces derniers soient quand même différenciés. Le rouleau léger a l'avantage sur les deux rouleaux lourds à peu près équivalents[1].

II.3 RÉPARTITION DES ZONES ARIDES

- **Dans le Monde**

Dans les régions arides où on les a souvent localisés, il y a eu un véritable développement de l'industrie, de l'agriculture et de l'urbanisme grâce aux progrès récents de l'irrigation. Ceux-ci impliquent évidemment, l'utilisation de grandes quantités d'eau. Les tassements excessifs qui en résultent ont donné une impulsion à l'étude de ces sols. Certains chercheurs se sont penchés sur les méthodes d'identification et de traitement, etc., d'autres études ont été consacrées aux mécanismes de l'affaissement, etc.

Wri, 2002 vient de proposer que pour classer les zones arides il faut considérer les valeurs du rapport précipitation annuelle / évapotranspiration potentielle moyenne annuelle, donc le monde a été divisé en :

- Les zones hyper arides couvrant environ 11 million de Kilomètres carrés, soit 8% des terres totales et elles correspondent principalement au désert du Sahara.
- Les zones arides, semi-arides et subhumides sèche et couvrent près de 54 million kilomètres carrés, épars dans tous les continents, mais elles sont principalement concentrées en Asie et Afrique[10]**.**

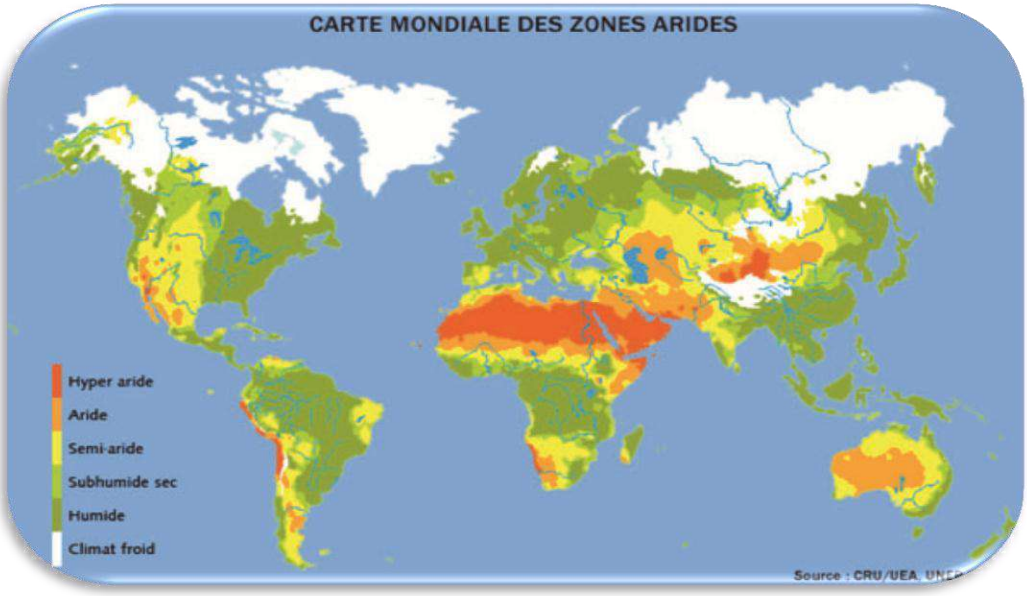


Figure II-1 : *Carte mondiale modern des zones arides (UNEP/DEWA).*

- **Dans l'Algérie**

Le sud algérien est constitué en grande partie par des formations lœssiques et constitue de nos jours une zone pourvue d'un fort potentiel de développement agricole et constitue par conséquent un transit obligé d'ouvrages de transport d'énergie d'hydrocarbures. L'occupation de cette région présente un risque d'effondrement des ouvrages érigés sur des sols « collapsibles ».

La classification bioclimatique divers et sauvage été largement adoptée en régions méditerranéennes. Cinq étages du bioclimat méditerranéen ont été définis pour l'Algérie Saharien, aride, semi-aride, sub- humide et humide[10].

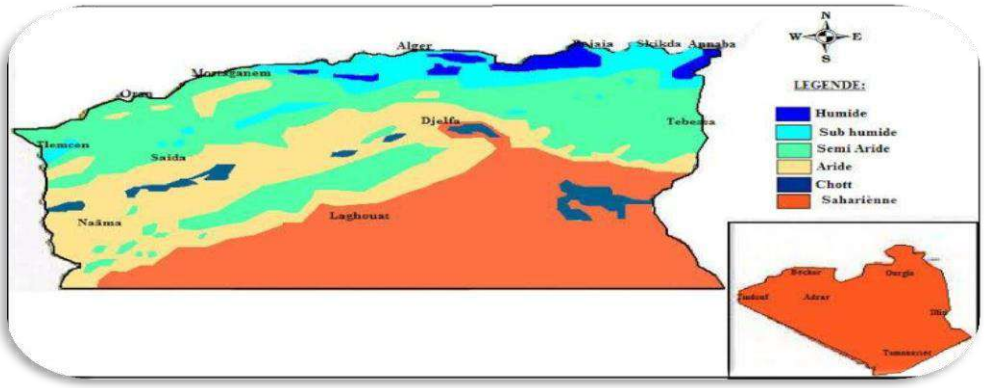


***Figure II-2** : Répartition des précipitations dans le nord de L'Algérie FAO 2005.*

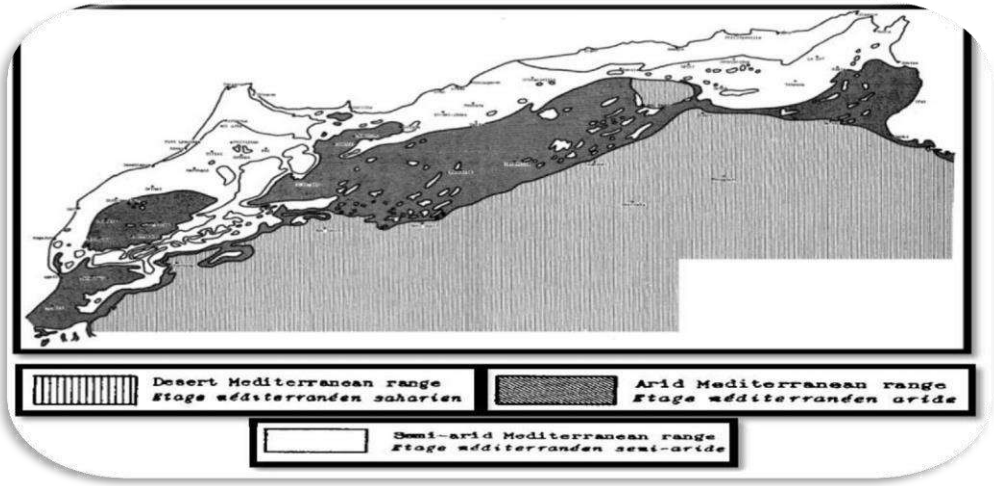


***Figure II-3 :** Carte des régions arides et semi-arides de l'Afrique du Nord, par l'Institut International de la (1950).*

II.4 LE CONTEXTE SAHARIEN

II.4.1 Le climat

Le sud algérien est caractérisé par des étés très chauds (50° à l'ombre) et des hivers rudes avec d'importants écarts de température (-5° le soir et 30° le jour).

Les pluies sont rares et tombent généralement sous forme d'averses (précipitations annuelles moyennes inférieures à 50 mm qui peuvent tomber en une ou deux averses). Les vents de sable y sont fréquents.

La zonalité climatique en Algérie basée sur la pluviométrie est la suivante :

Zone I : méditerranéenne humide H > 600 mm ;

Zone II : méditerranéenne subhumide 350 mm < 600 mm ;

Zone III : semi-aride ou steppique 100 mm < 350 mm ;

Zone IV : aride ou désertique H < 100 mm.

D'après cette classification, le Sahara est caractérisé par une pluviométrie moyenne annuelle inférieure à 100 mm, à laquelle s'ajoutent d'autres paramètres :

Des températures très variables et élevées en été (entre 38 et 45°C) ;

- Un écart thermique entre le jour et la nuit, de 12 à 15°C en été et de 9 à 15°C en hiver ;
- Une extrême sécheresse atmosphérique;
- Une fréquence des vents de sable ;
- Une rareté et irrégularité des pluies [11].

II.4.2 Le relief

Le sud algérien est caractérisé par un relief peu accidenté constitué par de vastes pénéplaines. Les paysages sont généralement monotones à l'exception de quelques zones montagneuses ou passages d'ergs[11].

II.4.3 Principales ressources en matériaux locaux dans le Sud algérien

L'uniformité de l'aspect de surface du sol saharien dissimule une grande variété de matériaux ; on distingue :

- Des encroûtements calcaires ;
- Des encroûtements gypso-calcaires ;
- Des sols gypseux ou salins ;
- Du tout-venant de plateaux ;
- Du tout-venant de buttes et pentes ;
- Des arènes granitiques ;
- Des sables et des argiles[11].

II.4.4 L'hydrogéologie

Du point de vue hydrologique, on distingue deux zones :

- La partie secondaire et tertiaire constituant le Nord du Sahara et renfermant diverses nappes souterraines dont l'une « Albienne » est particulièrement abondante et étendue.
- La partie primaire constituant l'extrême Sud où les seules ressources disponibles sont constituées par des nappes d'enfer flux des oueds importants[11].

II.5 LA TECHNIQUE ROUTIÈRE SAHARIENNE

II.5.1 Principale innovation

La principale innovation de la technique routière saharienne a été l'utilisation en couches de chaussée de matériaux fins, utilisation rendue possible grâce au climat et au trafic relativement faible prévue sur les routes à construire[12].

II.5.2 Les idées générales

- Le trafic saharien est essentiellement composé de camions gros porteurs souvent en surcharge ; donc on se dirigera vers une chaussée qui accepte sans désordres immédiats des déformations élastiques même relativement importantes, car les répétitions de charges étant faibles, les phénomènes de fatigue doivent apparaître lentement.
- Le climat saharien est très sec. Les quelques pluies tombent presque toujours en précipitations relativement importantes pendant un temps très court.
- L'imbibition n'est pas à craindre à la seule condition que la forme de la surface permette l'écoulement des eaux.
- Le problème des chotts doit être dissocié de la technique routière saharienne[12].

II.5.3 Principe de la technique

- Le matériau de la couche de base doit pouvoir supporter des déformations élastiques (réversibles) ;
- Grâce au climat sec, la résistance de la couche de base peut être obtenue soit par frottement entre grains, soit par cohésion ;
- L'épaisseur de la couche de base peut être faible car le sol de fondation étant sec, sa portance est en général bonne (C.B.R > 20) ;
- La possibilité d'utiliser des matériaux cohérents plus ou moins argileux en couche de base impose de s'assurer du bon écoulement des eaux de pluie[12].

II.5.4 Domaine d'application

- Climat très sec (moyenne annuelle des pluies < 100 mm) ;
- Risques d'imbibition des sols sous chaussées très réduits[12].

II.6 LES MATÉRIAUX UTILISÉS AU SAHARA ALGÉRIEN

La construction des chaussées au Sahara, se fait avec des matériaux locaux généralement subnormaux, car ne répondant pas aux spécifications des matériaux granulaires classiques.

D'une manière générale, nous pouvons les classer en quatre familles :

II.6.1 Les tufs calcaires

Provenant d'encroutements calcaires. Ils se présentent le plus souvent sous forme de graves avec une granulométrie étalée. Les éléments sont moins durs qu'un calcaire ordinaire ce qui implique un squelette friable. Le squelette est construit par le phénomène du durcissement de la fraction fine composée essentiellement de carbonate de calcium (CaCO3).

