

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

Université
Aboubekr Belkaïd
Tlemcen



جامعة
أبو بكر بلقايد

FACULTÉ DE TECHNOLOGIE
DÉPARTEMENT DE GÉNIE CIVIL
Laboratoire des structures intelligentes

Mémoire de Master en Génie civil

Spécialité : Infrastructures de Base et Géotechnique

Présenté par

SELLAM Mohammed et HAMMOU-TANI Abderrahim

**COMPACTAGE À SEC POUR LES
PROJETS ROUTIERS EN ZONES ARIDES**

Soutenu publiquement le 16 juin 2016

Composition du Jury

Mr. BENMOUSSA.C	Maitre de Conférences	Université de Tlemcen	Président
Mr. BEKKOUCHE.A	Professeur	Université de Tlemcen	Promoteur
Mme. ROUISSAT.N	Docteur	Université de Tlemcen	Examineur
Mme. AYAD.F	Docteur	Université de Tlemcen	Examineur

Remerciements

*Ce travail a été effectué sous la direction de notre directeur de mémoire, **Monsieur BEKKOUCHE ABDELMALEK**, à qui nous tenons à le remercier très chaleureusement pour nous avoir donné l'occasion de travailler sur un sujet d'un tel intérêt et pour le temps qu'il a pu nous consacrer, ces remarques et sa patience nous ont été d'un grand secours dans la réalisation de ce mémoire. Nous le remercions du fond du cœur et nous espérons avoir à nouveau l'occasion de travailler avec lui.*

Nous remercions également le Président du Jury et les membres du Jury d'avoir accepté d'examiner notre travail.

Il nous est particulièrement agréable de remercier toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail :

A mes très chers parents

A mes frères et sœurs

A tous mes proches

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail :

A mes très chers parents

A mes frères et sœurs

A tous mes proches

Résumé

En Algérie les régions arides représentent plus de 80 % de la superficie du pays. 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 près de tiers du prix de revient d'une infrastructure routière (Paige-green, 2009). 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 contribution présentée dans ce travail participe aux efforts de recherche qui visent la mise en œuvre pratique de cette technique.

On analyse au laboratoire la technique du compactage à faible teneurs en eau et on tente de cerner les conditions de sa faisabilité pratique.

Pour ce faire on réalise des essais de compactage d'un sol choisi, effectué sous différentes configurations, 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-Clefs : ressources en eau, compactage des sols, compactage des sols secs, aridité, Sahara.

Abstract

In Algeria the arid areas represent more than 80 % of the country area. Construction of roadways in these zones is handicapped by the extreme scarcity of water. Local experience showed that, the cost of water necessary for the compaction of materials can exceed one third of the total cost of the road project. Under these conditions it is clear that the compaction of road materials at low water contents can represent a real socioeconomic potential.

The contribution presented in this dissertation takes part in the research efforts which aim at implementing practically this technique.

By analyzing in the laboratory the technique of the compaction at low water contents we try to determine the conditions of its practical feasibility.

To this end, we carry out compaction tests on a selected soil considering different test configurations, and we study the expression of the various conditions tested on the output of the compaction. The output of compaction is expressed in the soil density profile of the compacted soil layer. On the basis of the results obtained, corroborated by data from the literature we can suggest that compaction at low water contents is technically possible provided some conditions related to the type of soil and the compaction mode. Results of this study must be confirmed for other soil types in the laboratory and in the field.

Key-Words : water resources, soil compaction, dry-soil compaction, dryness, Sahara.

الملخص

تمثل المناطق الجافة اكثر من 80 % من المساحة الكلية للجزائر. 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.

المساهمة المقدمة في هذا العمل هي عبارة عن مشاركة في الجهود البحثية الهادفة إلى التنفيذ العملي لهذه التقنية (الرص بنسبة مياه منخفضة) و وضعها محل التطبيق.

إن التحليل لتقنية الرص بمستويات مياه منخفضة في المخبر هو واحد من المحاولات الرامية لتحديد الظروف الملائمة لجداولها العملية.

للقيام بذلك نقوم بإنجاز تجارب رص حسب أنماط مختلفة على تربة مختارة،دارسين دلالتها على مردودية الرص، مستعنيين بتغير كثافة التربة المتراسة 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 : الموارد المائية، رص التربة، رص التربة بنسبة رطوبة منخفضة، جفاف، الصحراء.

SOMMAIRE

REMERCIEMENTS	I
DÉDICACES	II
DÉDICACES	III
RÉSUMÉ.....	IV
ABSTRACT	V
الملخص.....	VI
SAMMAIRE	VII
LISTE DES FIGURES	XI
LISTE DES PHOTOS	XIII
LISTE DES TABLEAUX	XIV
LISTE DES ABRÉVIATIONS.....	XV
INTRODUCTION GÉNÉRALE.....	1
CHAPITRE I GÉNÉRALITÉS SUR LE COMPACTAGE DES SOLS.....	3
I.1 INTRODUCTION.....	3
I.2 DÉFINITION DE COMPACTAGE	3
I.3 CONDITION DE COMPACTAGE	4
I.4 THÉORIE DE COMPACTAGE	4
I.4.1 Les interactions entre les particules	4
I.4.2 La structure des sols compactés	5
I.4.3 Les paramètres influençant le compactage	9
I.4.3.1 Influence de la teneur en eau	9
I.4.3.2 Influence de l'énergie de compactage	11
I.4.3.3 Influence de la granulométrie	12
I.4.3.4 Influence de type de sol	13
I.4.3.5 Influence de la méthode de compactage	14
I.5 ESSAIS DE COMPACTAGE AU LABORATOIRE	16
I.5.1 Compactage par impact	16
I.5.2 Compactage statique	18
I.5.3 Compactage par pétrissage	18
I.5.4 Compactage par vibration	18
I.6 ESSAIS DE COMPACTAGE IN-SITU.....	20
I.6.1 La planche d'essai	20
I.6.2 Rôle de la planche d'essai	20
I.6.3 Dimensions de la planche d'essai	20

I.6.4 Mesures concernant l'efficacité d'un compacteur	21
I.7 LES ENGINES DE COMPACTAGE	23
I.7.1 Classement des engins	23
I.7.2 Rouleaux à bandage lisse	23
I.7.2.1 Historique et généralité	23
I.7.2.2 Description générale et classements	23
I.7.3 Rouleaux à pneus	25
I.7.3.1 Généralité	25
I.7.3.2 Paramètres de compactage	25
I.7.3.3 Classification des compacteurs à pneus	25
I.7.4 Rouleaux vibrants	25
I.7.5 Rouleaux à pieds dameurs	26
I.7.6 Rouleaux à segments	26
I.8 CONCLUSION	28
CHAPITRE II LE COMPACTAGE À SEC.....	31
II.1 INTRODUCTION	31
II.2 HISTORIQUE ET QUELQUES EXPÉRIENCES (ELLIS.C.I, 1980)	31
II.3 LE CONTEXTE SAHARIEN	35
II.3.1 Le climat	35
II.3.2 Le relief	35
II.3.3 Principales ressources en matériaux locaux dans le Sud algérien	35
II.3.4 L'hydrogéologie	36
II.4 LA TECHNIQUE ROUTIÈRE SAHARIENNE (FENZY, 1965)	36
II.4.1 Principale innovation	36
II.4.2 Les idées générales	36
II.4.3 Principe de la technique	37
II.4.4 Domaine d'application	37
II.5 LES MATÉRIAUX UTILISÉS AU SAHARA ALGÉRIEN (Tiba, 1994)	37
II.5.1 Les tufs calcaires	37
II.5.2 Sable gypseux.....	38
II.5.3 Tout venant	39
II.5.4 Arène granitique	40
II.6 CLASSIFICATION DES MATÉRIAUX (Larabi, 1998).....	41
II.7 ASPECTS SPÉCIFIQUES DU COMPACTAGE À SEC	42
II.7.1 Variation de la densité sèche en fonction de la teneur en eau	42
II.7.2 Variation de la densité sèche en fonction de la profondeur de couche	43
II.7.3 Évolution de la densité sèche en fonction du nombre de passe	44

II.7.4 La nature des sols (ISTED-LCPC, 1987).....	46
II.8 MODALITÉS DE COMPACTAGE À FAIBLE TENEUR EN EAU (GMTR, 2001).....	46
II.8.1 Les types de compacteurs utilisables	46
II.8.2 Les conditions d'utilisation des sols	46
II.8.2.1 Les sols fins peu plastiques	47
II.8.2.2 Les graves et sables propres	47
II.8.2.3 Les graves et sables peu argileux	47
II.8.2.4 Les graves et sables très silteux	47
II.8.2.5 Les graves et sables argileux	48
II.8.2.6 Les sols grossiers	48
II.8.2.7 Les sols tuffacés	48
II.9 MATÉRIAUX ET MISE EN ŒUVRE DU CORPS DE CHAUSSÉE.....	48
II.9.1 Terrassement	49
II.9.2 Couche de fondation	49
II.9.3 Couche de base	50
II.9.4 Couche de roulement	51
II.9.4.1 Imprégnation	51
II.9.4.2 Enduits superficiels	52
II.9.4.3 Enrobés ouverts à froid	52
II.9.4.4 Les enrobés denses classiques	52
II.10 CONTRÔLE DE COMPACTAGE À SEC	53
II.10.1 Les moyens de contrôle de compactage.....	53
II.10.2 Spécifications	54
II.10.2.1 En remblai	54
II.10.2.2 Au niveau de la couche de forme ou des 40 cm supérieurs situés sous la chaussée	54
II.11 CONCLUSION	54
CHAPITRE III ÉTUDE EXPÉRIMENTALE.....	56
III.1 INTRODUCTION	56
III.2 PROGRAMME EXPÉRIMENTAL	56
III.3 CHOIX DES MATÉRIAUX.....	56
III.4 LA SITUATION DES MATÉRIAUX	57
III.5 LES ESSAIS AU LABORATOIRE	58
III.5.1 Les essais d'identification	58
III.6 TECHNIQUES EXPÉRIMENTALES	58
III.6.1 Analyse granulométrique (Tamisage à voie humide)	58
III.6.1.1 Analyse par tamisage à voie humide	59
III.6.1.1 Analyse sédimentométrique	59

III.6.2 Détermination de la teneur en carbonate	60
III.6.3 Les essais de compactages	61
III.6.3.1 Préparation des sols	61
III.6.3.2 Essai Proctor Normal	62
III.7 LES RÉSULTATS DES ESSAIS AU LABORATOIRE	63
III.7.1 Les essais d'identification	63
III.7.2 Essai Proctor	69
III.8 INTERPRÉTATION	71
III.9 CONCLUSION	73
CONCLUSION GÉNÉRALE.....	74
RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES	75

LISTE DES FIGURES

Figure I.1: Forces d'attraction et de répulsion en fonction de la distance entre les particules (d'après Le Roux, 1972 ; cité par (Caamapum De Carvalho J., 1987).	5
Figure I.2 : Les effets du compactage sur la structure, d'après (Lambe, 1958).....	6
Figure I.3 : Évolution de la structure d'une argile compactée en fonction de teneur en eau et d'énergie de compactage (d'après Cabot et al., 1993 ; cités par (Cui, 2000).....	7
Figure I.4 : Représentation schématique de l'état de saturation (Boutonnier, 2007).....	8
Figure I.5 : Limites des domaines D1, D2, D3 et D4 sur le diagramme de l'essai Proctor pour des sols fins (Boutonnier, 2007).	8
Figure I.6 : Courbe typique du compactage d'un sol cohérent (Drnevich.V, 2007).....	10
Figure I.7: Courbe typique du compactage d'un sol grenu (Drnevich.V, 2007).	10
Figure I.8: L'influence de l'énergie de compactage (Carter et Bentley., 1991 ; cité par Robert W. Sarsby., 2013).	11
Figure I.9: Influence de la nature du sol sur le compactage (Parsons et al., 1992 cité par (Sarsby, 2013).....	12
Figure I.10: L'influence de type de sol sur le compactage (d'après Milton Keynes., 1990, et cité par (NAGARAJ, 2005).....	14
Figure I.11: Influence de la méthode de compactage, d'après (Mesbah.A, 1999).....	15
Figure I.14: Résistance en fonction de la profondeur dans un moule Proctor (Tisot., 1974), cité par ..	21
Figure I.15: Compactage par un rouleau vibrant (D'Appolonia et al., 1968), cité par ..	21
Figure I.16: Essais de compactage in-situ sur une planche d'essai.(d'après Barnes., 1995), et cité par.	22
Figure II.2: Fuseau granulométrique du tuf calcaire utilisé dans la RN° 06 de la région de Bougtob (Tliba, 1994).	38
Figure II.3: Fuseau granulométrique du Sable gypseux de la région nord d'El-Oued (Tliba, 1994).....	39
Figure II.4: Fuseau granulométrique des tout-venants de plateau de TinRhert utilisé dans la RN° 03 de la région d'Ouhanet (Tliba, 1994).....	39
Figure II.5: Fuseau granulométrique des Arènes granitiques de Tamanrasset (Tliba, 1994).	40
Figure II.6: fuseau discriminant de Béni-Abbes.	41
Figure II.7: Courbe Proctor complète (ISTED-LCPC, 1987).....	42
Figure II.8: Variation de la densité en fonction de la profondeur (ISTED-LCPC, 1987).	44
Figure II.9: Taux de compactage d'un sable en fonction de nombre de passe à $\omega=1\%$, (A.Cissé, 1972).....	45
Figure II.10: Taux de compactage d'un sable en fonction de nombre de passe à $\omega=2\%$, (A.Cissé, 1972).....	45
Figure III.1: Courbe Granulométrique du premier échantillon.....	64

Figure III.2: Courbe Granulométrique du deuxième échantillon.....	66
Figure III.3: Courbe Granulométrique du troisième échantillon.	68
Figure III.4: Courbe Proctor du premier échantillon.....	69
Figure III.5: Courbe Proctor du deuxième échantillon.....	70
Figure III.6: Courbe Proctor du troisième échantillon.	71
Figure III.7: La densité sèche maximale à sec en fonction de la densité sèche maximal à l'OPN	72

LISTE DES PHOTOS

Photo I.1: Matériel pour essai de compactage Proctor (Sarsby, 2013).	17
Photo I.2: Illustration de deux types de compactage au laboratoire.....	19
Photo I.3: Rouleaux de compactage in-situ (SHAHIN, 2010).....	24
Photo II.1: Compacteur à rouleau à chocs (A.N.R.O, 2013).	33
Photo III.1: L'endroit de l'extraction du premier échantillon.....	57
Photo III.2 : L'endroit de l'extraction du deuxième échantillon.....	57
Photo III.3: L'endroit de l'extraction du troisième échantillon.	58
Photo III.4 : Étapes de réalisation de l'essai tamisage à voix humide.	59
Photo III.5 : La technique de la sédimentométrie.	60
Photo III.6 : Calcimètre Dietrich-Fruhling.....	61
Photo III.7 : Étapes de préparation des échantillons.	61
Photo III.8 : Étapes de réalisation de l'essai Proctor normal.....	62

LISTE DES TABLEAUX

Tableau I.1: Essai Proctor Normal et Modifié selon la norme ASTM D1557 et D698.....	17
Tableau I.2: Application de différents équipements de compactage sur différents types de sols (d'après Caterpillar Co., 1977).....	27
Tableau III.1: Résultats des essais en laboratoire du premier échantillon.....	63
Tableau III.2: Résultats des essais en laboratoire du deuxième échantillon.....	65
Tableau III.3: Résultats des essais en laboratoire pour le troisième échantillon.	67
Tableau III.4: Résultats d'essai Proctor pour le premier échantillon.....	69
Tableau III.5 : Les valeurs de la courbe de saturation pour l'échantillon 1	69
Tableau III.6: Résultats d'essai Proctor pour le deuxième échantillon.	70
Tableau III.7 : Les valeurs de la courbe de saturation pour l'échantillon 2	70
Tableau III.8: Résultats d'essai Proctor pour le troisième échantillon.....	71
Tableau III.9 : Les valeurs de la courbe de saturation pour l'échantillon 3	71
Tableau III.10: Résultats des essais Proctor pour les trois échantillons.....	72