Après malaxage à l'eau, compactage et séchage le matériau se traduit par une cohésion appréciable. Donnons dans la titre indicatif le fuseau du tuf calcaire de la région de Bougtob utilisé sur la RN°06.

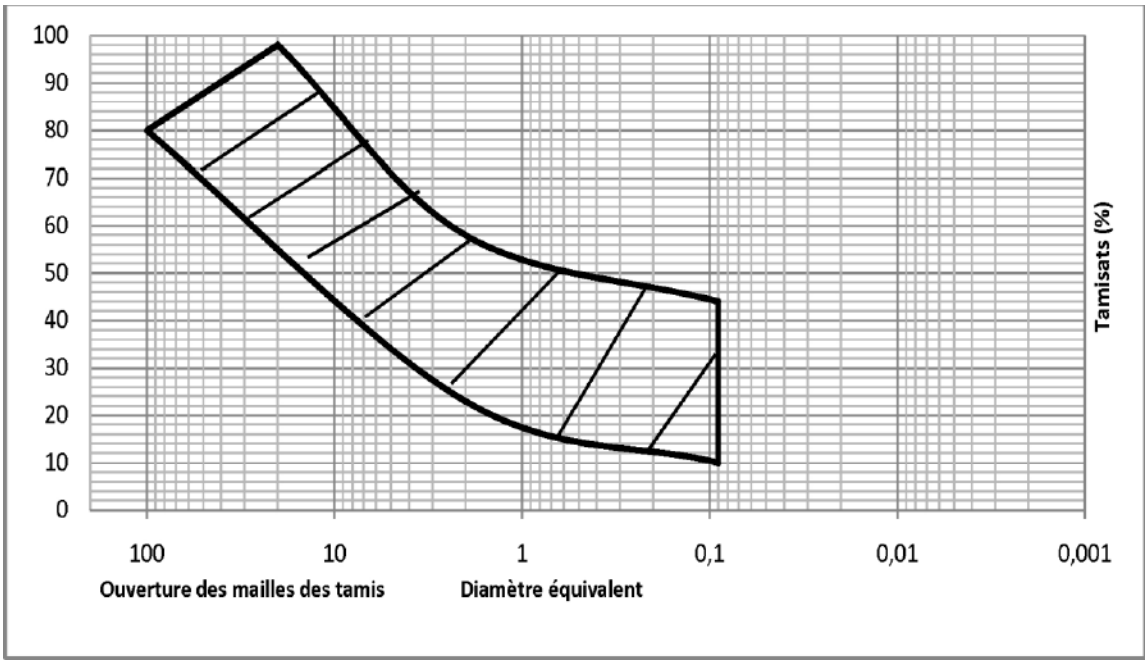


Figure II-4 : *Fuseau granulométrique du tuf calcaire utilisé dans la RN° 06 de la région de Bougtob* ***(Tliba, 1994)***.

La résistance à la compression est bornée entre 18 et 32 kg/cm2 à 95% de la densité optimale. Elle varie entre 29 et 37 kg/cm2 pour 98% de la densité optimale. Ce matériau présente un coefficient los Angles L.A compris entre 40 et 60%.

II.6.2 Sable gypseux

Matériau ayant la granulométrie d'un sable (figue II.2) donc complètement dépourvu de squelette solide, les grains y sont essentiellement de nature gypseuse (CaSO42H2O). Comme les tufs calcaires, ils sont caractérisés par le durcissement après malaxage à l'eau, compactage et séchage ce qui confère au matériau une forte cohésion à sec.

Ce sable a une résistance variant entre 15 et 45 kg/cm2 pour une compacité de 95%. Pour une compacité de 98% la résistance varie entre 20 et 45 kg/cm2. La teneur en gypse (ça) est de 60% et 90%.

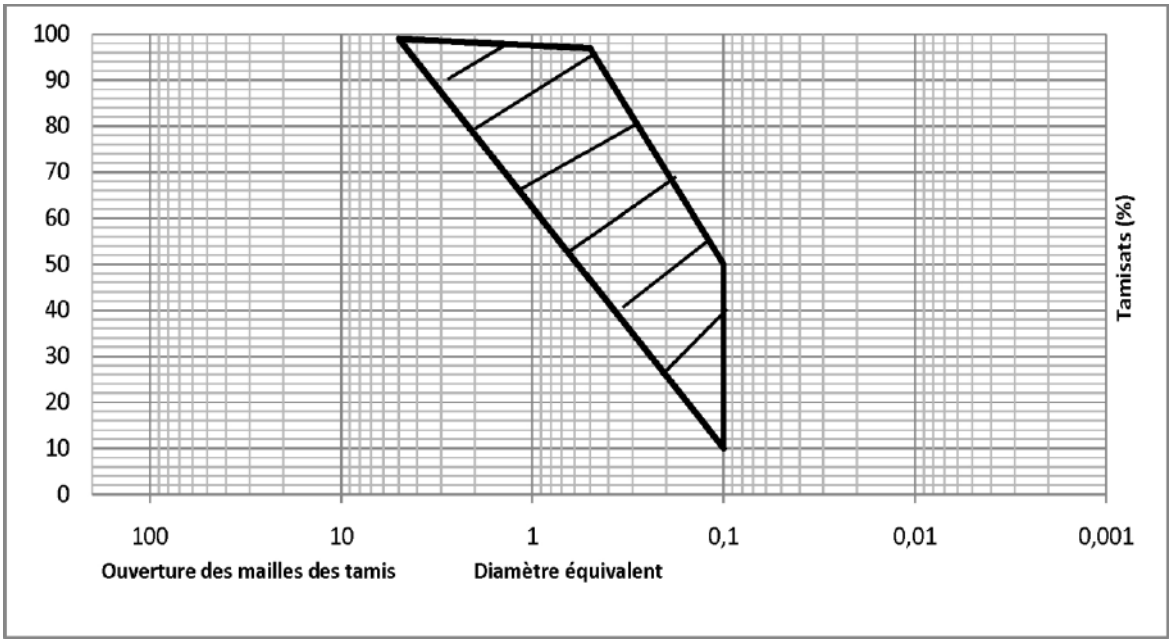


Figure II-5 : Fuseau granulométrique du Sable gypseux de la région nord d'El-Oued

II.6.3 Tout venant

Au Sahara, on trouve les tout-venants sur les surfaces des regs. Ils sont en générale des graves composées d'éléments anguleux et contenant une fraction fine argileuse carbonatée qui leur confère une importante cohésion (figue II.6).

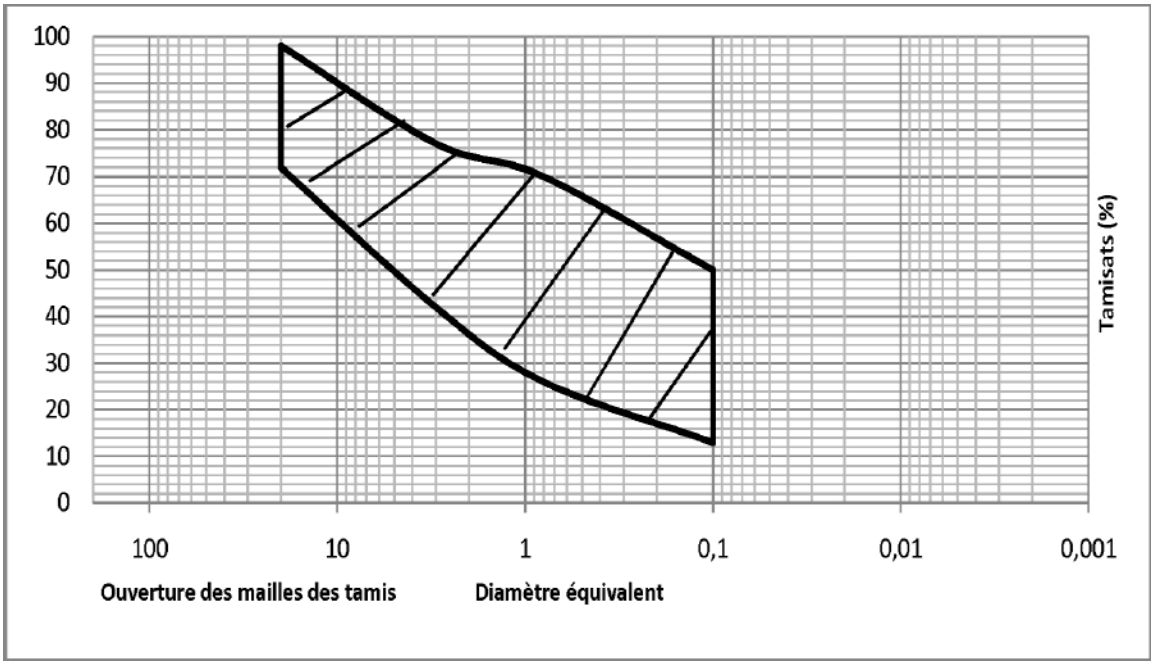


Figure II-6 : Fuseau granulométrique des tout-venants de plateau de TinRhert

II.6.4 Arène granitique

On illustre dans la (figue II.7) les caractéristiques du Fuseau granulométrique de l'arène granitique de Tamanrasset.

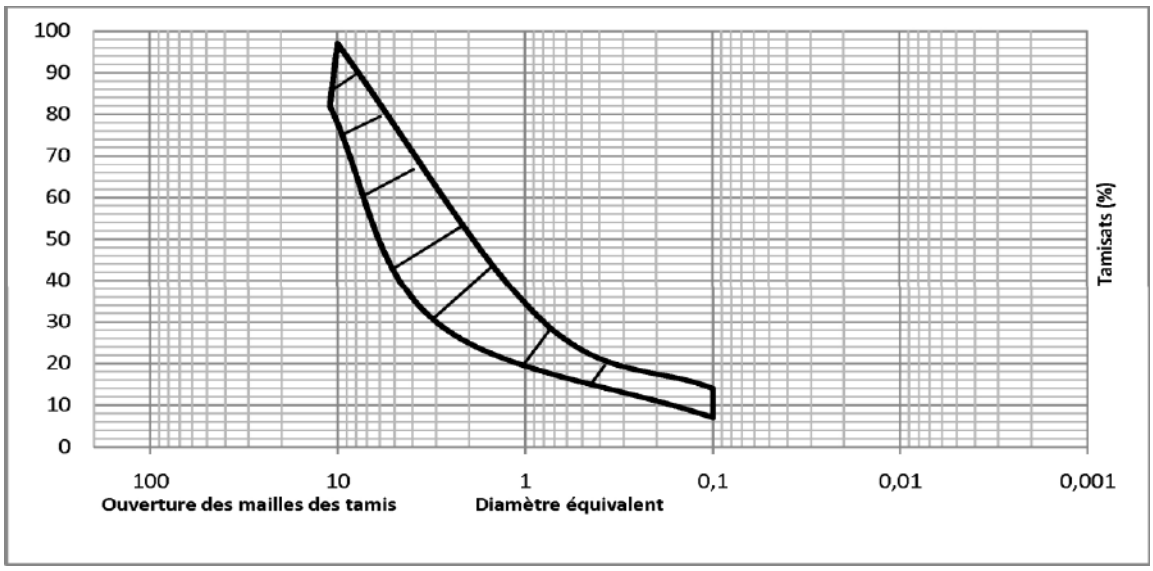


Figure II-7 : Fuseau granulométrique des Arènes granitiques de Tamanrasset

II.7 CLASSIFICATION DES MATÉRIAUX

Il est établi que l'environnement désertique permet l'utilisation, en corps de chaussée, d'une large gamme de matériaux : depuis les graves caillouteuses jusqu'aux matériaux fins en passant par ceux dont la courbe granulométrique est tout entière à l'intérieur d'un fuseau discriminant de type A.A.S.H.O, voir (Figure II.8), fuseau discriminant de Béni-Abbes. Les matériaux sont alors classés en trois familles selon leur granularité :

Famille I : ceux dont la courbe granulométrique se trouve au-dessous du fuseau entièrement ou partiellement (zone I du graphique). Ce sont des matériaux à ossature à forte teneur en vide (ballast). Il n'est pas interdit d'envisager leur emploi en couche de base ou de fondation mais chaque cas doit être étudié en fonction des risques de ségrégation et de compactage ; parfois la réalisation de planches d'essai est nécessaire avant de se prononcer.

Famille II : les matériaux dont la courbe granulométrique est tout entière à l'intérieur du fuseau (zone II du graphique) ; Ces matériaux doivent leur tenue à l'enchâssement des différents éléments et à l'angle de frottement important dû au contact grain sur grain ; on les appelle matériaux à angle de frottement élevé. Ce sont des matériaux à ossature, analogues à ceux dits classiques utilisés en zone humide pour lesquels il est toutefois toléré quelques faibles écarts grâce à la sécheresse (pourcentage de fines plus élevé). Ce type de matériaux doit assurer une certaine cohésion tout en évitant une lubrification du squelette.

Famille III : ceux dont la courbe se trouve au-dessus du fuseau entièrement ou partiellement (*zone III du graphique)*. Matériaux à matrice d'éléments fins, le squelette est inexistant ou noyé dans les éléments fins. Ces matériaux sont caractérisés par :

- Leur nature minéralogique (taux de carbonates, sulfates, chlorures et insolubles) ;
- Leur résistance à la compression simple ;
- Leur susceptibilité à l'humidité (gonflement, retrait chute de résistance).

Les seuils imposés à ces paramètres dépendent du niveau de service pour lequel ils seront sollicités (couche de fondation, couche de base, nature et intensité du trafic).

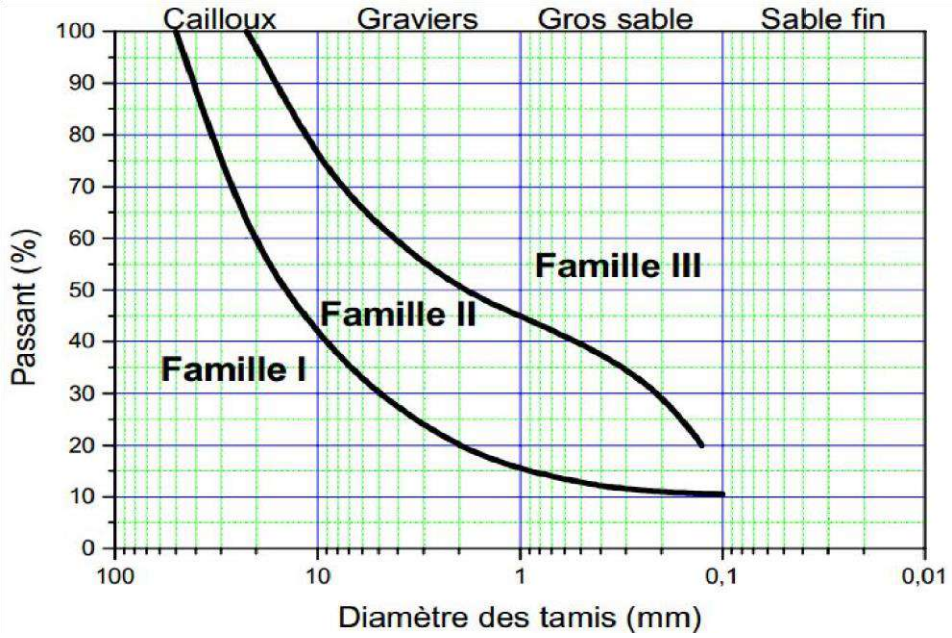


Figure II-8 : Fuseau discriminant de Béni-Abbes.

II.8 ASPECTS SPÉCIFIQUES DU COMPACTAGE À SEC

D'après le Guide marocain des terrassements routiers le compactage à sec ou à faible teneur en eau présente des aspects spécifiques concernant :

- La variation de la densité sèche (γ_d) en fonction de la teneur en eau (w) ;
- La variation de la densité sèche (γ_d) en fonction de la profondeur de couche[1].

II.8.1 Variation de la densité sèche en fonction de la teneur en eau

Les études réalisées au laboratoire montrent que lors de la réalisation de la détermination, pour une énergie de compactage donnée, de la courbe représentative $\gamma_d = f(w)$ depuis une teneur en eau quasi nulle jusqu'à la saturation, la courbe obtenue fait apparaître souvent deux teneurs en eau caractéristiques [1]:

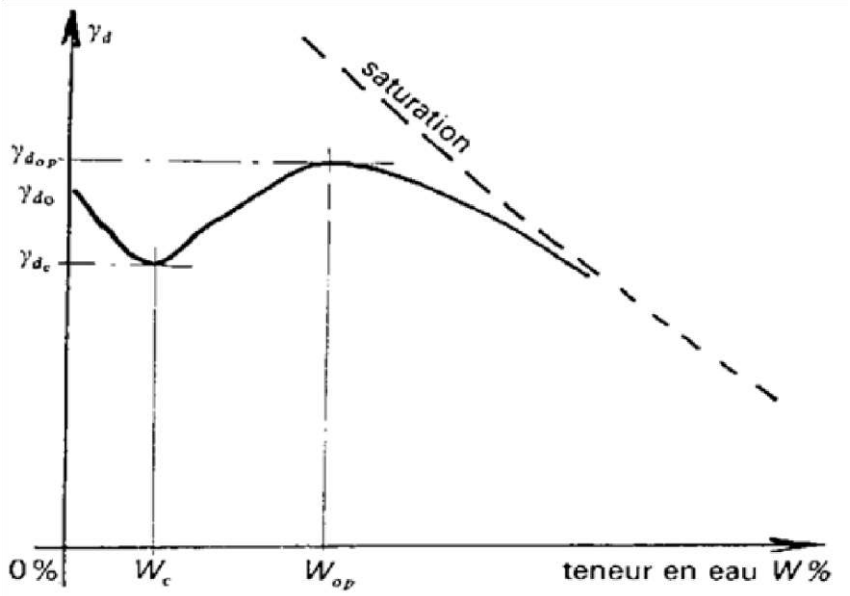


Figure II-9 : *Courbe Proctor complète*

La courbe obtenue fait apparaître souvent deux teneurs en eau caractéristiques :

- **Teneur en eau optimale (W_{opt}),** classique conduisant à la densité sèche maximale **(γ_{dopt})** de l'essai Proctor.
- **Teneur en eau critique (W_c),** pour laquelle la densité sèche passe par un minimum de et celle-là est la teneur en eau à partir de laquelle (γ_d) croit nettement avec (w). Entre une teneur en eau nulle et (Wc), la densité décroît en général.

Sur la courbe de la (Figure. II.1) certaines valeurs de densités sèches peuvent être obtenues avec trois teneurs en eau différentes à la même énergie de compactage. Il est donc nécessaire de comprendre la faisabilité de ce compactage à sec dans la pratique et quels sont les matériaux qui présentent cette forme de courbe.

Il faut noter également que la valeur de la densité sèche du matériau compacté représente le paramètre le plus important dans l'évaluation du compactage, néanmoins il est important de considérer d'autres facteurs qui sont les hautes teneurs en air (vides), la succion des sols et la faible cohésion des sols secs. Ces paramètres peuvent causer des difficultés pendant et après la construction des remblais réalisés dans ces conditions de faibles teneurs en eau[1].

II.8.2 Variation de la densité sèche en fonction de la profondeur de couche

La courbe de variation de la densité en fonction de la profondeur de couche $\gamma d = f(z)$ présente une allure semblable à celle obtenue par un compactage classique. *(figure II.7)*

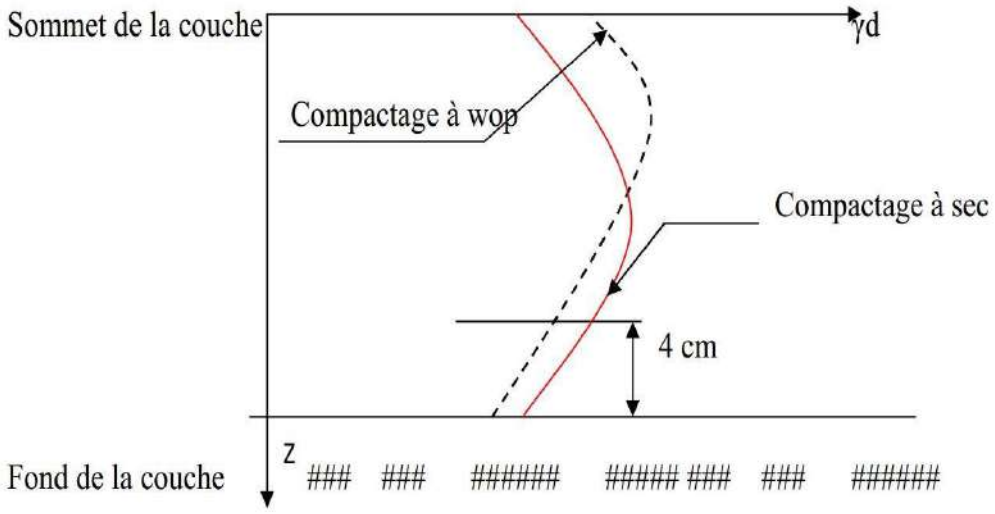


Figure II-10 : Variation de la densité en fonction de la profondeur (LCPC, 1987).

Cependant les deux courbes présentent les différences suivantes :

- La densité obtenue au niveau de la partie supérieure de la couche est beaucoup plus faible pour un compactage à sec.
- La zone de surface est donc toujours mal compactée.
- Les densités en fond de couche sont à peu près comparables.

Le compactage de la zone de surface doit se réaliser à travers la couche suivante sus-jacente.

II.9 RECOMMANDATIONS DE LA NATURE DES MATÉRIAUX DONNANT LES MEILLEURS RÉSULTATS AU COMPACTAGE À SEC

Les sols qui donnent les meilleurs résultats au compactage à faible teneur en eau sont donnés ci-après, en milieu désertique ces sols sont aussi utilisables en couche de forme.

- Les sols fins peu plastique A1 et A2: les sols A_1 peuvent poser des problèmes de traficabilité pour les engins de compactage.
- Ces sols nécessitent aussi de procéder à une trituration préalable (surtout pour A_2). Telmcen
- Les graves et sables propres : D_1, D_2, C_1D_1, B_1 et B_3 ;
- Les graves et sables peu argileux : B_2 et B_4 ;
- Les graves et sables très silteux : B_5 ;
- Les graves et sables argileux : B_6 avec ($I_p < 25$) ;
- Les tufs Tc et Tf ;
- Les sols C_1.

II.10 MODALITÉS DE COMPACTAGE À FAIBLE TENEUR EN EAU

Les modalités de compactage à faible teneur en eau concernent :

Les types de compacteurs utilisables et les conditions de leur utilisation.

Les conditions d'utilisation des sols (épaisseur max. dispositions particulières éventuelles).

Les types de compacteurs utilisables Les compacteurs utilisables sont :

- Les rouleaux vibrants ;
- Les compacteurs à pneus.
- Les autres types de compacteurs ne sont pas utilisables.