LISTE DES ABRÉVIATIONS

Cc	Coefficient de courbure
Cu	Coefficient d'uniformité
CaCO₃	Teneur en carbonates
CaSO₄2H₂O	Teneur en gypses
CBR	Indice de Portance Californien (California Bearing Ratio)
d	Diamètre
d_{max}	Diamètre maximale des particules
d₁₀	Diamètre à 10 % passant
d₃₀	Diamètre à 30 % passant
d₆₀	Diamètre à 60 % passant
e	Indice des vides
E	Module d'Young
EV₁	Module de déformation statique de la plaque pour le 1 ^{er} cycle de chargement
EV₂	Module de déformation statique de la plaque pour le 2 ^{er} cycle de chargement
Ip	Indice de plasticité
LA	Coefficient Los Angles
n	Porosité
PST	Partie Supérieure des Terrassements
OPN	Optimum Proctor Normal
OPM	Optimum Proctor Modifié
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
W_L	Limite de liquidité
W_P	Limite de plasticité
I_p	Indice de plasticité
γ_d	Densité sèche
γ_{d OPN}	Densité sèche à l'Optimum Proctor Normal
γ_{d OPM}	Densité sèche à l'Optimum Proctor Modifié
γ_{dc}	Densité sèche critique

GTR	Guide des Terrassements Routier
AASHTO	American Association of State Highway and Transportation Officials
ASTM	American Society for Testing and Materials
ANRO	Association Nationale des Rapatriés d'Oranie
BSI	British Standards Institution
CECE	Comite for European Construction Equipement
CEMAG	Commission d'Étude des Matériels de Génie Civil
CPT	Cahier des Prescriptions Techniques
FNTF	Fédération National des Travaux Public
LCPC	Laboratoire Central des Ponts et Chaussées
LNTP	Laboratoire National des Travaux Public
ISTED	Institut des Sciences et des Techniques de l'Équipement et de l'Environnement pour le Développement.
TRRL	Transport Road Research Laboratory

INTRODUCTION GÉNÉRALE

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Les régions arides représentent près de 80% de la superficie de l'Algérie. Le développement de ces régions, qui recèlent l'essentiel des ressources pétrolières et gazières du pays et qui demeurent jusqu'à nos jours sous équipés, appelle la réalisation d'un grand nombre d'infrastructures routières. Cependant, la construction des chaussées dans les zones désertes, est handicapée par l'indisponibilité de l'eau nécessaire pour le compactage des matériaux.

La rareté de l'eau rend la tâche de compactage dans ces régions, coûteuse et difficile. Les points d'eau étant très éloignés (environ 100 Km à 300 Km), 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 de revient d'une infrastructure routière.

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. A cause des conditions socio-économiques qu'a vécu le pays pendant le crash pétrolier et juste après cette période, le projet de la transsaharienne s'est arrêté.

Dans le cadre de la mise en œuvre des principes du développement durable, les efforts visant la valorisation des matériaux locaux et la préservation des ressources rares ont redémarré l'intérêt des chercheurs à redéfinir des méthodes de compactage plus efficaces et qui permettent de réaliser des économies d'eau.

Des travaux de recherche, très peu nombreux malheureusement, ont avancé la possibilité de compacter les sols de régions arides à des teneurs en eau beaucoup plus faibles que la teneur en eau optimum avec toutefois certaines dispositions constructives particulières pour garantir des caractéristiques techniques acceptables, dans le sol compacté. Parmi ces travaux, il peut être intéressant de citer quelques expériences qui ont été réalisées à Tamanrasset (Algérie), au Kenya et au Soudan durant les années soixante-dix à l'occasion de la réalisation de la transsaharienne. On reprend conscience ces derniers temps du potentiel socio-économique qu'offre le compactage à faible teneur en eau dans ces régions, s'il devait être faisable.

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.

À l'appui de quelques rares résultats très limités, tirés de la littérature du sujet, on tente par un travail expérimental, de questionner la thèse qui avance qu'il est possible de compacter des sols à des teneurs en eau beaucoup plus faibles que l'optimum Proctor et d'obtenir tout de même des densités sèches aussi importantes sinon plus que celles qui correspondent à cet optimum 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. On réalise un programme expérimental à partir de trois matériaux granulaires (tufs) extraient de différents endroits choisis (Tagma, Beni Saf et El Madigue), 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.

Chapitre I

GÉNÉRALITÉS SUR LE
COMPACTAGE

Chapitre I GÉNÉRALITÉS SUR LE COMPACTAGE DES SOLS

I.1 INTRODUCTION

Dans le génie civil nous pouvons distinguer deux domaines principaux d'application du compactage :

- Le domaine des chaussées ;
- Le domaine des grands terrassements, remblai, barrages etc...

Ces domaines se distinguent par le degré d'élaboration du choix ,le traitement du matériau et plus particulièrement par l'énergie de compactage mise en œuvre par unité de volume de matériau.

Dans tous les cas, il s'agit, à partir d'un matériau donné d'obtenir un autre produit répandant à certaines caractéristiques ou exigences techniques et technologiques des constructions.

(Hassaine, 1990).

Cependant, dans la pratique courante et traditionnelle, 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.

Le but principal de ce chapitre est de présenter une bibliographie générale sur le compactage des sols.

I.2 DÉFINITION DE COMPACTAGE

Ce que l'on appelle "compactage" au sens strict correspond à la communication d'un certain procédé mécanique (force, vibration, combinaison des deux, chocs,...). Cette définition étant très limitative, il serait préférable de qualifier le compactage comme un ensemble d'opérations permettant d'obtenir, à partir d'un matériau donné, des caractéristiques appropriées aux fonctions à remplir.

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

- 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.

Ainsi, lorsque le volume des vides du sol se réduit, le sol est également moins déformable et donc son module d'Young (E) augmente.

I.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. (Aquié, 1973).

Pour compacter un sol, il faut le déformer d'une manière irréversible, donc le cisailier. Alors il faut exercer sur ce dernier des contraintes qui sortent de la courbe intrinsèque.

I.4 THÉORIE DE COMPACTAGE

La théorie du compactage se compose :

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

I.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 (Caamapum De Carvalho J., 1987).

(Lambe, 1958) 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)*, cité par (*Caamapum De Carvalho J., 1987*). La (*figure I.1*) montre les interactions en fonction de la distance entre les particules.

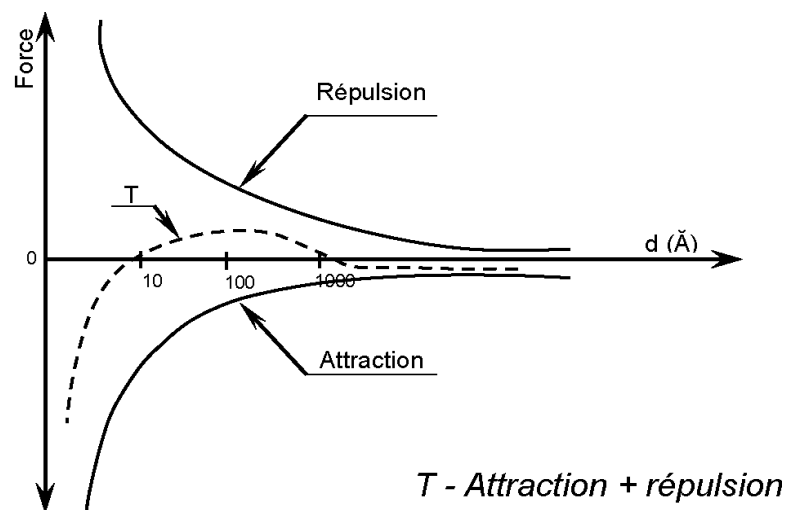


Figure I.1: Forces d'attraction et de répulsion en fonction de la distance entre les particules (d'après *Le Roux, 1972* ; cité par (*Caamapum De Carvalho J., 1987*)).

I.4.2 La structure des sols compactés

La théorie du compactage est d'abord proposée par (*Proctor, 1933*), puis développée largement à partir des années 1930.

(*Lambe, 1958*) 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 floclée, 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.

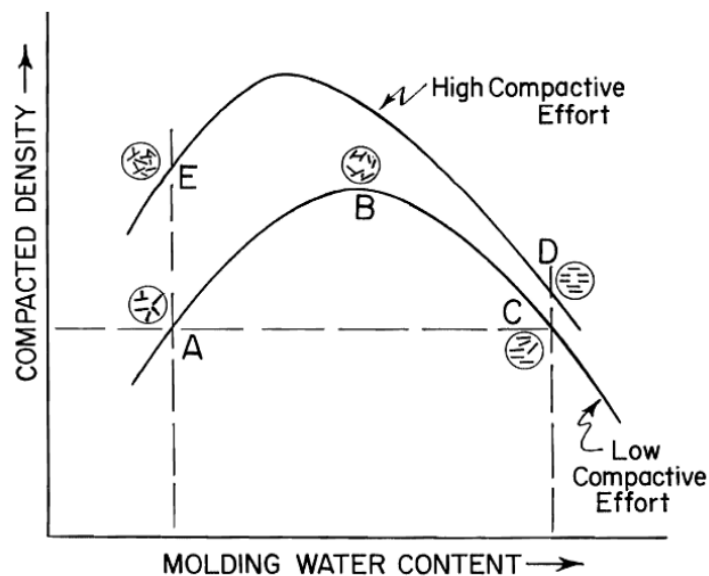


Figure I.2 : Les effets du compactage sur la structure, d'après (Lambe, 1958).

Collins et McGown (1974) suggèrent que l'on peut décrire 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. Li (1999) a indiqué qu'il semble que ce classement convienne très bien pour les sols fins non saturés.

Collins et McGown (1974), Gens et Alonso (1992) et cité par (Zhong-Sen, 2015) ont proposé 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.

Cabot et al (1993), cité par (Cui, 2000) ont étudié 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.

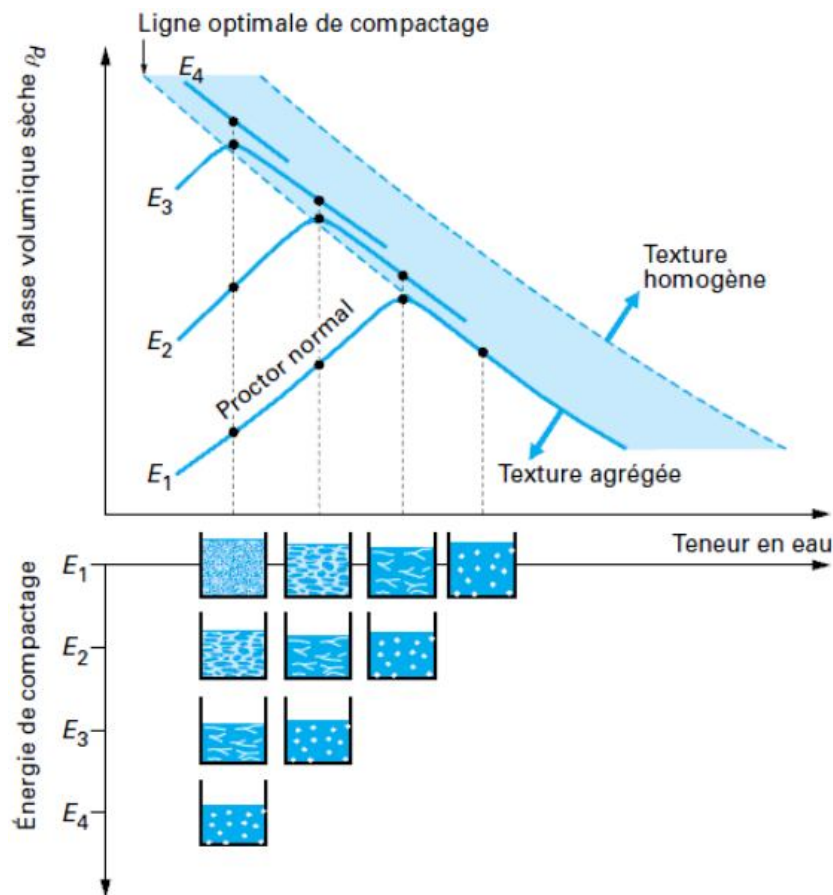


Figure I.3 : Évolution de la structure d'une argile compactée en fonction de teneur en eau et d'énergie de compactage (d'après Cabot et al., 1993 ; cités par (Cui, 2000).

Boutonnier (2007) considère qu'il y a quatre domaines de saturation pour les sols compactés (figure I.4) :

- 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.

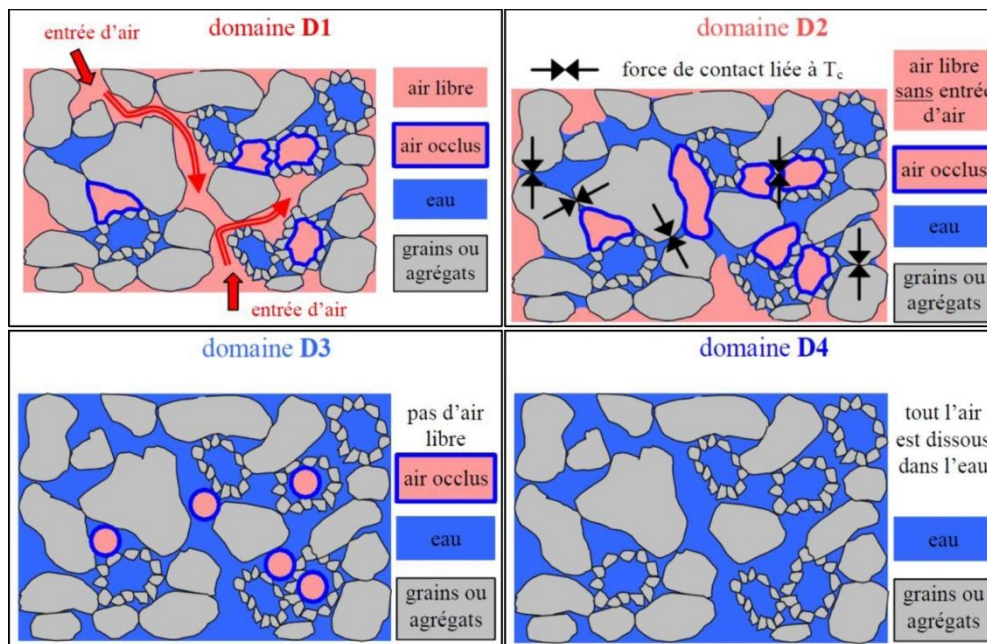


Figure I.4 : Représentation schématique de l'état de saturation (Boutonnier, 2007).

En se basant sur quelques résultats de la littérature, (Boutonnier, 2007) 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).

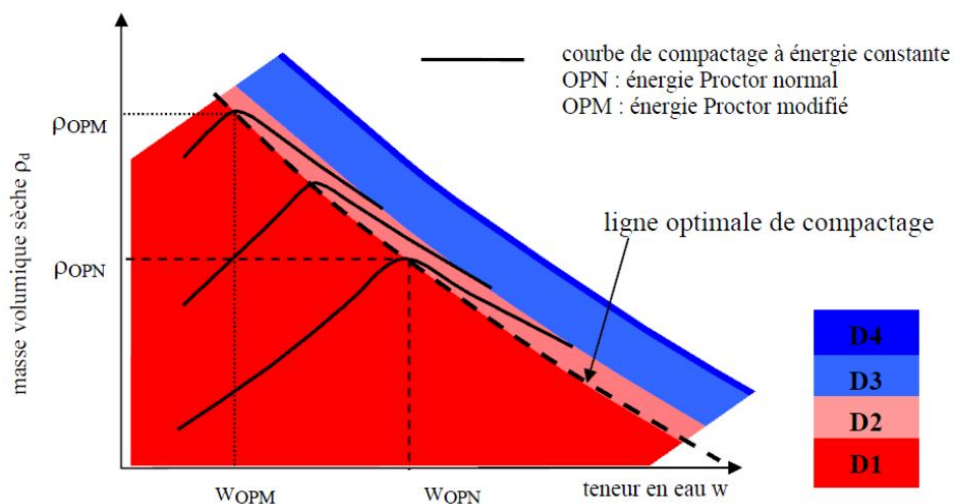


Figure I.5 : Limites des domaines D1, D2, D3 et D4 sur le diagramme de l'essai Proctor pour des sols fins (Boutonnier, 2007).