Il est nécessaire au niveau du chantier de chercher à moduler la pression de gonflage pour assurer un niveau de traficabilité acceptable et une efficacité maximale de compactage.

Les conditions d'utilisation des sols Les conditions d'utilisation des sols concernent :

L'épaisseur maximale de la couche compactée ;

Les différentes dispositions constructives à respecter en matière de finition. Ces conditions sont résumées ci-après. Elles se rapportent aux classes de sols présentées ci-dessus et aux sols tuf faces Tc et Tf

II.11 MATÉRIAUX ET MISE EN ŒUVRE

II.11.1 Terrassement

Les routes en zones désertiques sont souvent réalisées en remblai de faible hauteur *20* à *30 cm*, cette disposition facilite le drainage et modifie favorablement la teneur en eau d'équilibre sous chaussée ;

Les déblais sont à éviter autant que possible car ils favorisent l'ensablement des chaussées.

Il n'y a pas de sélection de matériaux pour l'exécution des terrassements à l'exception des matériaux trop fins et pulvérulents qui sont à écarter :

Lorsque les matériaux de bonne qualité sont disponibles à des distances de transport économiques, les remblais sont confectionnés avec ces matériaux et constituent déjà une fondation qui permet de réduire au minimum l'épaisseur du corps de chaussée (couche de base d'environ *15 cm*) ;
En zones dunaires, le sable peut constituer le corps du remblai, cependant sa mise en œuvre pose des problèmes particuliers : difficultés de répandage du matériau de couche de base sur le sable de dune, cette opération ne peut se faire sans contamination de la couche supérieure sauf si l'on prend des précautions lors de la mise en œuvre (approvisionnement à l'avancement) ;

Les terrassements sont compactés à sec de manière à atteindre des densités de l'ordre de *90 %* de *l'Optimum Proctor*. La dernière couche étant compactée à l'eau, à *96 %* de *l'optimum Proctor* ;

La couche supérieure des terrassements devra être traitée de façon à acquérir une compacité maximale, de l'ordre de *98%* de *l'Optimum Proctor*.

II.11.2 Couche de fondation

Dans les zones désertiques, la présence de sol mou n'est pas envisageable ; de même, les conditions climatiques arides ont pour conséquence la rigidité des sols supports et des assises.

Le principe d'une assise unique est alors retenu ; son épaisseur varie entre *15 cm* et *30 cm*. Elle est réalisée, à chaque fois que c'est possible avec un matériau identique soumis à des normes strictes.

Lorsque les matériaux performants (par rapport aux normes imposées par la technique routière saharienne) ne sont pas disponibles en quantité suffisante, les *10 cm* inférieurs (jouant le rôle de couche de fondation) sont alors réalisés avec un matériau ayant des caractéristiques moins bonnes.

La couche de fondation est mise en place sur la plate-forme support de la chaussée (terrassements terminés) par compactage avec humidification et est exécutée sur toute la largeur de la plate-forme.

II.11.3 Couche de base

La couche de base est compactée avec humidification et exécutée sur toute la plate-forme. Lorsqu'elle est terminée, elle a une largeur de *7,50* à *10,50 m* suivant les projets, avec des élargissements sur certaines sections-passages submersibles, remblais de grande hauteur, etc. Les matériaux utilisés en couche de base appartiennent soit à *la famille II* (matériaux à ossature), soit à *la famille III* (matériaux fins).

La construction des chaussées avec matériaux fins, dits à *cohésion élevée,* est le privilège des régions à climat sec. On détermine leur qualité par des essais *d'Atterberg*, l'analyse chimique et on apprécie leur cohésion par des essais de résistance à la compression simple. Cet essai est effectué sur des éprouvettes type sol :

- Compactées humides, à la teneur en eau *Optimum Proctor Modifié* ;
- Présentant une densité sèche égale approximativement à *95%* de la densité sèche maximum *Proctor Modifié* ;
- Séchées à une température de *60°C* maximum.
- Leur résistance doit être au moins de *25 bars* à teneur en eau finale quasiment nulle.

Ces matériaux nécessitent une teneur en eau optimale élevée, d'où les risques de retrait au séchage et de fissuration.

La résistance chute brutalement avec la compacité (de l'ordre de *50%* quand on passe de *98* à *95 %* de l'optimum Proctor modifié) ; il est donc indispensable d'exiger un bon compactage avec des tolérances très limitées.

Il est à noter qu'un bon compactage est souvent difficile à obtenir, lorsque le matériau est très fin car sa surface spécifique importante exige :

- Une teneur en eau au moment du compactage parfaitement homogène et proche de *l'Optimum Proctor Modifié* ;
- Un malaxage puissant;
- Une grande énergie de compactage.

Il est également déconseillé de rapporter, sur une surface déjà compactée, une couche mince car il se produit ce qui est appelé le *feuilletage :* la couche supérieure se détache du corps de chaussée dès qu'un effort lui est appliqué ; une reprise sur l'épaisseur totale de la couche de base par grattage des matériaux déjà mis en place est indiquée lorsqu'une correction s'impose.

Ces types de matériaux sont assez aléatoires et demandent une mise en œuvre soignée. Ils donnent un excellent uni. Leur tenue est parfaite en l'absence d'eau mais leur imbibition avec maintien du trafic lourd entraîne la ruine de la chaussée.

II.11.4 Couche de roulement

II.11.4.1 Imprégnation

Préalablement à la réalisation d'une couche de roulement, les matériaux (d'encroûtements notamment), doivent recevoir une couche d'imprégnation bitumineuse dont l'utilité est triple :

Assurer l'accrochage de la couche de roulement sur un matériau souvent très fermé en surface ;

Servir éventuellement de couche de roulement provisoire ;

Protéger la couche de base d'éventuelles précipitations.

L'imprégnation est réalisée sur toute la largeur de la plate-forme, le plus souvent au cut-back *0/1* et parfois au cut-back *10/1*.

Les assises de chaussées étant réalisées avec des matériaux naturels non élaborés et en couches relativement minces, les déflexions élastiques produites sont relativement importantes (de l'ordre du millimètre). Ceci impose l'exécution d'un revêtement souple et mince. Selon l'intensité du trafic, la couche de roulement sera constituée par un enduit superficiel, un enrobé à froid, un enrobé à chaud ou un sable bitume. Toutefois, l'enrobé à froid est le plus indiqué.

Actuellement le revêtement est réalisé sur une largeur de *7 m* avec des élargissements sur certaines sections, car les anciennes routes revêtues sur une largeur moindre ont connu des dégradations prématurées, par les accotements, malgré le faible trafic.

II.11.4.2 Enduits superficiels

- Le dosage en liant hydrocarboné est assez élevé : les films de liant sont assez épais pour que le vieillissement soit lent, malgré la température et la présence permanente de sable fin siliceux

éolien ; le liant garde ainsi sa ductilité assez longtemps. Les risques de ressuages ne sont pas graves au Sahara à cause de l'apport continu de sable fin siliceux éolien en surface déchaussée.

- La couche est assez compacte pour que du sable éolien ne s'introduise pas dans les interstices du gravier et mobilise le liant au détriment des liaisons entre grains.

L'enduit superficiel retenu pour les zones arides est soit une bicouche, soit une tri couche dont la formulation est la suivante :

Bicouche : *8/16* et *3/8* ou *12,5/18* et *5/12,5* ;

- Tricouche : *15/25* ; *8/15* et *3/8*.

La réussite des enduits superficiels est souvent difficile à cause de la pollution des granulats par le sable éolien et l'absence de compactage par un trafic régulier ; les rejets de granulats sont importants et constituent un grave danger pour les véhicules circulant à grande vitesse.
Les enrobés ouverts sont plus faciles à mettre en œuvre et donnent un uni de meilleure qualité. Enrobés ouverts à froid

Les enrobés ouverts ont l'avantage d'être assez souples aussi, mais l'épaisseur de la couche les soumet à une fatigue accélérée. Leur formulation se présente comme suit :

- Granulométrie continue *2/16* ou *2/18* ;
- Dosage en liant *6* à *6,50 %* ;
- Épaisseur *3,5* à *5 cm* :
- Liants cut-backs *150/250* ou *400/600* et *0/1* pour l'imprégnation ;
- Enrobage en centrale classique.

Le pourcentage des vides après compactage reste important (*20 à 25%*) mais ces vides sont parfaitement comblés par le sable éolien et les effets du trafic lourd.

II.11.4.3 Les enrobés denses classiques

L'utilisation des enrobés denses est possible mais coûteuse. L'épaisseur minimale recommandée est de *6 cm*, compte tenu des déflexions élastiques importantes sur couches de base ; les bitumes durs sont recommandés.

Les risques de fluage et d'orniérage sont limités, le trafic étant faible et non canalisé. Il est à signaler qu'un revêtement légèrement fissuré peut durer plusieurs années sans grand dommage pour la chaussée.

II.12 RÉSULTATS DES ESSAIS SPÉCIFIQUES APRÈS MISE EN REMBLAIS :

Des essais spéciaux ont été réalisés sur les matériaux compactés à sec, après montée des remblais, afin de cerner au mieux leur comportement en cas de venue d'eau. Ces essais sont :

Essais de chargement à la plaque sous saturation.

II.12.1 Essais de chargement à la plaque

Ces essais ont consisté à creuser des puits en différents endroits d'un remblai monté et à réaliser des essais de chargement à la plaque avec mise en eau retardée, laquelle n'intervient qu'après stabilisation des déformations sous la charge appliquée. Les valeurs obtenues sont récapitulées dans le tableau 1

Tableau II-1 : Résultats des essais de charge à la plaque sur les remblais du projetautoroute Marrakech-Skhour Rhamna.

Matériaux/charge (KPa)	ΔH/H en (%)		
	106	212	318
Micaschiste	0.4	1.13	0.5
Grave calcaire	0.55	0.77	1.2

Des déformations apparaissent sous les charges appliquées variant de 50KPa à 350 KPa (soit l'équivalent d'un remblai de 17m de hauteur), mais restent globalement largement admissibles. On conclut qu'avec les remblais édifiés compactés à sec, et avec même des hauteurs allant jusqu'à 15m, le risque d'imbibition ou de saturation partielle du remblai ne donnerait pas de déformations notables. Blidaa

II.13 CONTRÔLE DE COMPACTAGE À SEC

II.13.1 Les moyens de contrôle de compactage

Après un compactage à sec, la zone de surface est toujours mal compactée. Le compactage de cette zone est continué en général à travers la couche supérieure sus-jacente, ceci a pour conséquence :

Le contrôle du compactage par mesure de la densité moyenne couche par couche, tel qu'il est habituellement pratiqué, n'est pas utilisable.

Le contrôle par essai de plaque EV*2 et EV1* à partir de la surface d'une couche, n'est pas utilisable lui aussi.

Cependant, dans le cas où le recours au contrôle de compactage par mesure de densité est nécessaire, il est conseillé par le (ISTED-LCPC, 1987) de décaper les *10 cm* de la couche avant la réalisation de la mesure.

Le recours aux mesures de densité par gamma densimètres à profondeur variable est possible avec les sols autres que C_1. Dans ce cas, deux mesures sont réalisées au niveau de chaque point (à *10 cm* et à *22,5 cm* de la surface).

La densité de la couche compactée doit être comprise entre la côte (- *10 et - 22,5 cm*). Elle est déterminée par la formule :

$$\gamma_{d\ 10}^{\ 22,5} = \frac{22,5\ \gamma_{d\ 22,5} - 10\ \gamma_{d\ 10}}{12,5}$$

Dans tous les cas, le meilleur moyen de contrôle de compactage consiste à vérifier, en continu, le respect des modalités de compactage fixées au niveau des planches d'essais.

II.13.2 Spécifications

II.13.2.1 En remblai

La densité moyenne sur toute l'épaisseur de la couche compactée doit atteindre 95 % γ_d *OPN* ;

La densité de la partie inférieure de la couche doit atteindre *93 % γ_d OPN*.

II.13.2.2 Au niveau de la couche de forme ou des 40 cm supérieurs situés sous la chaussée

La densité moyenne doit être supérieure à *95 % γ_d OPM* ou à *100 % γ_d OPN* ;

La densité à la partie inférieure doit atteindre *93 % γ_d OPM* ou *98 % γ_d OPN*.

II.14 CONCLUSION

Dans ce chapitre on a pu constater après une recherche bibliographique sur le compactage à sec que cette méthode est pratique et adaptable aux conditions géomorphologiques et climatiques dans les zones arides et désertique, là où nous sommes obligés d'utiliser les matériaux locaux dans leurs états naturels pour des raisons économiques environnementales.



Chapitre III
Étude expérimentale



III.1 INTRODUCTION

Dans ce chapitre nous présentons et nous interprétons des résultats expérimentaux récoltés par l'encadreur sur différents échantillions ; l'indentification des échantillions, ainsi que les résultats des essais mécaniques. Les prélèvements des matériaux viennent juste à l'entrée de la ville de *CHLEF* de l'autoroute Est-Ouest.

III.2 PROGRAMME EXPÉRIMENTAL

Le programme expérimental prévu est conforme aux besoins de l'étude. Il consiste essentiellement à caractériser complètement l'essentiel des matériaux disponibles et issus de la mission d'échantillonnage effectuée.

Après avoir complètement identifié les échantillons de matériau tuf :

- Granulomere ;
- Sédimentomètrie;
- Teneur en carbonate.

Les sols sont compactés et soumis à des essais mécaniques à l'Optimum Proctor Normal (OPN).

III.3 CHOIX DES MATÉRIAUX

La recherche des matériaux pour cette étude a conduit aux choix des tufs de chelf après avoir analysé des matériaux. Nous avons pris comme critère de choix des matériaux la teneur en carbonate qui devrait être au voisinage de 85%.

En vu de faire une étude comparative pour mieux déterminer les caractéristiques des sols compactés à sec.

III.4 LA SITUATION DES MATÉRIAUX

Les prélèvements des matériaux viennent juste à l'entrée de la ville de CHLEF de l'autoroute Est Ouest.



Figure III-1 : : L'endroit de l'extraction les échantillons.

III.5 LES ESSAIS AU LABORATOIRE

III.5.1 Les essais d'identification

Nous avons effectué au laboratoire des essais pour la détermination des différentes caractéristiques de nos échantillons et tous ces essais ont été effectués selon les normes et modes opératoires utilisés par la norme (ASTM, 2004).

- La teneur en eau naturelle ;
- L'analyse granulométrique ;
- La teneur en carbonate CaCO3 ;

- L’essai au bleu de méthyléne ;
- L’équivalent de sable.
- L’essai Proctor Normal ;

III.6 TECHNIQUES EXPÉRIMENTALES

III.6.1 Analyse granulométrique (Tamisage à voie humide)

L’essai a pour but de déterminer en poids, la distribution des particules des sols suivant leurs dimensions. Les résultats sont reportés granulométriquement permettant d'obtenir les courbes granulométriques des matériaux, et qui se présent par deux phénomènes :

Analyse granulométrique par tamisage à humide : pour les gains > *0,08 mm* ;

Analyse granulométrique par sédiment métrique : pour les particules inférieures à 0,08 mm et passants sont plus de 20%.

III.6.1.1 Analyse par tamisage à voie humide

L’analyse granulométrique des matériaux étudiés sont effectuées par Le tamisage sous l’eau (voie humide), selon la norme *ASTM D 422-63*. Le principe de cette méthode est de séparer par lavage les grains agglomérés d’un échantillon de masse connue du matériau, puis les fractionner, au moyen d’une série de tamis ; et enfin peser successivement après séchage la quantité du matériau retenue sur chaque tamis (refus sur un tamis). Le lavage du matériau a été réalisé manuellement.

Les tailles des mailles des tamis utilisés sont les suivantes :

10 mm ; 6,3 mm ; 5 mm ; 4 mm ; 3,15 mm, 2,5 mm ; 2 mm ; 1,25 mm ; 0,63 mm ; 0,4 mm ; 0,315 mm ; 0,2 mm ; 0,16 mm ; 0,1 mm ; 0,08 mm ; 0,063 mm.

Les refus ont été séchés à l’étuve à une température de *105°C* pendant *24 heures*. La masse initiale exacte utilisée est de *800g*.



Figure III-2 : Étapes de réalisation de l'essai tamisage à voix humide.

III.6.1.2 Analyse sédimento métrique

L'analyse granulométrique par sédimentation a été réalisée pour déterminer la distribution pondérale de la taille des particules fines d'un sol (Ø < 63 µm). Elle est effectuée selon la norme ASTM. Les particules inferieures à 63 µm séparées du reste du sol par tamisage sont mises en suspension dans l'eau additionnée d'un défoulant. La vitesse de sédimentation des particules est fonction de leur taille. Un densimètre permet alors de mesurer l'évolution dans le temps de la masse volumique de la solution et la profondeur d'immersion de l'appareil.



Figure III-3 : La technique de la sédimentométrie.

III.6.2 Détermination de la teneur en carbonate

La détermination de la teneur en $CaCO_3$ s'effectue au calcimètre *Dietrich Fruhling*, Selon la norme *ASTM D 4373-84*.

L'essai consiste à mesurer à l'aide d'une burette à gaz le volume de CO_2 dégagé par la réaction du *HCl* sur le carbonate de calcium contenu dans l'échantillon. L'acide chlorhydrique dilué décompose le carbonate de calcium selon la réaction :

$$CaCO_3 + 2\,HCl \Rightarrow CaCl_2 + H_2O + CO_2$$

La teneur en $CaCO_3$ d'un sol fin est un bon indice de sa résistance mécanique et de sa sensibilité à I 'eau. Suivant la valeur de cette teneur le comportement du sol évolue depuis celui d'une argile jusqu'à celui d'une roche la valeur de transition étant aux alentours de *60 – 70 %*.

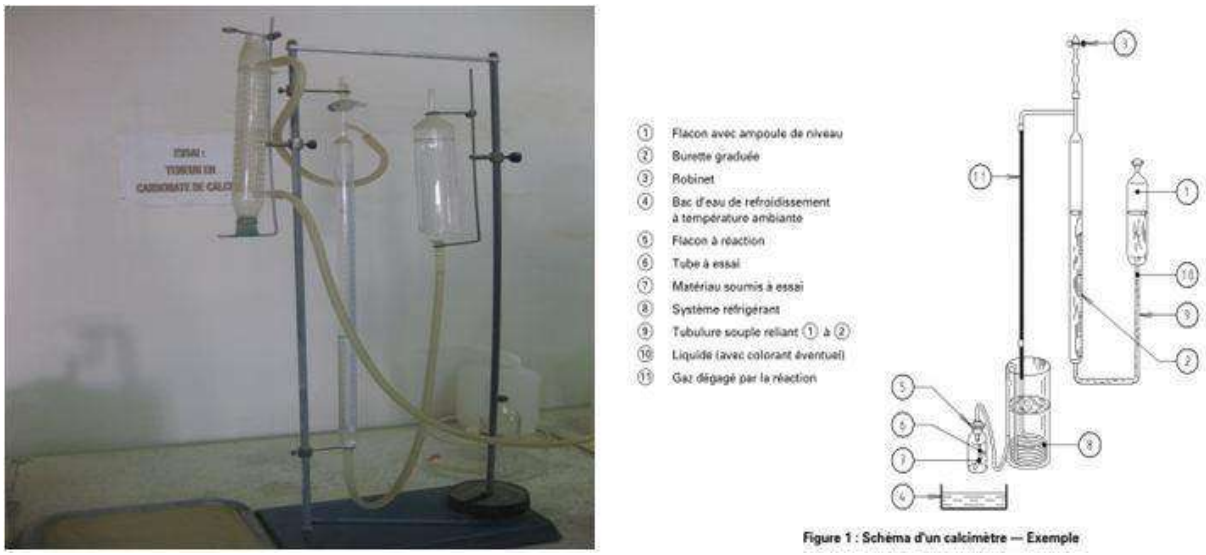


Figure III-4 : Calcimètre Dietrich-Fruhling

III.6.3 Essai au bleu de méthylène *(NA.19-48)*

Il s'agit aussi d'un paramètre permettant de caractérise l'argilosité d'un sol. L'essai est effectué selon la norme ***(NA.19-48).*** Son application est récente. Ce paramètre noté ***VBS*** (valeur de bleu du sol), représente la quantité de bleu de méthylène pouvant s'adsorber sur les surfaces externes et internes des particules argileuses contenues dans la fraction du sol considéré c'est donc une grandeur directement liée à la surface spécifique du sol.

$$\text{la valeur du bleu VBS} = \frac{\text{quantité du bleu absorbé cm}^3}{\text{poids sec de la prise}}$$

L'essai consiste à introduire progressivement de bleu de méthylène dans une suspension de sol maintenue en agitation on prélève périodiquement une goutte de la suspension que l'on dépose sur un papier chromatographique (papier filtre normalisé), Dès qu'une auréole bleutée se développe autour de la tache ainsi formée On peut considérer que l'adsorption du bleu de méthylène sur les particules d'argile est terminée. En effet, c'est l'excès de bleu de méthylène qui apparaît dans l'auréole. Le VBS traduit globalement la quantité et la qualité (activité) de la fraction argileuse du sol. Elle s'exprime en grammes de bleu pour 100g du sol.

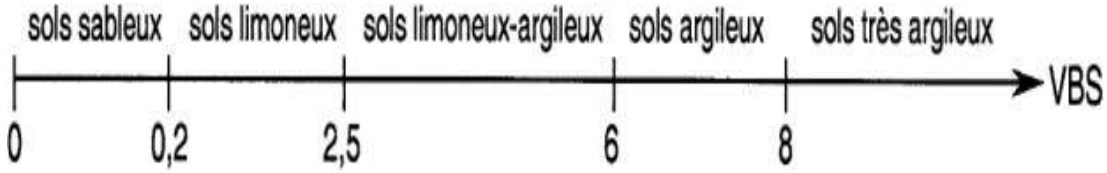


Figure III.5 : ordre de grandeur (type de sol en fonction de la valeur vbs) ***(lérau 2005 : INSA- institut national des sciences Appliqués De Toulouse).***