I.4.3 Les paramètres influençant le 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 *R. Proctor (1933)* que l'on doit les premières études, (Djedid.A, 1998).

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.

I.4.3.1 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 (*figure I.6*), la variation du poids volumique sec γ_d en fonction de la teneur en eau ω , on obtient une courbe en cloche.

(Drnevich.V, 2007) a indiqué que :

- Lorsque la teneur en eau est faible, le sol est rigide et difficile à comprimer. Ainsi, on obtient une faible densité et une haute teneur en air ;
- Lorsque la teneur en eau augmente, l'eau agit comme un lubrifiant, provoquant un ramollissement du sol qui devient plus déformable, ce qui aboutit par la suite à des densités plus élevées et des quantités plus faibles d'air contenu ;
- Lorsque la teneur en eau est encore augmentée, une étape est atteinte lorsque l'eau et l'air en combinaison ont tendance à maintenir les particules du sol séparées, et à empêcher toute diminution appréciable de la teneur en air. Les vides totaux, cependant, continuent à augmenter avec la teneur en eau et donc la densité sèche du sol diminue.

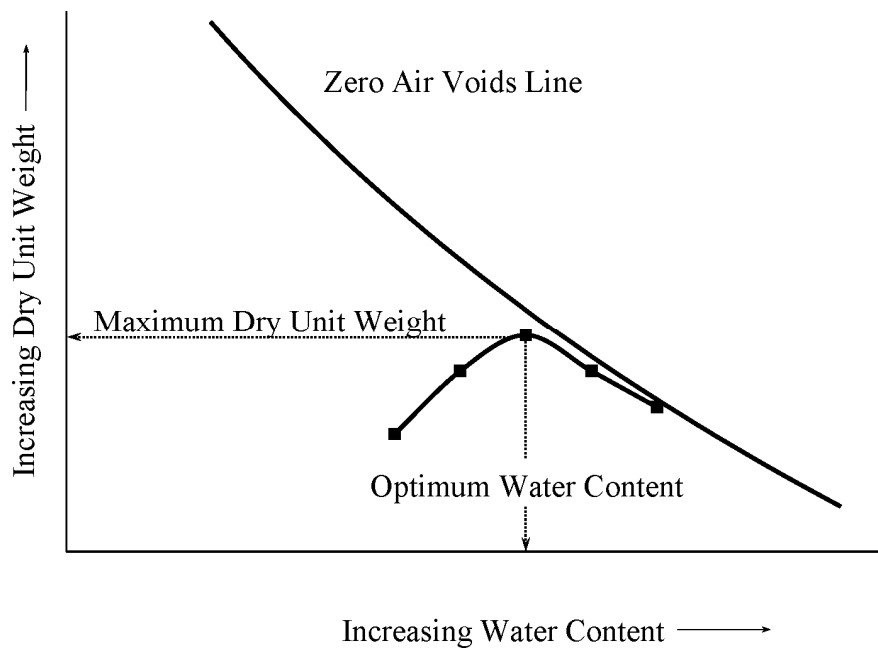


Figure I.6 : Courbe typique du compactage d'un sol cohérent (Drnevich.V, 2007).

On note aussi que, pour les sables secs ($\omega < 1\%$), il est possible d'atteindre des poids volumiques secs supérieurs à ceux obtenus à l'optimum par séchage du sol: ce qui permet de compacter à sec (figure I.7). Ce type de compactage est très utile dans les régions arides.

Dans le cas des sols argileux, ce phénomène est toujours beaucoup plus complexe.

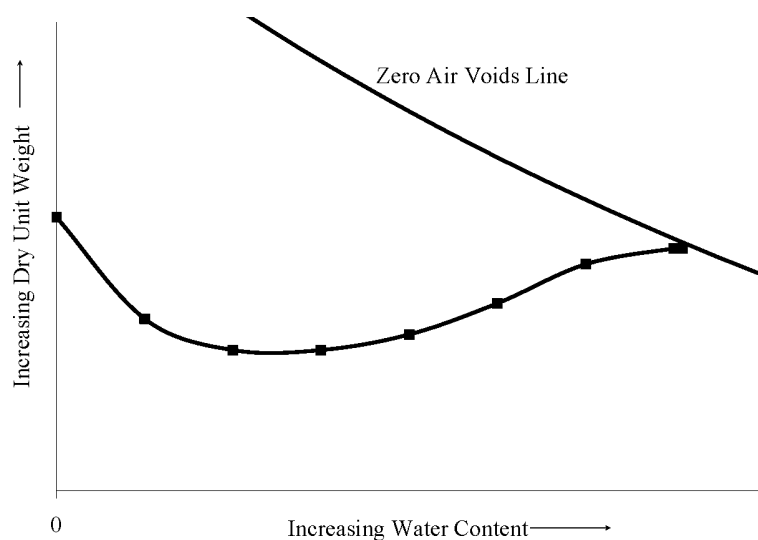


Figure I.7: Courbe typique du compactage d'un sol grenu (Drnevich.V, 2007).

I.4.3.2 Influence de l'énergie de compactage

Carter et Bentley (1991), ont effectué plusieurs essais de compactage sur un même échantillon, avec des énergies de compactage croissantes au laboratoire par des essais (*Proctor Normal* et *Modifié*), suivant la norme britannique (*B.S.I*), qui est équivalente à la norme (*A.A.S.H.T.O*). Les courbes Proctor correspondantes sont présentées sur la (*figure I.8*).

Les résultats montrent clairement que, pour le même type de sol, l'augmentation de l'énergie de compactage engendre un accroissement de la densité sèche maximale du sol et parallèlement une diminution de la teneur en eau optimale.

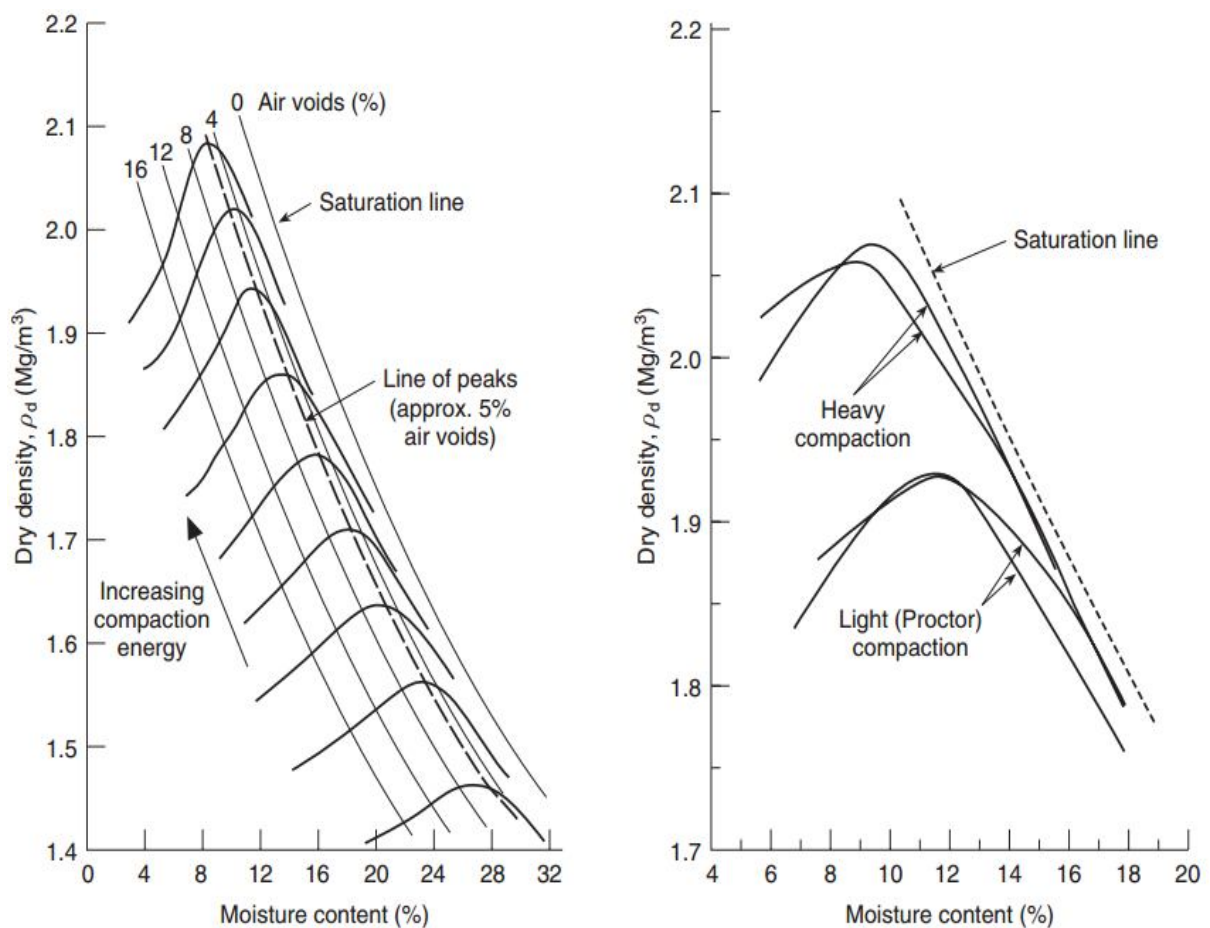


Figure I.8: L'influence de l'énergie de compactage (Carter et Bentley., 1991 ; cité par (Sarsby, 2013)).

Proctor Normal : Dame de 2.5 kg, 27 coups par couche ;

CBR (Heavy) : Dame de 4.5 kg, 27 coups par couche.

I.4.3.3 Influence de la granulométrie

Parsons et al. (1992), cité par (Sarsby, 2013) ont étudié systématiquement le compactage des cinq sols suivant l'essai Proctor Normal. Les allures (*figure I.9*) 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 (*Parsons et al., 1992*) 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 améliorent le compactage en permettant aux particules fines de s'incruster dans les vides laissés par les plus grosses. Les argiles plastiques sont ceux qui donnent, en général, les densités sèches les plus élevées.

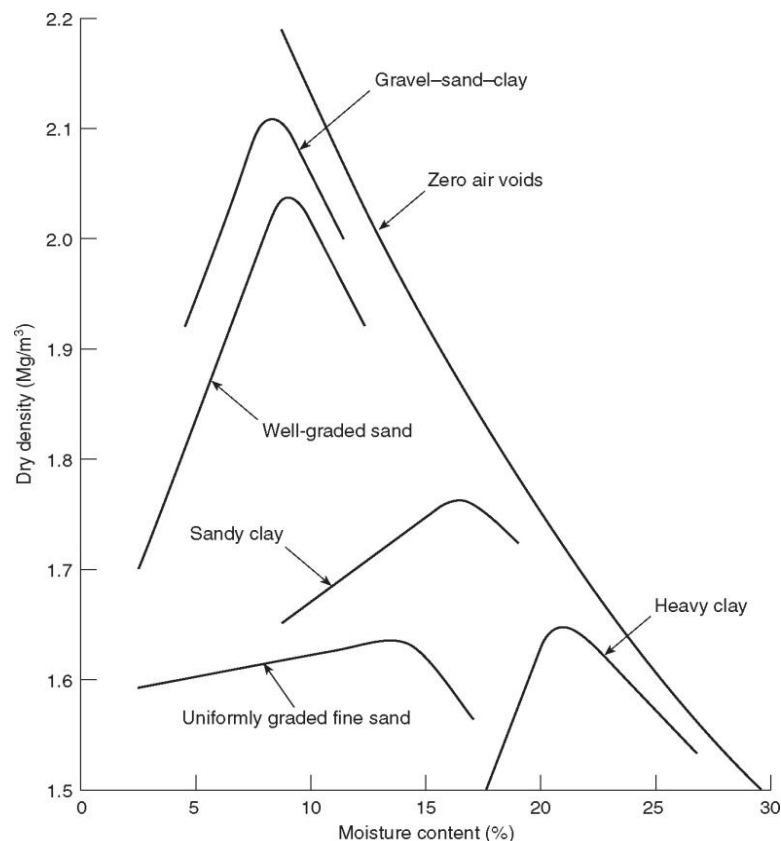


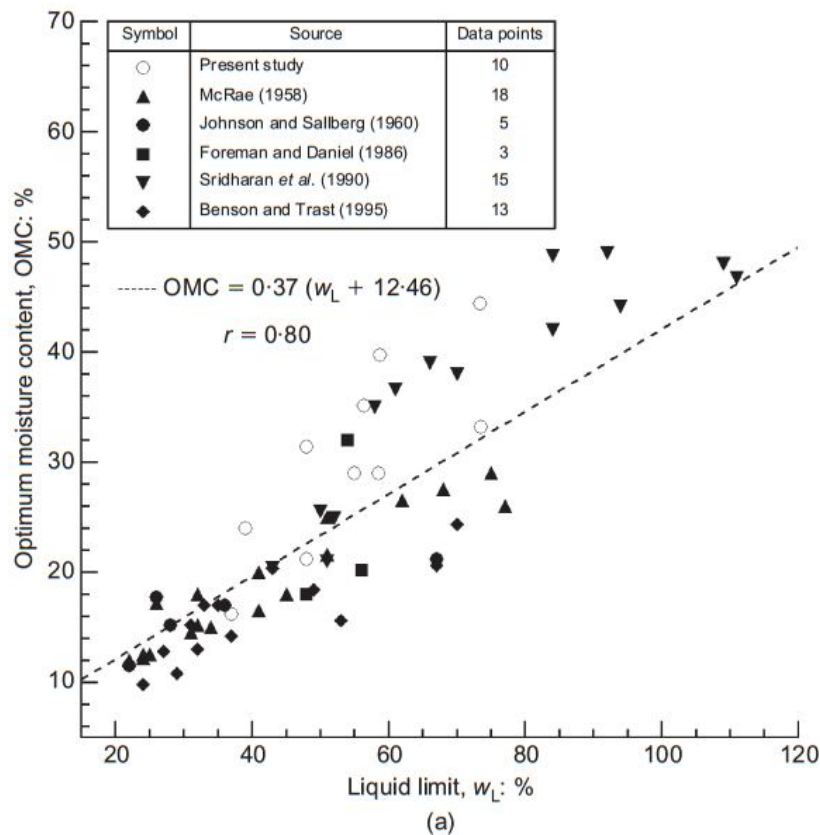
Figure I.9: Influence de la nature du sol sur le compactage (*Parsons et al., 1992* cité par (*Sarsby, 2013*)).

I.4.3.4 Influence de type de sol

Williams et al., (1949), cité par (Zhong-Sen, 2015), ont trouvé que le type de sol peut influencer de façon importante la courbe de compactage, la densité sèche diminue avec l'augmentation de la limite de liquidité, mais la teneur en eau optimale augmente avec la limite de liquidité.