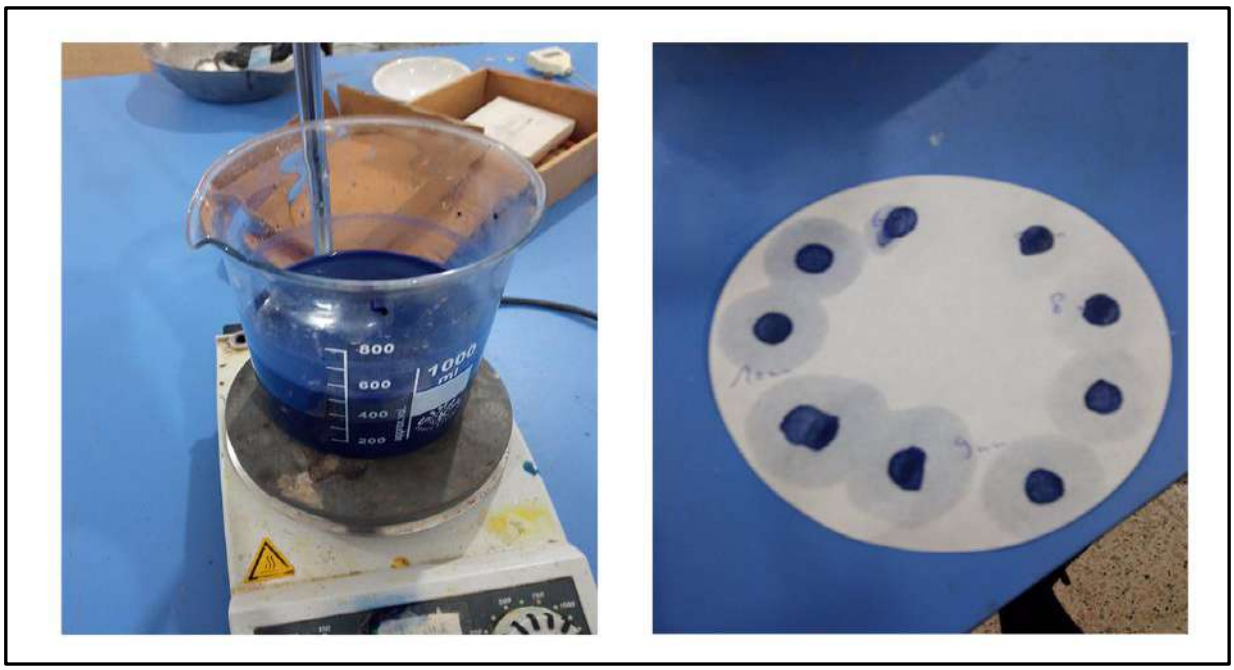


Figure III-6 : manipulation de l'essai de bleu.

III.6.4 Equivalent de sable (NF.P.18-598)

L'essai consiste à déterminer l'importance des fines ≤63µm flocula blés continues dans les sols indique le degré de pollution des éléments fins dans les sols. On passe au tamis de 5mm le matériau à étudier. Prélèvement une fraction à l'aide d'un godet H=45mm et araser représente environ de 120 g.

Le prélèvement est placé dans l'éprouvette contenant une quantité de floculant en attendent 10min. l'éprouvette passe à l'agitateur pendant 30 sec on remplit le reste de l'éprouvette d'eau jusqu'au seconderait et agiter la burette par favorise la remontée des fines et l'élément argileux puis laisser reposer. Après 20 min on mesure la hauteur (sable propre +élément fin et la hauteur de sable propre H2 ou l'en descend le piston lentement par son poids propre dans l'éprouvette jusqu'à la stabilisation et l'on mesure la distance entre poids et la bague (piston calibrer pour l'éprouvette).

On détermine : ESV, (ES visuel ou h_1 et h_2 sont mesurée à l'aide de la règle) ESP, ES piston $h_2$est mesurée à son poids propre ou h_2= h_2'-h libre. On siphonne la solution lavant dans chaque cylindre gradué, jusqu'au trait repère inferieur figurant sur le cylindre.

A l'aide de l'entonnoir, verser une éprouvette dans chaque cylindre gradué, en maintenant le cylindre dans une position verticale. On Tape le fond de chaque cylindre à plusieurs reprises sur la paume de la main afin de déloger les bulles d'air et de favoriser le mouillage de l'éprouvette, et Laisser reposer pendant (10 ± 1) min pour humidifier l'éprouvette.

Pour la mesure on a Laissé reposer chaque cylindre gradué sans dérangement ni vibration, pendant (0,00 ±0,25) min, à la fin de cette période et à l'aide du réglet, après mesurer la hauteur h1 du niveau supérieur du floculat par rapport au fond du cylindre gradué Abaisser soigneusement l'ensemble du piston dans le cylindre, jusqu'à ce que l'embase repose sur le sédiment.

Pour le Calcul et l'expression des résultats : On Calcule le rapport (h2/ h1) x 100 pour chaque cylindre avec un chiffre après la virgule. On Calcule l'équivalent de sable (ES) comme la moyenne des rapports (h2/ h1) x 100. On obtient sur chaque cylindre et enregistrer au nombre entier le plus proche. Plus la valeur (ES) est proche du 100, plus le sable est propre, par contre plus elle se reproche du 0 plus le sable devient moins propre.

Tableau III-1 : La qualité du sable en fonction de son ES (NF.EN.933-8).

ES %	Nature et qualité du sable
ES<60	Sable argileux
60≤ES≤70	Sable légèrement argileux
70≤ES≤80	Sable propre
ES≥80	Sable très propre



Figure III-7 : Equivalent de sable

III.6.5 Les essais de compactages

III.6.5.1 Préparation des sols

Une quantité importante de l'ordre de *80 Kg* de matériau a été mise à l'étuve à une température normalisée de *105°C* pendant *24h* suivant la norme *ASTM D 668* Cette condition de température et de temps de séchage a pour objectif de faire sortir et d'évacuer la phase liquide du sol, Après séchage, le matériau est tamisé à *5 mm* de diamètre dans le but d'avoir un mélange homogène et d'éviter la formation des grumeaux, ensuite il est homogénéisé et divisé à trois parts.

Ces parts sont humidifiées à des teneurs en eau différents *(10%, 14 %, 16%, 18%, 20%)*, chaque part est conservée dans un sac étanche dans une salle hermétique pendant 24 heures, dans le but d'homogénéiser la teneur en eau du mélange.

III.6.5.2 Essai Proctor Normal

L'essai Proctor Normal est un essai de compactage exécuté en laboratoire qui a pour but de déterminer l'influence de la teneur en eau (ω, exprimée en %) d'un matériau sur sa compactibilité (exprimée par la masse volumique sèche en g/cm3 ou en kg/m3) l'essai est effectué selon la norme ASTM D 668.

Concernant notre travail, Le compactage des échantillons des sols (tuf de chelf) est réalisé dans un moule normalisé, avec une dame normalisée aussi, et selon la norme. La teneur en eau et le poids

spécifique sec après compactage du sol sont mesurés. L'essai est répété plusieurs fois sur des échantillons portés à différentes teneurs en eau (10 %, 14 %, 16 %, 18 %, 20 % 25%).

Les points obtenus de cette manière forment une courbe dans l'espace (γd ; ω) et le point dont l'ordonnée est la densité sèche maximale et l'abscisse est la teneur en eau correspondante représente l'Optimum Proctor. Dans cette étude, 16 essais Proctor Normal ont été réalisés.

L'essai Proctor Normal est réalisé en trois couches dans un appareil de compactage automatique. Les valeurs fixées pour ce type d'essai sont les suivantes :

- Masse de la dame : 2490 g ;
- Hauteur de chute: 305 mm;
- Diameter de la dame: 51 mm



Figure III-8 : essai Proctor normal

III.7 LES RÉSULTATS DES ESSAIS AU LABORATOIRE

III.7.1 Les essais d'identification

Les résultats des essais d'identification sur le premier échantillon sont présentés dans le tableau ci-dessous :

Tableau III-2 : Résultats des essais en laboratoire du premier échantillon.

ASTM D 422-63	**Analyse granulométrique**	**Essai**		**Valeur**	**Norme d'essai**
Tamisàt comulé(%)	**Diameter des tamis (mm)**				
93.94	10	**Teneur en Eau naturelle**	**Wn %**	5.21 %	ASTM D2216-80
87.14	6.3				
82.03	5				
79.68	4				
77.33	3.15	**Teneu en carbonate**	**$CaCO_3$ %**	81 %	ASTM D 4373-84
74.97	2.5				
72.7	2				
69.51	1.25				
66.61	0.63	**Limite de liquidité**	**W_L %**	26.09 %	ASTM D 4318-00
62.56	0.4				
59.79	0.315				
51.24	0.2				
45.305	0.16	**Indice de plasticité**	**Ip**	13.89	ASTM D 4318-00
38.56	0.1				
37.09	0.08				
36.55	0.063				

33.88	0.059		**Valeur au bleu de méthylène**	**VBS**	1.39	NA 19-48
26.5	0.031					
15.49	0.022					
12.49	0.015					
8.54	0.011		**Équivalent de sable**	**ES %**	15.55 %	NF P 18-598
5.49	0.007					
4.55	0.004					
3.33	0.0018					

- La courbe granulométrique du premier échantillon est présentée sur la figure ci-dessous :

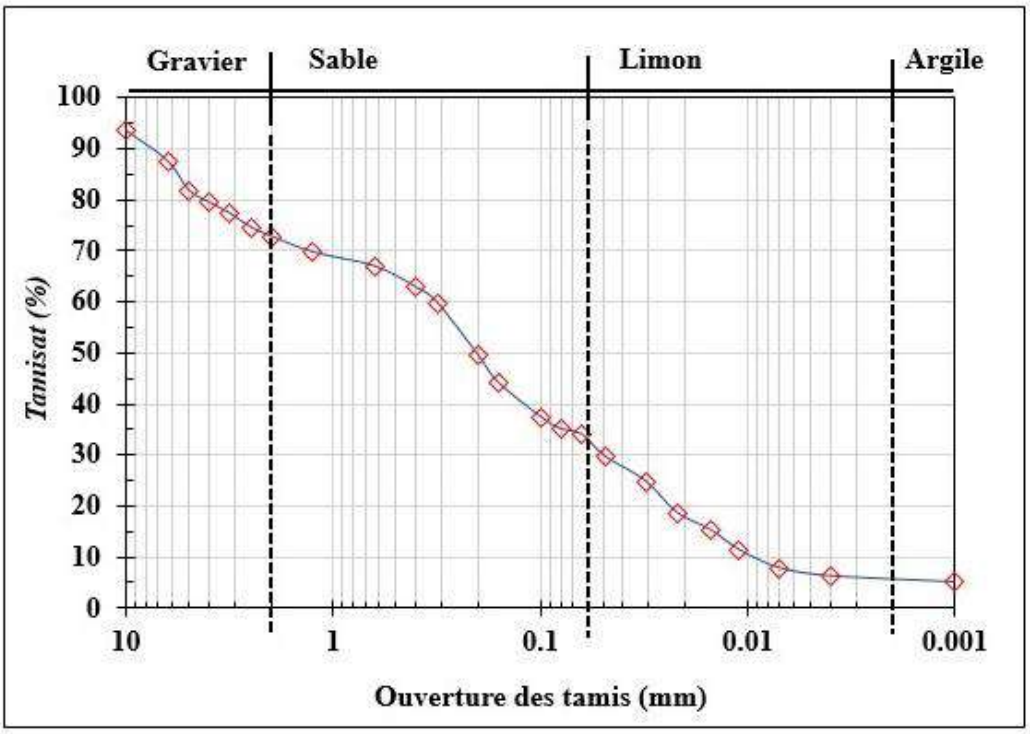


Figure III-5 : Courbe Granulométrique du premier échantillon.

À partir de cette courbe *(figure III.1)*, on remarque que cet échantillon est composé des éléments suivants :

- Gravillons *(21,24%)* de diamètre *60 à 2 mm*
- Sable *(36.15%)* de diamètre *2 à 0,06 mm*
- Limon *(33.22%)* de diamètre *0,06 à 0,002 mm*
- Argile *(3.33%)* de diamètre < *0,002mm*

Et la fraction 0-50mm contenue dans cet échantillon est 100%

Selon le *GTR***,** et la norme *NF P 11-300*, la classe de ce matériau de *chlef* est classée dans $\mathbf{A_{2m}}$ (sables fins argileux limons, argiles et marnes peu plastique).

Les résultats des essais du deuxième échantillon sont présentés dans le tableau ci-dessous :

Tableau III-3 : Résultats des essais en laboratoire du deuxième échantillon.

ASTM D 422-63	**Analyse gramulométrique**	**Essai**		**Valeur**	**Norme d'essai**
Tamisàt comulé(%)	**Diameter des tamis (mm)**				
93.46	10	**Teneur en Eau naturelle**	**Wn %**	5.67 %	ASTM D2216-80
87.52	6.3				
81.86	5				
79.48	4				
77.24	3.15	**Teneu en carbonate**	**$CaCO_3$ %**	79 %	ASTM D 4373-84
74.56	2.5				
72.81	2				
69.68	1.25				
66.89	0.63	**Limite de liquidité**	**W_L %**	28.37 %	ASTM D 4318-00
62.84	0.4				

59.80	0.315					
49.54	0.2					
44.18	0.16		**Indice de plasticité**	**Ip**	14.44	ASTM D 4318-00
37.46	0.1					
35.07	0.08					
33.98	0.063					
29.74	0.049		**Valeur au bleu de méthylène**	**VBS**	1.35	NA 19-48
24.8	0.031					
18.69	0.022					
15.23	0.015					
11.39	0.011		**Équivalent de sable**	**ES %**	12.82 %	NF P 18-598
7.78	0.007					
6.22	0.004					
5.01	0.001					

- La courbe granulométrique du deuxième échantillon est présentée sur la figure ci-dessous :

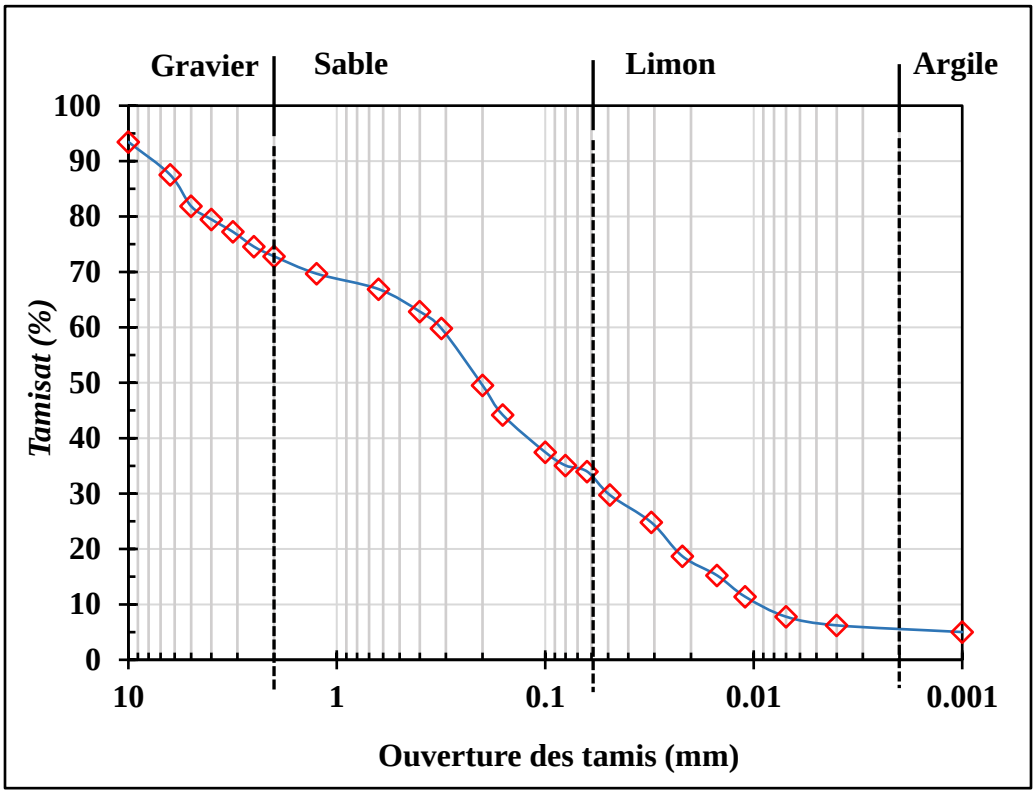


Figure III-6 : Courbe Granulométrique du deuxième échantillon.

À partir de cette courbe *(figure III.1)*, on remarque que cet échantillon est composé des éléments suivants :

- Gravillons *(20,65%)* de diamètre *60 à 2 mm*
- Sable *(38,83%)* de diamètre *2 à 0,06 mm*
- Limon *(28.97%)* de diamètre *0,06 à 0,002 mm*
- Argile *(5.01%)* de diamètre *< 0,002mm*

Et la fraction 0-50mm contenue dans cet échantillon est 100%

Selon le *GTR,* et la norme *NF P 11-300*, la classe de ce matériau de Chlef est classée dans $\mathbf{A_{2m}}$ (sables fins argileux limons, argiles et marnes peu plastique).

Les résultats des essais du troisième échantillon sont présentés dans le tableau ci-dessous :

Tableau III-4 : Résultats des essais en laboratoire pour le troisième échantillon.

ASTM D 422-63	**Analyse gramulométrique**	**Essai**		**Valeur**	**Norme d'essai**
Tamisàt comulé(%)	**Diameter des tamis (mm)**				
93.68	10	**Teneur en Eau naturelle**	**Wn %**	4.82 %	ASTM D2216-80
87.31	6.3				
81.89	5				
79.47	4				
77.18	3.15	**Teneu en carbonate**	**$CaCO_3$ %**	83 %	ASTM D 4373-84
74.56	2.5				
72.25	2				
69.54	1.25				
64.62	0.63	**Limite de liquidité**	**W_L %**	24.47 %	ASTM D 4318-00
62.41	0.4				
59.69	0.315				
50.27	0.2				
44.81	0.16	**Indice de plasticité**	**Ip**	13.45	ASTM D 4318-00
38.12	0.1				
36.11	0.08				
35.31	0.063				
31.79	0.059	**Valeur au bleu de méthylène**	**VBS**	1.48	NA 19-48
25.72	0.031				
17.92	0.022				

13.94	0.015					
9.91	0.011		**Équivalent de sable**	**ES %**	13.63 %	NF P 18-598
6.93	0.007					
5.28	0.004					
4.87	0.0018					

- La courbe granulométrique du troisième échantillon est présentée sur la figure ci-dessous :

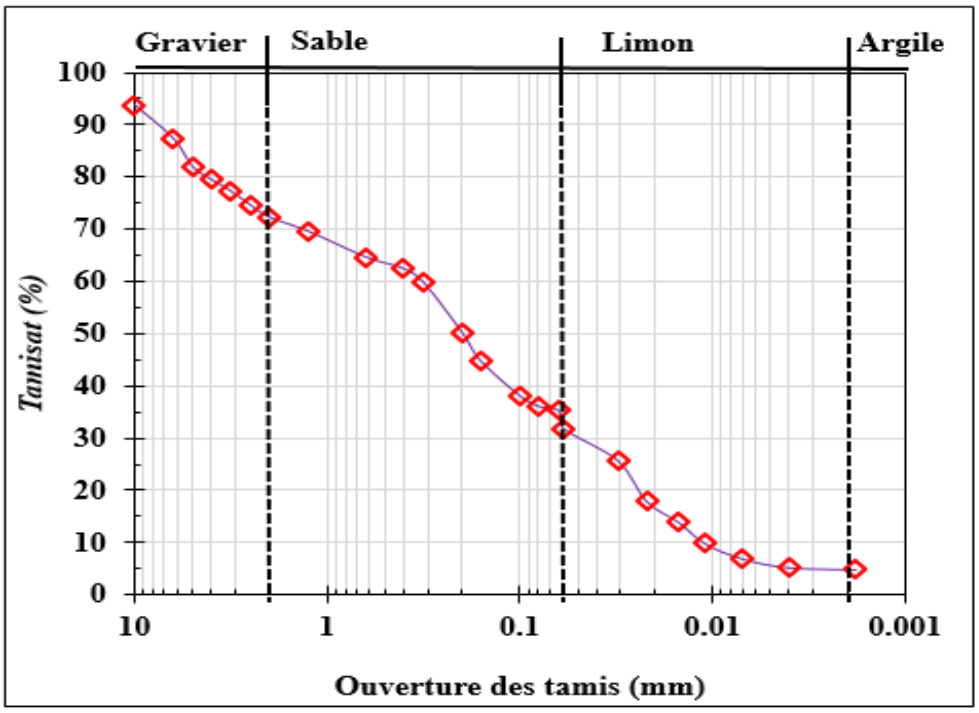


Figure III-7 : Courbe Granulométrique du troisième échantillon.

À partir de cette courbe *(figure III.1)*, on remarque que cet échantillon est composé des éléments suivants :

- Gravillons *(21.43%)* de diamètre *60 à 2 mm*
- Sable *(36,94%)* de diamètre *2 à 0,06 mm*
- Limon *(30.44%)* de diamètre *0,06 à 0,002 mm*
- Argile *(4.87%)* de diamètre < *0,002mm*

Et la fraction 0-50mm contenue dans cet échantillon est 100%

Selon le *GTR***,** et la norme *NF P 11-300*, la classe de ce matériau de *chlef* est classé dans $\mathbf{A_{2m}}$ (sables fins argileux limons, argiles et marnes peu plastique).

III.7.2 Essai Proctor

Afin d'étudier la variation de γ_d **= f(w) et** de déterminer le wOPN **et** γ_d **correspondant**, on a effectué des essais de Proctor Normal sur trois matériaux différents, les résultats obtenus sont présentés ci-dessous sous forme de tableaux et de figures.

Pour le premier échantillon, les résultats obtenus sont présentés dans le *(tableau III.5)* et *(figure III.6)* :

Tableau III-5 : Résultats d'essai Proctor pour le premier échantillon

ESSAI PROCTOR						**RETENU**
γ_d (g/cm^3)	1.409	1.596	1.636	1.558	1.485	**1.64**
W %	9.426	14.459	16.85	19.956	21.781	**16.5**

Tableau III-6 : Les valeurs de la courbe de saturation pour l'échantillon

COURBE DE SATURATION					
w (%)	9.426	14.459	16.85	19.956	21.781
Sr (100%)	2.71	1.81	1.71	1.58	1.51
Sr (90%)	2.71	1.7	1.55	1.44	1.39

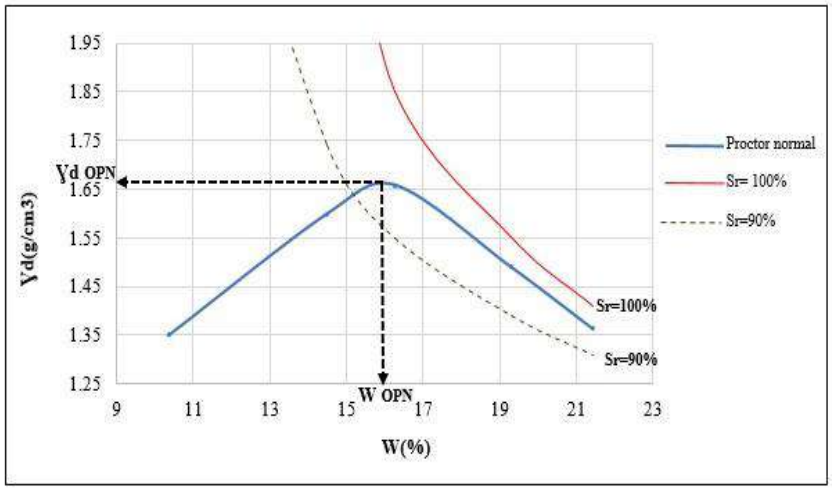


Figure III-8 : Courbe Proctor du premier échantillon.