Milton Keynes (1990), cité par (NAGARAJ, 2005) a présenté les relations entre la teneur en eau optimum et la limite de liquidité (figure I.11a), ainsi la relation entre la densité sèche optimum maximum et la limite de liquidité (figure I.11b), pour différents sables fins, publiés par différents auteurs :

(*McRae*, 1958; *Johnson et Sallberg*, 1960; *Foreman et Daniel*, 1986; *Sridharan et al*, 1990; *Benson et Trast*, 1995) et compactés par la méthode Proctor Standard. Les résultats assez complets cités par (NAGARAJ, 2005) montrent l'influence du type de sol sur la courbe de compactage (figure I.11).



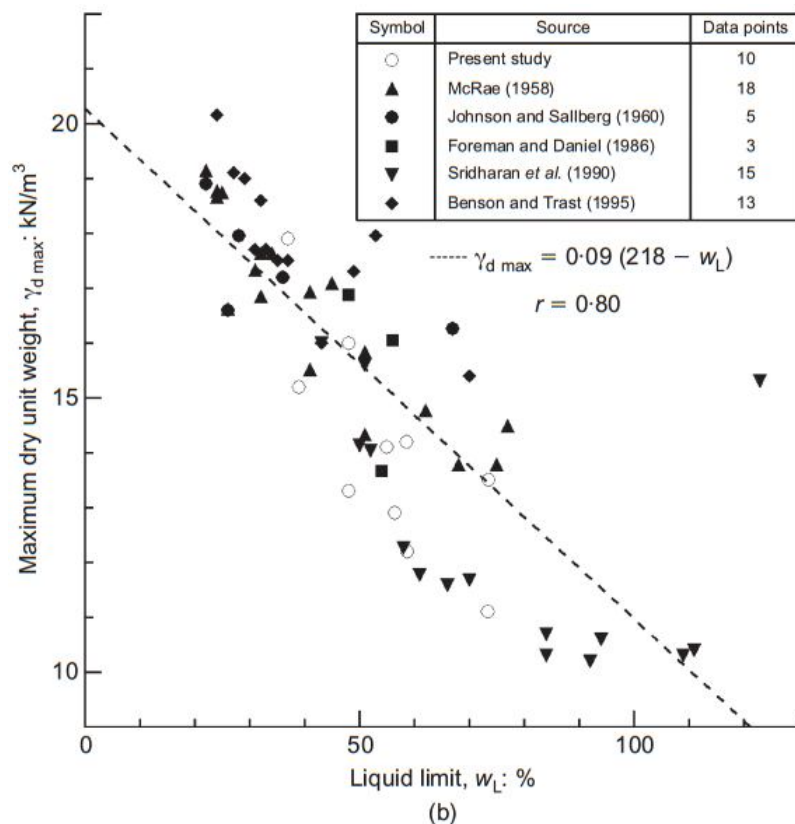


Figure I.10: L'influence de type de sol sur le compactage (d'après Milton Keynes., 1990, et cité par (NAGARAJ, 2005).

I.4.3.5 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 ; par ailleurs, selon leurs compositions, les sols seront plus ou moins sensibles à la méthode de compactage utilisée (Caamapum De Carvalho J., 1987).

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 dynamique impose un plus grand degré d'orientation aux particules.

- **Le compactage statique** : c'est une charge statique (le poids) et une charge vibratoire avec 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).

(Mesbah.A, 1999), a effectué une série d'essai sur des sols fins argileux en utilisant différents types de compactage pour comparer l'efficacité de chaque méthode. Sur la (Figure II.12), ils ont trouvé que :

- L'énergie dissipée lors de l'essai Proctor en dehors de l'échantillon (dans les vibrations du bâti, par frottement sur les parois du moule) est de 250 kJ/m^3 (différence d'énergies des point O et B sur la figure, qui ont la même densité sèche), soit 45% de l'énergie totale qui n'est pas utilisée pour le compactage ;
- Pour les mêmes énergies appliquées de 550 kJ/m^3 , la densité sèche par le compactage statique est de 0.07 g/cm^3 supérieure à celle du Proctor Normal.

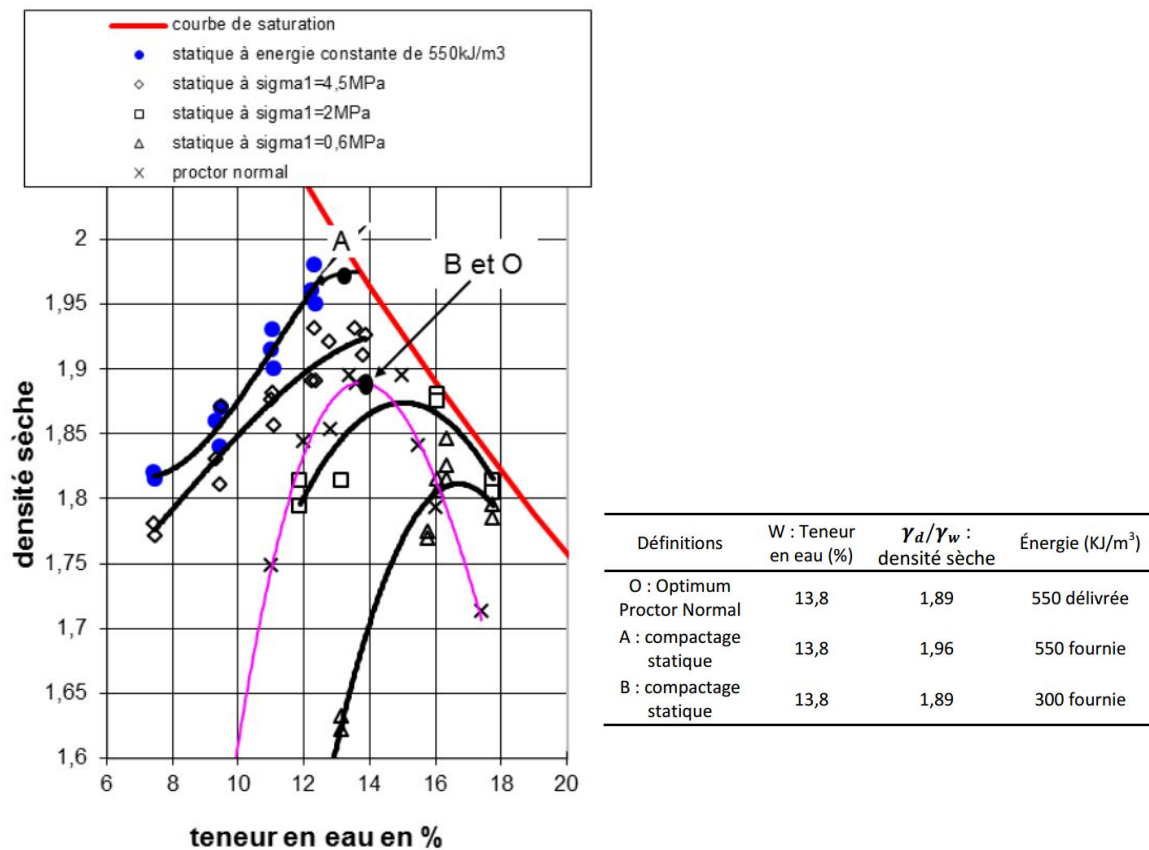


Figure I.11: Influence de la méthode de compactage, d'après (Mesbah.A, 1999).

I.5 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 différents teneurs en eau, le résultat de chacun produisant un couple de valeurs (ω, γ_d) , 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. (E. Leflaive et al., 1974), cité par (Drnevich.V, 2007).

Cette section discute les différentes méthodes de compactage au laboratoire et discute les avantages et/ou les inconvénients de sols granulaires relatifs à chaque technique. Des processus de compactage dans un laboratoire peuvent être classifiés au-dessous de cinq catégories (Luxford., 1975), cité par (Drnevich.V, 2007), à savoir :

- Compactage par impact ;
- Compactage statique ;
- Compactage par pétrissage ou la méthode "Kneading" ;
- Compactage vibrant ;

I.5.1 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 marché pour exécuter, toutefois quelques inconvénients existent dans l'essai (Luxford., 1975), Feutre (1968) a 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, car le matériau se déplace sous la dame, et par conséquent les valeurs de densité obtenues seront faibles.



Photo I.1: Matériel pour essai de compactage Proctor (Sarsby, 2013).

Tableau I.1: Essai Proctor Normal et Modifié selon la norme ASTM D 1557 et D 698.

Caractéristiques	Proctor Normal ASTM D 698			Proctor Modifié ASTM D 1557		
	Normal	Modifié		Normal	Modifié	
Volume du moule (cm ³)	944			2124		
Diamètre du moule (cm)	10,16			15,24		
Hauteur du moule (cm)	11,64			11,64		
Essai	Normal	Modifié		Normal	Modifié	
Poids de la dame (kg)	2,49	4,54		2,49	4,54	
Diamètre de la dame (cm)	5,08	5,08		5,08	5,08	
Hauteur de chute (cm)	30,50	45,70		30,50	45,70	
Nombre de couche	Méthode A	Méthode B	Méthode C	Méthode A	Méthode B	Méthode C
Matériau	≤ 20 % retenu par le tamis de 4,75 mm.	> 20 % retenu par le tamis de 4,75 mm et ≤ 20 % de retenu par le tamis de 9,5 mm.	> 20 % retenu par le tamis de 9,5 mm et < 30 % retenu par le tamis de 19 mm.	≤ 20 % retenu par le tamis de 4,75 mm.	> 20 % retenu par le tamis de 4,75 mm et ≤ 20 % de retenu par le tamis de 9,5 mm.	> 20 % retenu par le tamis de 9,5 mm et < 30 % retenu par le tamis de 19 mm.
Diamètre du tamis (mm)	4,75	9,5	19	4,75	9,5	19
Diamètre du moule (cm)	10,16	10,16	15,24	10,16	10,16	15,24
Nombre de couche	3	3	3	3	5	5
Nombre de coups/couche	25	56	56	25	56	56
Énergie de compactage (MJ/m ³)	0,60	1,33	1,62	0,60	2,23	2,70

I.5.2 Compactage statique

Le compactage statique est de comprimer un spécimen 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 (*Hausmann., 1990*). Cependant, en raison de la manière que l'essai est fait, l'orientation de particules est susceptible d'être différente de cela, réalisée dans le domaine puisque la technique in-situ du compactage n'est pas simulée de quelque façon dans cet essai. Un rapport conduit par *Johnson et Sallberg (1962)* a montré quelques facteurs qui influencent l'essai, ceux-ci incluent :

- Afin d'empêcher les agrégats granulaires évalués par ségrégation doit être placé dans le moule très soigneusement ;
- Les longues périodes de l'application de charge statique sur l'échantillon a comme conséquence l'expulsion de l'eau produisant une densité sèche maximum aux teneurs en eau irréalistes.

I.5.3 Compactage par pétrissage

Inspiré par l'action de malaxage produite par le rouleau à pieds de mouton dans le compactage in-situ, l'essai en laboratoire de malaxage de compactage a été développé. Semblable au rouleau à pieds de mouton dans le domaine, les efforts de compactage de laboratoire sur l'échantillon sont graduellement accumulés alors graduellement libérés. Le développement d'un compacteur de malaxage automatique par *Dodd et Dunlop (1971)* a prouvé que 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.

I.5.4 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 ont 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 ont 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.14).



a) Compactage à marteau vibrant.



b) Compactage à table vibrante.

Photo I.2: Illustration de deux types de compactage au laboratoire.

La différence entre les deux procédures est que la méthode de la table vibrante (figure I.14b) 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.14a) 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 (SHAHIN, 2010).

Le premier qui a effectué une enquête et une recherche complètes sur l'utilisation de l'essai vibrant de compactage de marteau était *Parsons (1964)*. 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 assurée au marteau.

I.6 ESSAIS DE COMPACTAGE IN-SITU

I.6.1 La planche d'essai

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. Des couches et le nombre de passe du compactage sont déterminés lors de ces essais. (H. Pougatsch et al., 2011) et cité par (Hafidi.F.Z, 2013).

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 connaître, 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. (MOREL.G, 1988).

I.6.2 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, compacter, ce qui permet d'en vérifier l'aptitude.

I.6.3 Dimensions de la planche d'essai

La dimension de la planche d'essai est celle qui permet une mise en œuvre satisfaisante, (A. Emmanuel., 2002), cité par (Hafidi.F.Z, 2013), 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.15*) 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.

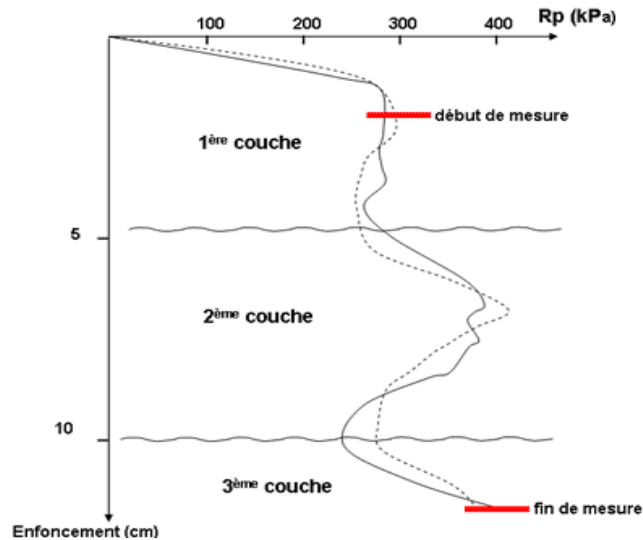


Figure I.12: Résistance en fonction de la profondeur dans un moule Proctor (Tisot., 1974), cité par (Holtz.R.D, 1999) .

I.6.4 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. 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.16*).

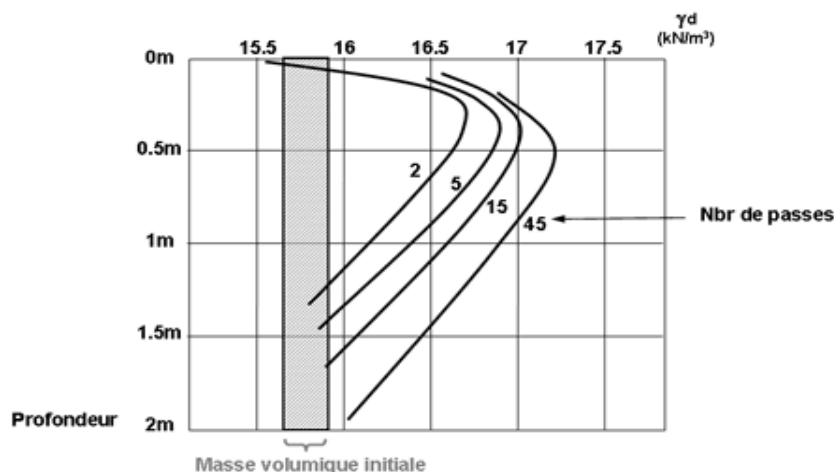


Figure I.13: Compactage par un rouleau vibrant (D'Appolonia et al., 1968), cité par (Holtz.R.D, 1999).

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. (A.Emmanuel., 2002) ; et cité par (Hafidi.F.Z, 2013).

Les deux schémas de la (figure I.16) permettent de voir encore deux phénomènes. Sur la (figure I.16a), 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.16b), 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.