Pour le deuxième échantillon, les résultats obtenus sont présentés dans le *(tableau III.7)* et *(figure III.8)* :

Tableau III-7 : Résultats d'essai Proctor pour le premier échantillon

ESSAI PROCTOR						**RETENU**
γ_d (g/cm^3)	1.351	1.598	1.658	1.49	1.365	**1.67**
W %	10.36	14.486	16.257	19.31	21.426	**16**

Tableau III-8 : Les valeurs de la courbe de saturation pour l'échantillon 2

COURBE DE SATURATION					
w (%)	10.36	14.486	16.257	19.31	21.426
Sr (100%)	2.73	2.42	1.85	1.55	1.41
Sr (90%)	2.73	1.74	1.55	1.39	1.31

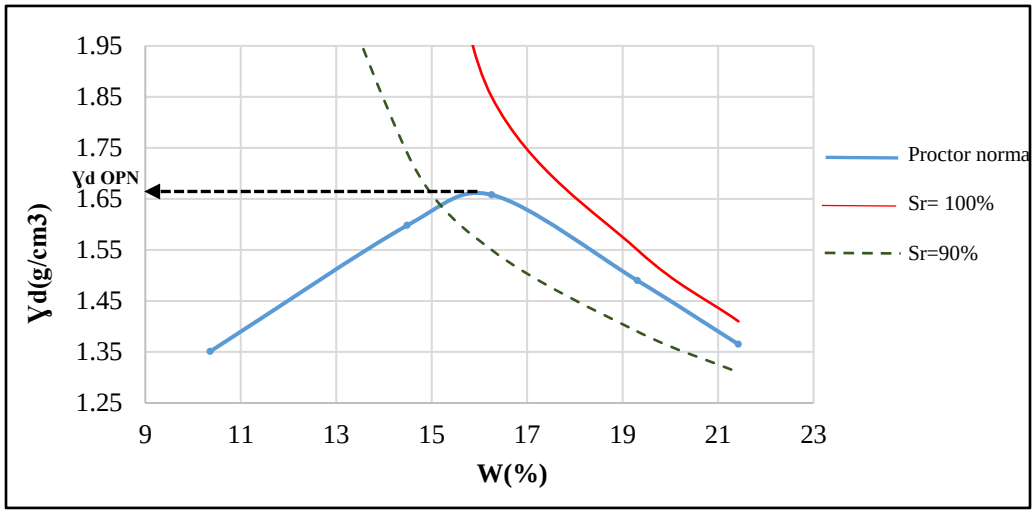


Figure III-9 : *Courbe Proctor du deuxième échantillon.*

Pour le troisième échantillon, les résultats obtenus sont présentés dans le *(tableau III.9)* et *(tableau III.10)*:

Tableau III-9 : Résultats d'essai Proctor pour le troisième échantillon

ESSAI PROCTOR							**RETENU**
γ_d (g/cm^3)	1.465	1.597	1.614	1.629	1.591	1.47	**1.63**
W %	8.523	14.426	15.27	16.75	18.016	19.016	**16.6**

Tableau III-10 : Les valeurs de la courbe de saturation pour l'échantillon 3

COURBE DE SATURATION						
w (%)	8.523	14.426	15.27	16.75	18.016	19.016
Sr (100%)	2.75	2.44	1.82	1.81	1.62	1.5
Sr (90%)	2.75	2.11	1.72	1.59	1.51	1.48

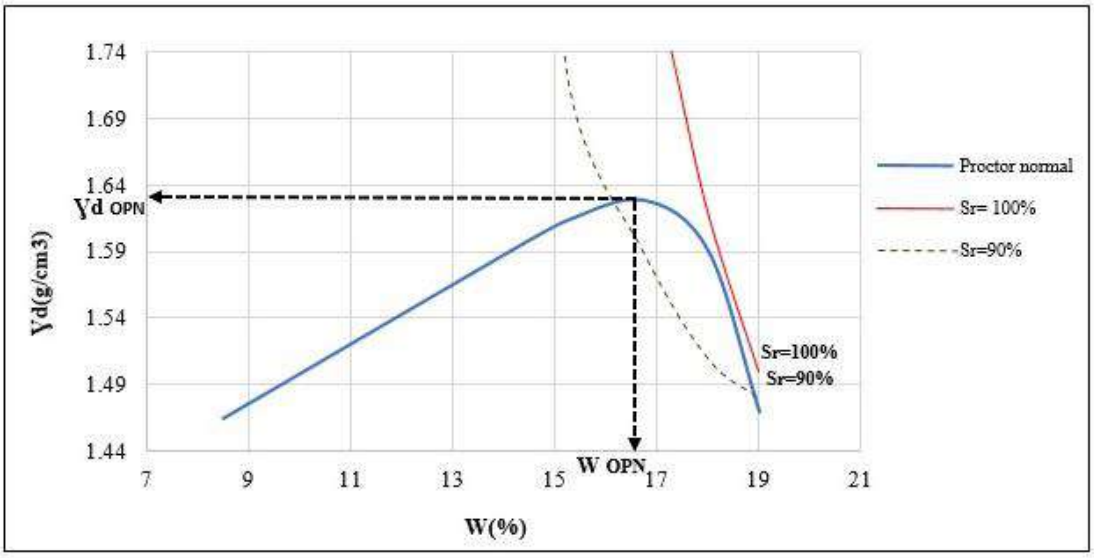


Figure III-10 : Courbe Proctor du troisième échantillon.

III.8 INTERPRÉTATION

Les courbes obtenues a une forme de cloche. Elles indiquent que dans un premier temps, lorsqu'on augmente la teneur en eau du matériau, sa densité sèche augmente, ce qui signifie que le matériau devient plus dur, plus compact et plus portant. Puis la courbe arrive à un maximum obtenu pour une valeur précise de la teneur en eau (W) appelée l'optimum Proctor. Pour cette valeur de W, la densité sèche est maximale. Si on poursuit l'augmentation de la teneur en eau, à nouveau le sol se fragilise.

Selon le tableau suivant qui présente toute la récapitulation des essais Proctor effectués, on constate que la teneur en eau optimale pour les différents échantillons varie de 16% à 16.6 % avec une densité sèche γ_d qui varie aussi de 1,63 g/cm^3 à 1,67 g/cm^3. Le tableau suivant *(tableau III.11)* résume les valeurs de la teneur en eau et la densité sèche γ_d obtenue.

Tableau III-11 : Récapitulation des essais Proctor pour les trois échantillons.

Échantillon	**1**	**2**	**3**
γ_d (g/cm^3)	1.64	1,67	1,63
ω (%)	16.5	16	16.6

On constate que la densité sèche γ_d du deuxième matériau est plus importante que celles du premier et du troisième, ce qui engendre par la suite que la portance du deuxième matériau est aussi très marquée par rapport aux autres matériaux.

On remarque que les ω_{OPN} du premier matériau et troisième matériaux est plus grand que celui du deuxième matériau, Ces derniers ont besoin de plus d'eau pour leur hydratation en engendrant un foisonnement du mélange.

III.9 CONCLUSION

Dans ce chapitre nous avons effectué des différents essais d'identification et de caractérisation géotechniques (analyse granulométrique, analyse sésimentométrique, teneur en carbonates et Proctor Normal) sur trois matériaux. Plusieurs conclusions peuvent être tirées de ce chapitre :

- Le choix des matériaux est très important pour l'exécution des corps de chaussées sous un compactage à sec.
- Ces sols ont été classés comme des tufs ($\mathbf{A_{2m}}$) selon le GTR et la norme NF P 11-300.
- Les trios matériaux ont des différentes densités sèches maximales avec la même énergie Proctor normal.
- L'enrichissement des échantillons du Chlef en particules fines. Ces derniers ont besoin de plus d'eau pour leur hydratation en engendrant un foisonnement du mélange.
- L'énergie de compactage joue un rôle important pour obtenir des densités sèches plus élevés.



Conclusion Générale



Les expériences menées dans plusieurs pays arides ont montré qu'il y aurait une possibilité de compacter le sol à une teneur en eau faibles et même quasi nulle. Il est clair que cette technique de compactage à sec représente un énorme avantage économique et environnemental. Les expériences qui ont menées dans le sud algérien n'ont pas été poursuivies pour trancher la question de la faisabilité pratique de cette technique dans notre pays. On rappelle que le travail présenté dans ce mémoire s'inscrit dans la contribution aux efforts de recherche qui visent les objectifs suivants :

- Montrer et retrouver par un exemple l'existence la forme irrégulière de la courbe Proctor lorsque l'essai est étendu aux faibles teneurs en eau pour certains sols.
- Expliquer les phénomènes responsables de la forme irrégulière de la courbe Proctor étendues aux très faibles teneurs en eau.
- Montrer la qualité des sols compactés à faible teneurs en eau lorsqu'on compare cette qualité à celle du sol obtenu au compactage classique à l'optimum dans un contexte aride.



Références Bibliographie



Références Bibliographie

[1] Gacem Benaissa et Mahmoud Houssem Eddine, « Tentative d'explication de quelques courbes irrégulières de compactage étendues sur la partie de faibles teneurs en eau », Master, Ministére de l'Enseignement Superieur et de la Recherche Scientifique, Blida,Algerie, 2019.

[2] Mohammed SELLAM et Abderrahim HAMMOU-TANI, « COMPACTAGE À SEC POUR LES PROJETS ROUTIERS EN ZONES ARIDES », Master, Abou Bekr belkaid, Tlemcen,Algerie, 2016.

[3] JEREMIE GAUCHER, « ETUDE EXPERIMENTALE DE L'EROSION HYDRAULIQUE DES SOLS NON-COHESIFS COMPACTES », MAITRISE ES SCIENCES APPLIQUEES, ECOLE POLYTECHNIQUE DE MONTREAL, Canada, 2007.

[4] Ghorzi Kheira et Hafidi Fatima Zohra, « COMPACTAGE DES BARRAGES EN REMBLAI », Master, Abou Bekr Belkaid, Tlemcen,Algerie, 2013.

[5] Gérard DEGOUTTE, *PETITS BARRAGES : recommendation pour la conception, la réalisation et suivi*, Cemagref. Comité Francais Des Grandes Barrages, 2002.

[6] Belarbi Narimene et Nadji asma, « ETUDE DES PARAMETRES INFLUANT SUR LA PORTANCE DE SOL NON SATURE (INDICE C.B.R) », Master, Ministére de l'Enseignement Superieur et de la Recherche Scientifique, BOUMERDES, 2017.

[7] Faci Amira et Chelbi Nesrine, « Estimation de compactage de sol en présence d'un ajout », Master, AKLI MOHAND OULHADJE-, Bouira,Algerie, 2020.

[8] Guy Morel et G Arquie, *Le compactage*. Paris, 1988.

[9] Guilbault, P, « Compactage et decompactage », *Chambre d'agriculture de Gironde*, vol. 6, 2007.

[10] BELHADJ Ridha et OUDEIKA Mohamed Lemine, Master, Mohamed El-Bachir El-Ibrahimi -, Bordj Bou Arréridj, 2019.

[11] MORSLI Mérièm et AMERAOUI Zoubida, « CONCEPTION ET REALISATION DES CHAUSSEES EN MILIEU DESERTIQUE (Design and Realization of Pavements in Desert Environment) ». Nancy, 2002.

[12] Fenzy E, « Particularité de la technique routière au Sahara ,Revue générale des routes et aérodromes 411 », 1965.