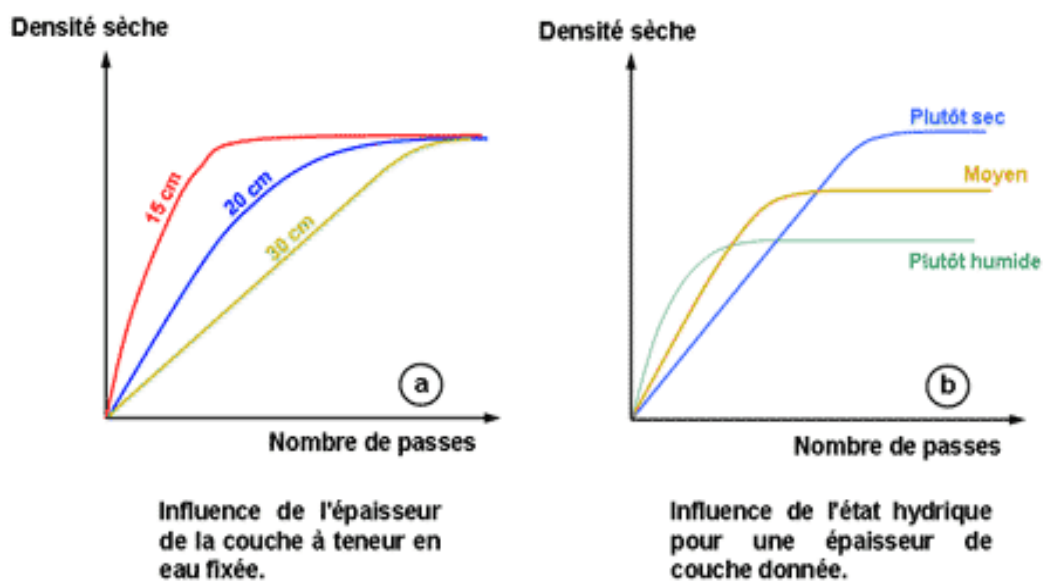


Figure I.14: Essais de compactage in-situ sur une planche d'essai. (d'après Barnes., 1995), et cité par (Holtz.R.D, 1999) .

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.

I.7 LES ENGINES DE COMPACTAGE

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.7.1 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 national 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'autre 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.

I.7.2 Rouleaux à bandage lisse

I.7.2.1 Historique et généralité

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 m.

I.7.2.2 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 $0,40\text{ m}$ 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 motrice ;
- 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. (MOREL.G, 1988).

L'épaisseur des couches est généralement entre 15 cm et 25 cm .



a) Rouleau à pieds de mouton



b) Rouleau lisse

Photo I.3: Rouleaux de compactage in-situ (SHAHIN, 2010).

I.7.3 Rouleaux à pneus

I.7.3.1 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.7.3.2 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.7.3.3 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*.

I.7.4 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.7.5 Rouleaux à pieds dameurs

Ce sont des compacteurs très anciens utilisés aux *Etats-Unis* dès le début des *années 30*. C'est le type de rouleau qu'utilisait *Proctor*. (MOREL.G, 1988).

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). (Biarez, 1974):

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

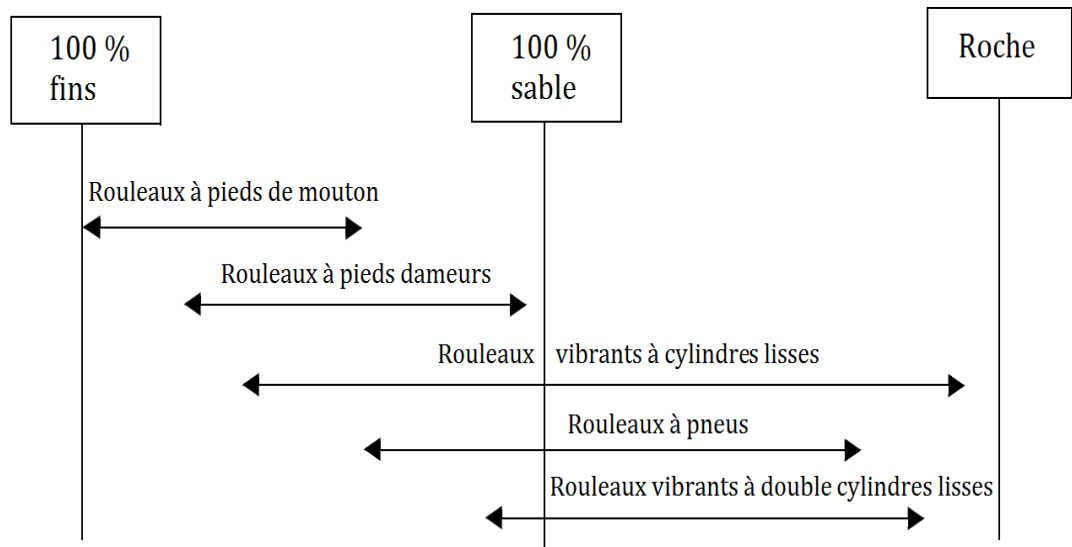
L'épaisseur des couches est de l'ordre de 15 cm.

I.7.6 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. (Biarez, 1974).

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. (Guilbault, 2007).

Tableau I.2: Application de différents équipements de compactage sur différents types de sols (d'après Caterpillar Co., 1977 ; cite par (Holtz.R.D, 1999).



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
Rouleaux vibrants à double cylindres lisses	Sols graveleux ; asphalte.	Statique

I.8 CONCLUSION

Aucun pratiquant dans le domaine du génie civil ne peut maîtriser l'art de construire sans pouvoir affronter les problèmes immenses et complexes que posent le compactage des sols et matériaux granulaires. La diversité des difficultés liées à un ensemble de paramètres naturels et artificiels amènent tout ingénieur ou concepteur à s'imprégner, mieux, à comprendre et à anticiper, par la connaissance des phénomènes physiques, comportementaux aléatoires des sols. Alors le compactage des sols est un ensemble de procédures qui permettent d'améliorer et obtenir un bon comportement des remblais à court et à long terme sans avoir de grands dégâts.

Chapitre II

LE COMPACTAGE À SEC

Chapitre II LE COMPACTAGE À SEC

II.1 INTRODUCTION

Dans la pratique courante et traditionnelle, 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. En suite, 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 HISTORIQUE ET QUELQUES EXPÉRIENCES (ELLIS.C.I, 1980)

La recherche sur le compactage à de 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.

En Australie, des travaux s'étalant entre 1962-1973 ont été résumés par *the Australian Road Research Board* dans un rapport (Morris., 1975).

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 *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.

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* (*Grace et Cocksedge., 1978*).

En France, des travaux sur des sables quartzeux compactés à sec se sont révélés particulièrement intéressants (*Chaigne et Blivet., 1971*). 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 (*Mtango., 1979*).

En Afrique du sud, l'Université de Pretoria a accompli une étude en trois parties sur le compactage des sols en zones arides (*Van Rooyen and Wesseles 1967, a, b, c*).

Les travaux ont consacré une large partie sur l'étude des ajouts pour améliorer le compactage. Cette étude a été suivie par un rapport sur l'utilisation de ces ajouts *NIRR (Todres., 1970)*.

Des ajouts 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 ont été développés et proposés sur le marché. Le rouleau à impacts (*figure II.1*) a été développé 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 (*Clifford., 1976*).

En Afrique du Nord, des essais sur des graviers naturels bien gradués utilisés comme matériaux de remblai ont été effectués au *Maroc* (*Kabbaj., 1979*) avec un relatif succès. Contrairement aux résultats de l'expérience sur les sables secs.

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 (Ellis., 1980).



Photo II.1: Compacteur à rouleau à chocs (A.N.R.O, 2013).

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 (International Road Federation., 1978)*.

Les résultats de l'essai étaient satisfaisants pour cette région du *Soudan* néanmoins les performances satisfaisantes obtenues ont prouvé que le compactage à sec est efficace sous des conditions particulières et que des investigations supplémentaires sont recommandées pour la performance des routes à tous les niveaux de contrôle ou des variations des épaisseurs des couches compactées, le nombre de passes du rouleau et les caractéristiques du matériau.

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 B₁) 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 C₁ à C₂) pour réaliser la couche de base de la chaussée.

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.

En Algérie, 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 août 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 différenciation 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.

II.3 LE CONTEXTE SAHARIEN (MORSLI.M, 2002)

II.3.1 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 $H > 600 \text{ mm}$;

Zone II : méditerranéenne subhumide $350 \text{ mm} < H < 600 \text{ mm}$;

Zone III : semi-aride ou steppique $100 \text{ mm} < H < 350 \text{ mm}$;

Zone IV : aride ou désertique $H < 100 \text{ mm}$.

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.

II.3.2 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.

II.3.3 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 ;
- Des argiles.

II.3.4 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'enferflux des oueds importants.

II.4 LA TECHNIQUE ROUTIÈRE SAHARIENNE (FENZY, 1965)

II.4.1 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.

II.4.2 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.

II.4.3 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.

II.4.4 Domaine d'application

- Climat très sec (moyenne annuelle des pluies $< 100 \text{ mm}$) ;
- Risques d'imbibition des sols sous chaussées très réduits.

II.5 LES MATÉRIAUX UTILISÉS AU SAHARA ALGÉRIEN (TLIBA, 1994)

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.5.1 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 ($CaCO_3$).

Après malaxage à l'eau, compactage et séchage le matériau se traduit par une cohésion appréciable. Donnons dans la (*figure II.1*) à titre indicatif le fuseau du tuf calcaire de la région de *Bougtob* utilisé sur la *RN°06*.

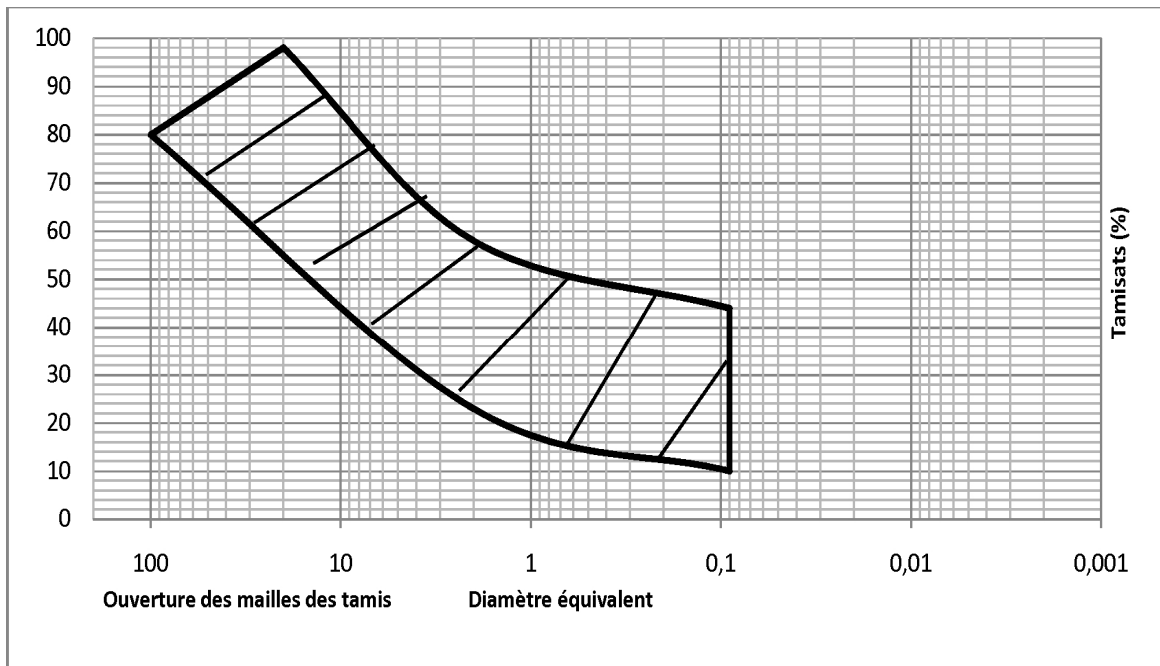


Figure II.1: Fuseau granulométrique du tuf calcaire utilisé dans la RN° 06 de la région de Bougtob (Tliba, 1994).

La résistance à la compression est bornée entre 18 et 32 kg/cm^2 à 95% de la densité optimale. Elle varie entre 29 et 37 kg/cm^2 pour 98% de la densité optimale. Ce matériau présente un coefficient los Angles $L.A$ compris entre 40 et 60% .

II.5.2 Sable gypseux

Matériau ayant la granulométrie d'un sable (figure II.2) donc complètement dépourvu de squelette solide, les grains y sont essentiellement de nature gypseuse ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$). 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/cm^2 pour une compacité de 95% . Pour une compacité de 98% la résistance varie entre 20 et 45 kg/cm^2 . La teneur en gypse ($\text{Ca SO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) est de 60% et 90% .

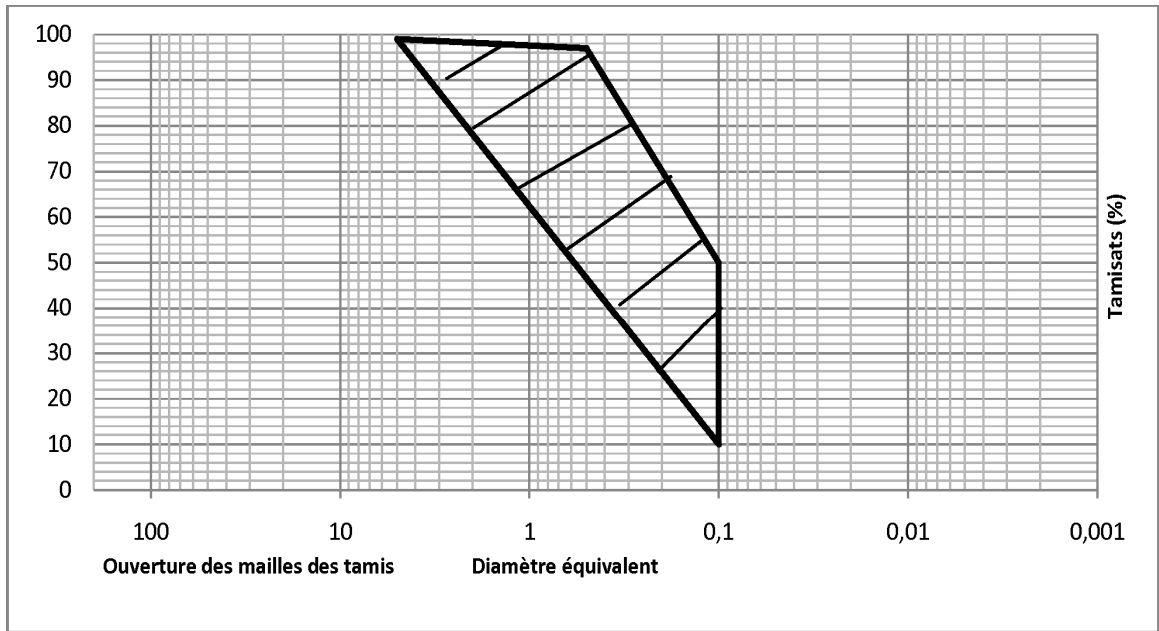


Figure II.2: Fuseau granulométrique du Sable gypseux de la région nord d'El-Oued (Tliba, 1994).

II.5.3 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 (figure II.3).

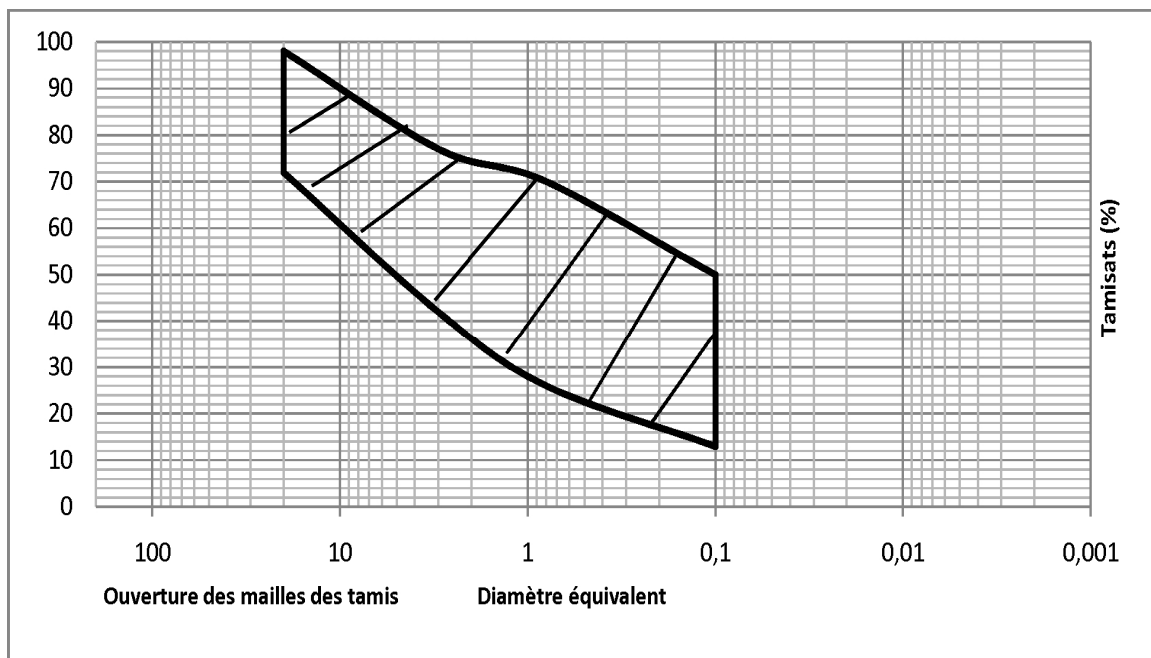


Figure II.3: Fuseau granulométrique des tout-venants de plateau de TinRhert utilisé dans la RN° 03 de la région d'Ouhanet (Tliba, 1994).

On donne dans la (figure II.3) représentée ci-dessus le fuseau granulométrique qui caractérise ce matériau. Le tout venant présente un indice de plasticité de 5 à 10, il donne une résistance à la compression $> 25 \text{ kg/cm}^2$ à 98% à l'OPM.

II.5.4 Arène granitique

On illustre dans la (figue II.4) les caractéristiques du Fuseau granulométrique de l'arène granitique de Tamanrasset.

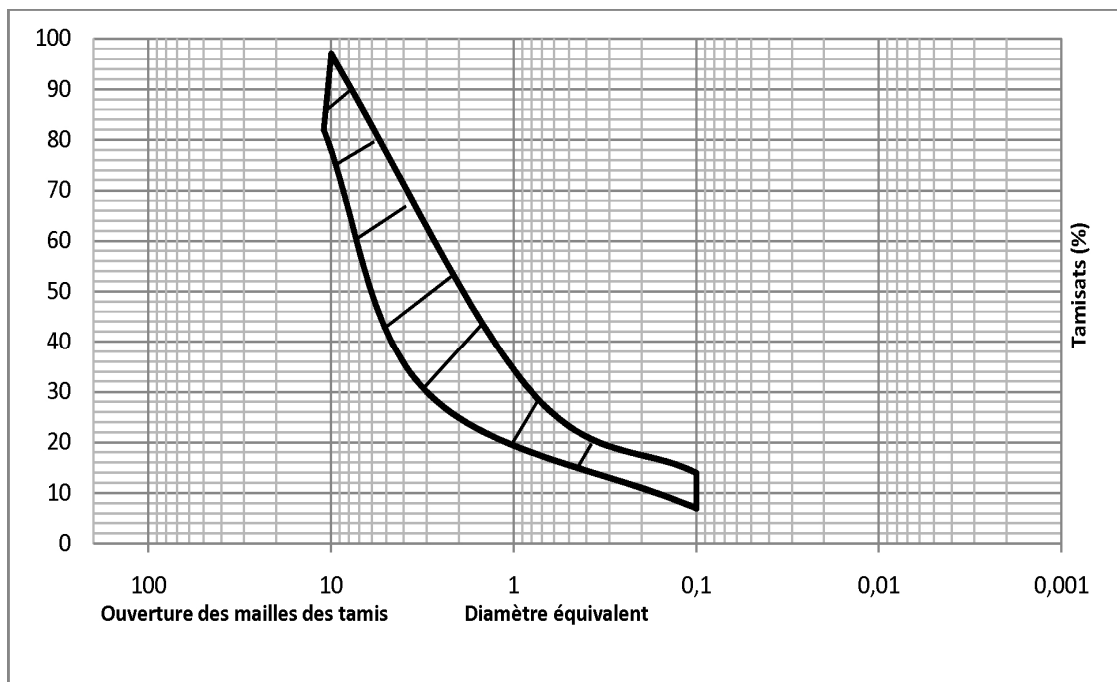


Figure II.4: Fuseau granulométrique des Arènes granitiques de Tamanrasset (Tliba, 1994).

Ce sont les produits de l'altération de roches éruptives ou métamorphiques essentiellement le granite. Elles se présentent sous forme de grave, de gros sables ou de matériaux fins mais dans tous les cas les éléments sont tellement friables qu'il n'y a pas lieu de considérer ce pseudo-squelette.

Les arènes granitiques fournissent une résistance allant de 14 à 35 kg/cm^2 pour une compacité de 98%. Elles donnent un $I.p$ qui borne entre 7 et 15.

II.6 CLASSIFICATION DES MATÉRIAUX (LARABI, 1998)

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.5), 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'enclassement 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.

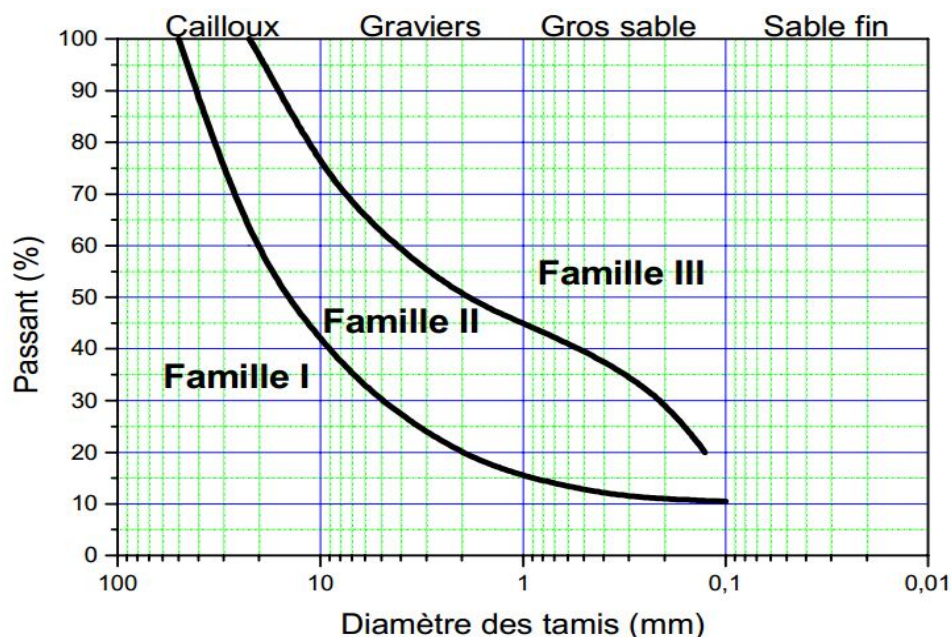


Figure II.5: fuseau discriminant de Béni-Abbes.

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).

II.7 ASPECTS SPÉCIFIQUES DU COMPACTAGE À SEC

Le compactage à sec ou à faible teneur en eau présente des aspects spécifiques concernant :

- La variation de la densité sèche en fonction de la teneur en eau ;
- La variation de la densité sèche en fonction de la profondeur de couche ;

II.7.1 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 $\gamma_d = f(\omega)$ depuis une teneur en eau quasi nulle jusqu'à la saturation, la courbe obtenue fait apparaître souvent deux teneurs en eau caractéristiques :

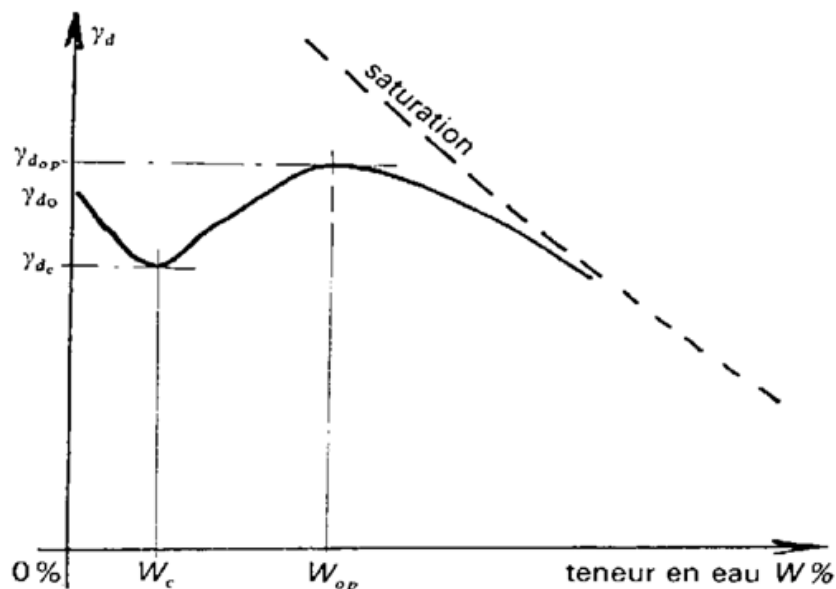


Figure II.6: Courbe Proctor complète (ISTED-LCPC, 1987).

- ω_{opt} , classique conduisant à la densité sèche maximale $\gamma_{d\ opt}$ de l'essai *Proctor*.
- ω_c , dite teneur en eau critique, pour laquelle la densité sèche passe par un minimum γ_{dc} et celle-là est la teneur en eau à partir de laquelle γ_d croît nettement avec ω . Entre une teneur en eau nulle et ω_c , la densité décroît en général.

Sur la courbe de la (*figure II.6*), 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 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.

II.7.2 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 présente une allure semblable à celle obtenue par un compactage classique. Et cette variation s'exprime par la loi du gradient décrite par la (*figure II.7*) :

$$\gamma_d = f(Z)$$

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.

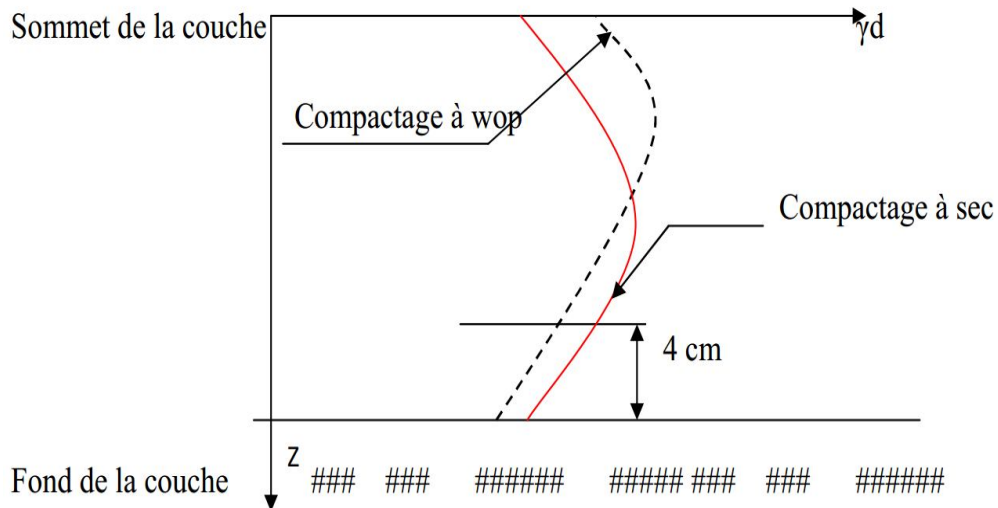


Figure II.7: Variation de la densité en fonction de la profondeur (ISTED-LCPC, 1987).

II.7.3 Évolution de la densité sèche en fonction du nombre de passe

La courbe d'évolution de la densité sèche d'un compactage à sec en fonction du nombre de passe est la même à celle obtenue pour un compactage classique. Et cette variation s'exprime par la loi du logarithme suivante :

$$\gamma_d = A \log n + B$$

(Cissé, 1972), a effectué un ensemble d'essais de compactage à teneur en eau naturelle sur des planches d'essais d'un sable classer d'après le (L.C.P.C) en « sol B_1 », et les teneurs en eau sont respectivement 1 et 2 %. Les deux graphiques (figure II.8) et (figure II.9) présentent l'évolution de la densité sèche in situ en fonction du nombre de passe de l'engin de compactage.

L'auteur a constaté :

- *Teneur en eau de 1 %* : la densité sèche obtenue est pratiquement indépendante de l'énergie de compactage, le sable très sec ($\omega = 1\%$) se met en place tout seul, et le compactage a seulement pour effet de réduire la dispersion des valeurs.

En outre, les densités sont toujours supérieures au minimum exigé dans le cahier des prescriptions techniques (C.P.T) pour le corps de remblai.

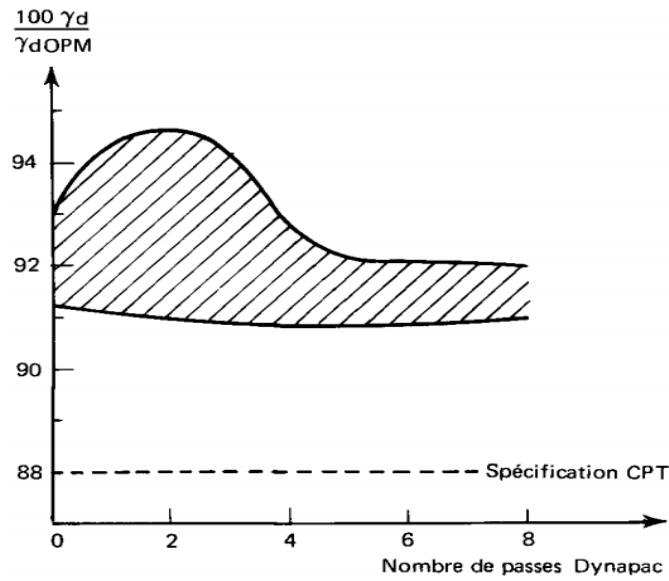


Figure II.8: Taux de compactage d'un sable en fonction de nombre de passe à $\omega = 1 \%$, (Cissé, 1972).

- Teneur en eau de 2 % : (vraisemblablement zone de foisonnement maximal) immédiatement derrière la niveleuse, les densités sont inférieures au minimum exigé par le (C.P.T).

Après deux passes de compacteur, la densité maximale est atteinte et reste pratiquement constante jusqu'à 8 passes. Dans cette plage, les valeurs obtenues sont supérieures au seuil du (C.P.T).

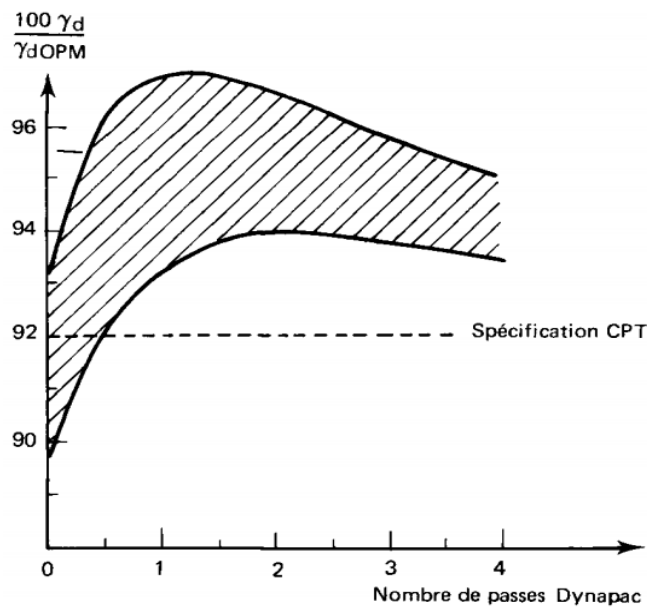


Figure II.9: Taux de compactage d'un sable en fonction de nombre de passe à $\omega = 2 \%$, (Cissé, 1972).

II.7.4 La nature des sols (ISTED-LCPC, 1987)

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 plastiques A_1 et A_2* : 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).
- *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 T_c et T_f* ;
- *Les sols C_1* .

II.8 MODALITÉS DE COMPACTAGE À FAIBLE TENEUR EN EAU (GMTR, 2001)

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).

II.8.1 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.

II.8.2 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 tuffacés T_c et T_f .

II.8.2.1 Les sols fins peu plastiques

Les sols fins peu plastiques A_1 et A_2 nécessitent une trituration préalable pour les plus plastiques A_2 . Les sols A_1 peuvent poser des problèmes de traficabilité. Le compactage à faible teneur en eau est plus facile avec les A_1 que les A_2 .

La mise en œuvre en remblai se fait avec des épaisseurs de 15 à 35 cm. Le compactage se fera par des engins compacteurs vibrants. Une finition est nécessaire au niveau de l'arase. Elle se fera par arrosage d'eau à raison de 5 à 10 l/m² et compactage au compacteur à pneu.

II.8.2.2 Les graves et sables propres

Les graves et les sables D_1 , D_2 , CD_1 , B_1 et B_3 :

- Les sables propres D_1 et B_1 peuvent poser des problèmes de traficabilité ;
- Les graves propres D_2 et CD_1 et B_3 conviennent bien au compactage à sec ;
- Les épaisseurs de mise en œuvre en remblai varient de 30 à 70 cm ;
- Le compactage se fera par des engins compacteurs vibrants.

Une finition avec un compacteur à pneu ou un compacteur vibrant léger est nécessaire au niveau de l'arase.

II.8.2.3 Les graves et sables peu argileux

Les graves et les sables peu argileux comme B_2 et B_4 à condition que leurs teneurs en eau naturelle doivent être inférieures à la teneur en eau critique $\omega_c = 4$ %. L'épaisseur de mise en œuvre varie de 20 à 40 cm. Les compacteurs à utiliser sont des engins compacteurs vibrants.

II.8.2.4 Les graves et sables très silteux

Les sols graves et les sables très silteux comme B_5 conviennent au compactage à sec. La teneur en eau naturelle doit être inférieur à $\omega_c = 3$ à 4 %.

Une finition au niveau de l'arase par arrosage à raison de 7 à 10 l/m² et compactage par un compacteur à pneu $P2$ est nécessaire. Les compacteurs à utiliser sont des vibrants.

II.8.2.5 Les graves et sables argileux

L'aptitude au compactage à sec des graves et sables argileux comme B_6 (avec $I_p < 25$) dépend de l'importance de la fraction graveleuse dans le matériau. La teneur en eau ne doit pas dépasser 3 à 5 %. La mise en œuvre se fait par couches de 15 à 30 cm.

En arase, ce matériau doit recevoir une finition semblable à celle d'un matériau B_5 .

II.8.2.6 Les sols grossiers

Les sols grossiers comme C_1 sauf les C_1A_2 et C_1B_6 avec $I_p > 25$ sont conseillés pour un compactage à sec et aussi plus la fraction graveleuse est importante, plus facile est le compactage. Un écrêtage des gros éléments est nécessaire pour la mise en œuvre et le compactage. Les teneurs en eau critiques dépendent de l'importance des fines en quantité et en activité. La mise en œuvre se fera par couches de 15 à 30 cm. Une finition en arase peut s'avérer utile éventuellement.

Les compacteurs à utiliser sont des vibrants.

II.8.2.7 Les sols tuffacés

Les tufs sont des sols calcaires. Ils peuvent se présenter sous forme de sols fins ou de sols graveleux à squelette plus ou moins indurés. Leur comportement dans le long terme et dans les conditions hydriques où ces sols sont rencontrés est nettement supérieur à celui que l'on pourrait prévoir par les seules caractéristiques habituelles d'identification.

L'élément prédominant qui caractérise ce comportement est le taux de la teneur en carbonate de calcium ($CaCO_3$). La classification se fera :

- Si $50 \% < CaCO_3 < 70 \%$: tuf faiblement carbonaté T_f ;
- Si $CaCO_3 > 70 \%$: tuf fortement carbonaté T_c .

II.9 MATÉRIAUX ET MISE EN ŒUVRE DU CORPS DE CHAUSSÉE

Différents articles publiés par différents auteurs (*Fumet, 1959 ; Fenzy, 1965 ; Inal, 1980 ; Boularek, 1989*); cité par (Morsli.M, 2002) qui présentent des matériaux et leurs mise en œuvre pour la construction d'un corps de chaussées dans un milieu aride.

II.9.1 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 répannage 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*. (Larabi, 1998)

II.9.2 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.9.3 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. (Domec., 1980). 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.9.4 Couche de roulement

II.9.4.1 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.9.4.2 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 ressuyages ne sont pas graves au Sahara à cause de l'apport continu de sable fin siliceux éolien en surface de chaussée.
- 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 tricouche 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.

II.9.4.3 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.9.4.4 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.10 CONTRÔLE DE COMPACTAGE À SEC

II.10.1 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 *EV2* et *EVI* 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 gammadensimètres à profondeur variable est possible avec les sols autres que *C₁*. 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 :

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

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.10.2 Spécifications

II.10.2.1 En remblai

- La densité moyenne sur toute l'épaisseur de la couche compactée doit atteindre $95 \% \gamma_d OPN$;
- La densité de la partie inférieure de la couche doit atteindre $93 \% \gamma_d OPN$.

II.10.2.2 Au niveau de la couche de forme ou des 40 cm supérieurs situés sous la chaussée

- La densité moyenne doit être supérieure à $95 \% \gamma_d OPM$ ou à $100 \% \gamma_d OPN$;
- La densité à la partie inférieure doit atteindre $93 \% \gamma_d OPM$ ou $98 \% \gamma_d OPN$.

II.11 CONCLUSION

Dans cette recherche bibliographique sur le compactage à sec des sols et matériaux granulaires, nous avons pu constater que la technique de compactage à sec ou à teneur en eau naturelle est adaptable aux conditions géomorphologiques et climatiques dans les zones arides et désertiques. Car, dans la plupart des cas, nous sommes obligés à utiliser des matériaux locaux tels qu'ils sont dans leur état naturel.

Cette technique a le double avantage d'assurer :

- L'économie sur les faits de transport de l'eau.
- L'épargne des ressources en eau des populations.

Chapitre III

ÉTUDE EXPÉRIMENTALE

Chapitre III ÉTUDE EXPÉRIMENTALE

III.1 INTRODUCTION

Le présent chapitre consacré à la caractérisation et à l'analyse de quelques matériaux qui peuvent être utilisés pour l'exécution des corps de chaussées sous un compactage à sec.

On présente et on interprète les résultats obtenus dans le cadre du programme expérimental réalisé. On tentera de parvenir à une compréhension du mécanisme mis en jeu lors du compactage à sec du sol.

Certains sols sont capables d'exhiber des densités sèches croissantes lorsqu'ils sont compactés à des teneurs en eau très faibles.

On veut confirmer dans ce travail l'existence d'un tel phénomène pour des sols choisis. On détermine et on tente d'expliquer les courbes Proctor complètes étendues aux faibles teneurs en eau.

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 :

- Granulométrie ;
- Sédimentométrie ;
- 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 Tagma, Benisaf et El Madigue après avoir analysé plusieurs 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

- Le 1^{er} échantillon provient d'une carrière qui se situe près du village de *Tagma* (à 12 km dans le sud-est de la commune d'*Ain fezza*).

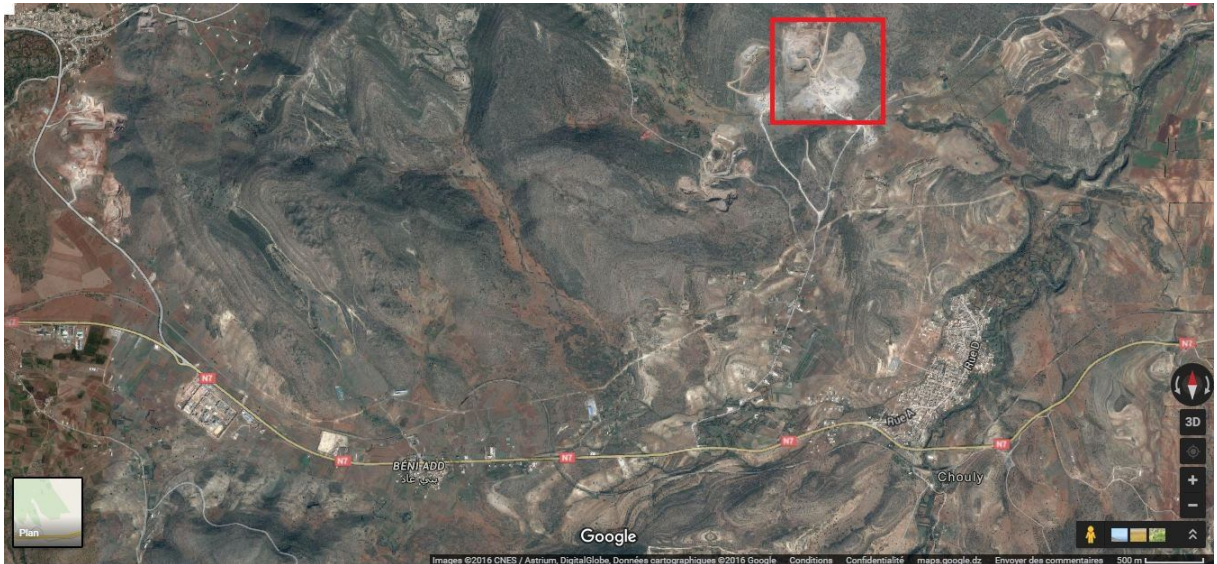


Photo III.1: L'endroit de l'extraction du premier échantillon.

- Le 2^{ème} échantillon provient d'un gisement et issu d'un déblai du projet de la réalisation d'une ligne ferroviaire (à 2 km de la cimenterie de la ville de *Béni Saf*).



Photo III.2 : L'endroit de l'extraction du deuxième échantillon.

- Le 3^{ème} échantillon provient d'un gisement qui se trouve près du village d'El Madigue (à 10 km de la daïra de Chetouane).



Photo III.3: L'endroit de l'extraction du troisième échantillon.

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 CaCO_3 .
- 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 présentent par deux phénomènes :

- Analyse granulométrique par tamisage à humide : pour les gains $> 0,08 \text{ mm}$;

- Analyse granulométrique par sédimentométrie : 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; 8 mm; 6,3 mm; 5 mm; 4 mm; 3,15 mm, 2,5 mm; 2 mm; 1,25 mm; 1 mm; 0,8 mm; 0,63 mm; 0,4 mm; 0,315 mm; 0,2 mm; 0,125 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 *1kg*.

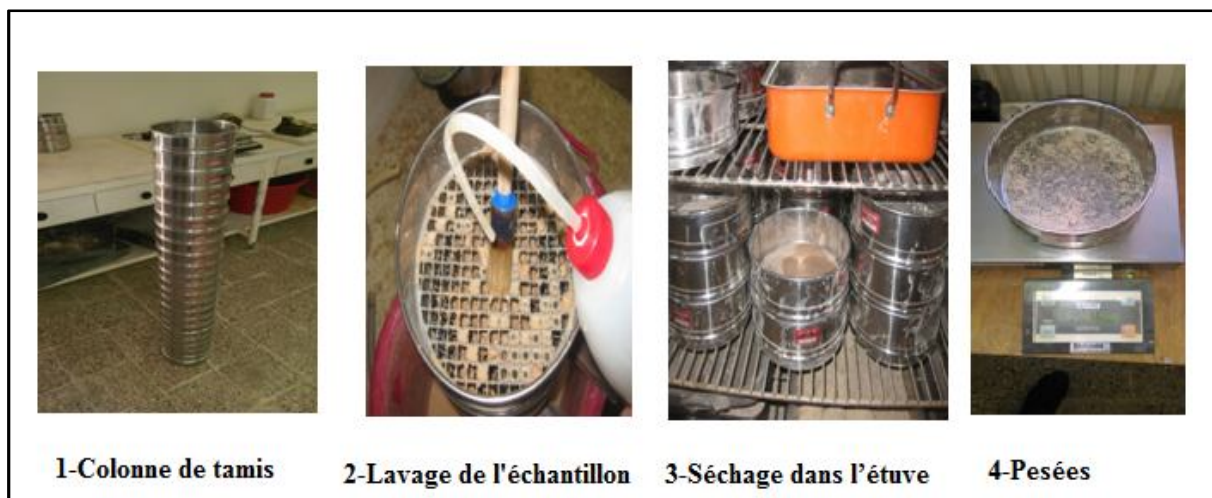


Photo III.4 : Étapes de réalisation de l'essai tamisage à voie humide.

III.6.1.1 Analyse sédimentométrique

L'analyse granulométrique par sédimentation a été réalisée pour déterminer la distribution pondérale de la taille des particules fines d'un sol ($\varnothing < 63 \mu\text{m}$). Elle est effectuée selon la norme ASTM . Les particules inférieures à $63 \mu\text{m}$ séparées du reste du sol par tamisage sont mises en suspension dans l'eau additionnée d'un défloculant. 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.

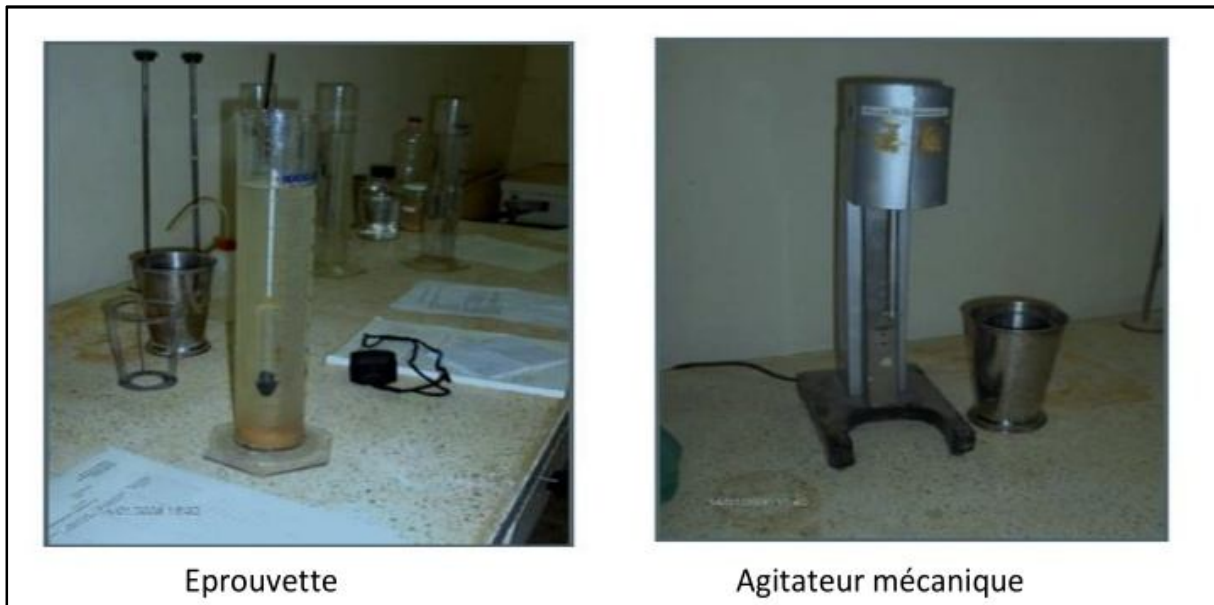


Photo III.5 : La technique de la sédimentométrie.

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 :



La teneur en $CaCO_3$ d'un sol fin est un bon indice de sa résistance mécanique et de sa sensibilité à l'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 %.

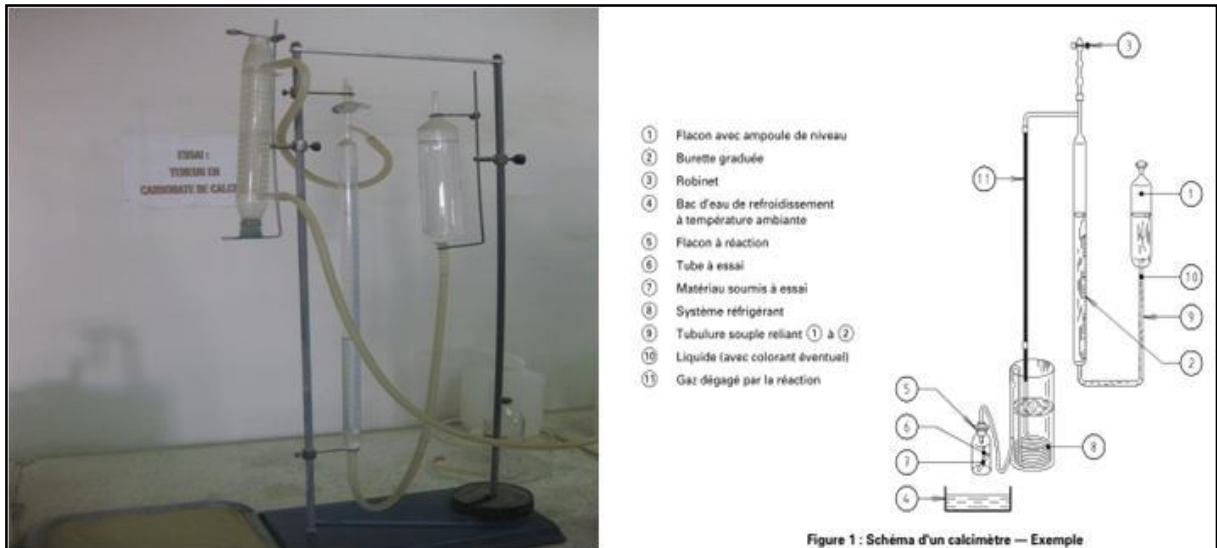


Photo III.6 : Calcimètre Dietrich-Fruhling

III.6.3 Les essais de compactages

III.6.3.1 Préparation des sols

Une quantité importante de l'ordre de 100 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 (0 %, 1 %, 2 %, 3 %, 4 %), 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 ;



Photo III.7 : Étapes de préparation des échantillons.

III.6.3.2 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/cm^3 ou en kg/m^3) l'essai est effectuée selon la norme *ASTM D 668*.

Concernant notre travail, Le compactage des échantillons des sols (tuf de *Tagma*, de *Beni saf* et de *El Madigue*) 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 différents teneurs en eau (0 %, 1 %, 2 %, 3 %, 4 %).

Les points obtenus de cette manière forment une courbe dans l'espace ($\gamma_d ; \omega$) 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, 15 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 ;
- Diamètre de la dame : 51 mm.



Photo III.8 : Étapes de réalisation de l'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.1: Résultats des essais en laboratoire du premier échantillon.

ASTM D422-63	Analyse granulométrique	Essai		Valeur	Norme d'essai
Tamisât cumulé (%)	diamètre des tamis (mm)				
98,36	16	Teneur en Eau naturelle	ω_n %	2.41 %	ASTM D2216-80
90,68	12,5				
81,02	10				
71,94	8				
63,66	6,3				
58,48	5				
50,88	4				
46,8	3,15				
42,32	2,5				
40,04	2				
32,58	1,25				
29,86	1				
29,83	0,8				
28,77	0,63				
26,67	0,4				
25,67	0,315				
24,57	0,2	Limite de liquidité	W_L %	27.08 %	ASTM D4318-00
22,64	0,125				
22,39	0,1				
21,74	0,08				
21,54	0,063				
13,47	0,037				
12,06	0,016				
11,5	0,0096				
11,44	0,0069				
11,32	0,0049				
11,31	0,0031				
11,30	0,0017				

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

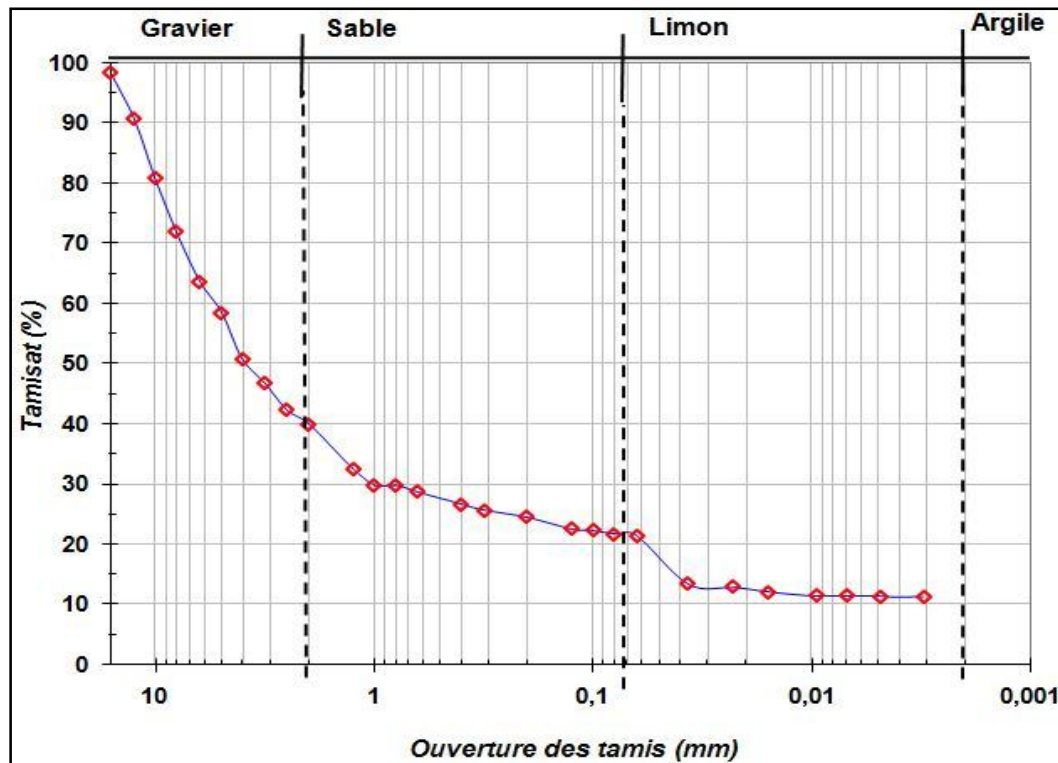


Figure III.1: Courbe Granulométrique du premier échantillon.

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

- Gravillons (58,32%) de diamètre 60 à 2 mm ;
- Sable (18,50%) de diamètre 2 à 0,06 mm ;
- Limon (5,57%) de diamètre 0,06 à 0,002mm ;
- Argile (16,32%) de diamètre < 0,002 mm.

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 *Tagma* est classé dans **B_{52m}** (sables et gravier très silteux).

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

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

ASTM D 422-63	Analyse granulométrique	Essai		Valeur	Norme d'essai
Tamisât cumulé (%)	diamètre des tamis (mm)				
92,98	10	Teneur en Eau naturelle	ω_n %	2,8 %	ASTM D 2216-80
87,9	8				
81,7	5				
77,35	3,15				
72,92	2				
69,54	1,25	Teneur en carbonate	CaCO ₃ %	88%	ASTM D 4373-84
66,42	1				
61,18	0,5				
48,66	0,2				
43,42	0,125				
41,12	0,1	Limite de liquidité	W _L %	41.75 %	ASTM D 4318-00
39,76	0,08				
36,58	0,063				
35,12	0,039				
31,93	0,025				
28,74	0,017	Indice de plasticité	I _p	20 ,98	ASTM D 4318-00
25,54	0,01				
20,75	0,007				
6,39	0,001				

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

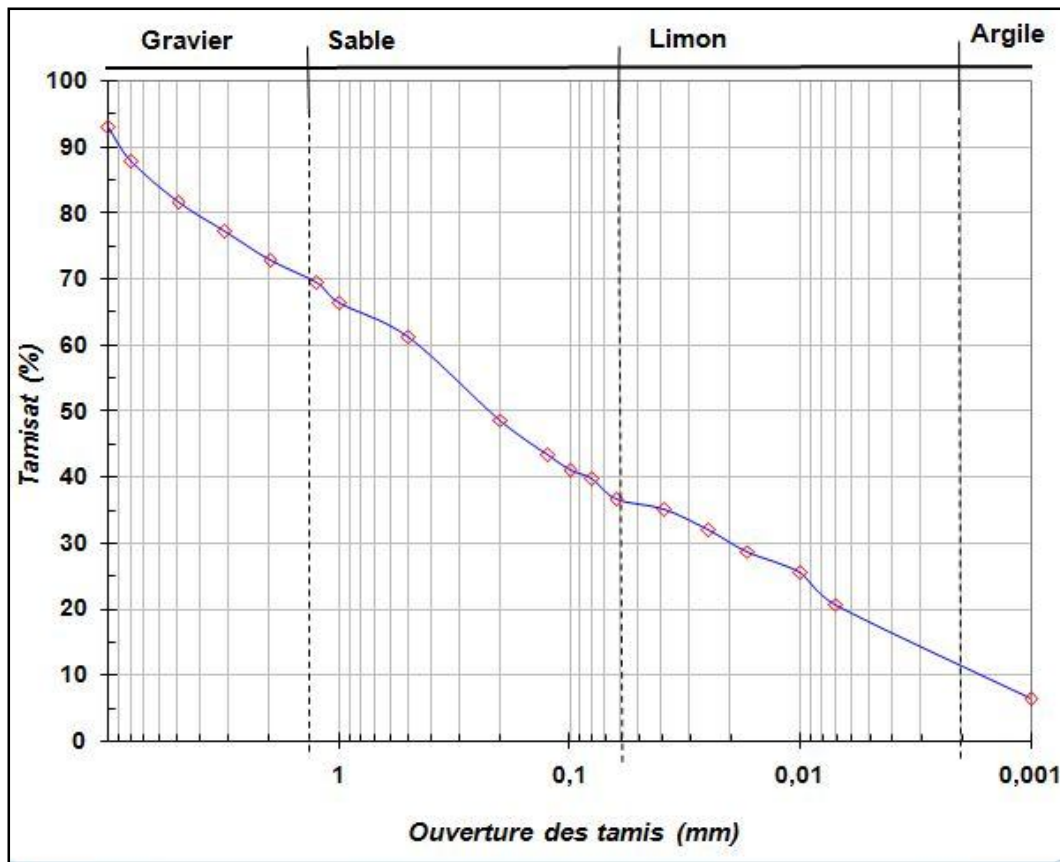


Figure III.2: Courbe Granulométrique du deuxième échantillon.

À partir de cette courbe (*figure III.2*), on remarque que cet échantillon est composé des éléments suivants :

- Gravillons (20,06%) de diamètre 60 à 2 mm ;
- Sable (36,36%) de diamètre 2 à 0,06 mm ;
- Limon (30,19%) de diamètre 0,06 à 0,002 mm ;
- Argile (6,39%) 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 *Béni saf* est classé dans **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.3: Résultats des essais en laboratoire pour le troisième échantillon.

ASTM D 422-63	Analyse granulométrique	Essai		Valeur	Norme d'essai
Tamisât cumulé (%)	diamètre des tamis (mm)				
97	10	Teneur en Eau naturelle	ω_n %	4.3 %	ASTM D2216-80
94,38	8				
92,24	6,3				
90,42	5				
87,96	4				
86,5	3,15				
84,18	2,5				
82,48	2				
79,94	1,25				
78,3	1				
78,28	0,8				
77,9	0,63				
76,24	0,4				
75,34	0,315				
73,02	0,2				
68,74	0,125				
67,78	0,1				
65,98	0,08				
63,1	0,063	Limite de liquidité	W_L %	45.95 %	ASTM D 4318-00
63	0,056				
61,1	0,04				
58,6	0,025				
53,5	0,018				
48,4	0,01				
43,3	0,007				
38,2	0,005				
33,1	0,003				
25,5	0,0015				

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

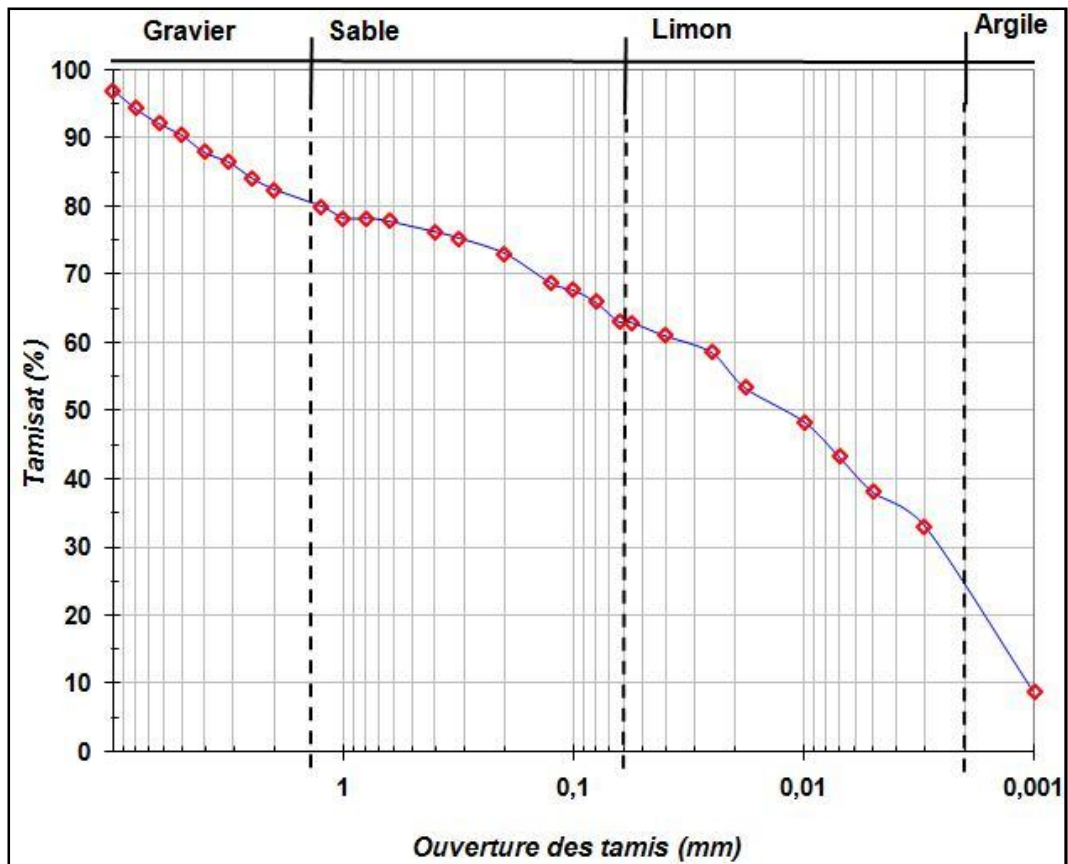


Figure III.3: Courbe Granulométrique du troisième échantillon.

À partir de cette courbe (*figure III.3*), on remarque que cet échantillon est composé des éléments suivants :

- Gravillons (14,52%) de diamètre 60 à 2 mm ;
- Sable (19,38%) de diamètre 2 à 0,06 mm ;
- Limon (37,6%) de diamètre 0,06 à 0,002mm ;
- Argile (25,5%) de diamètre < 0,002 mm.

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 *d'El Madigue* est classé dans **A_{2m}** (sables fins argileux limons, argiles et marnes peut plastique).

III.7.2 Essai Proctor

A fin d'étudier la variation de $\gamma_d = f(\omega)$ et de déterminer le ω_{OPN} 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.4) et (figure III.4) :

Tableau III.4: Résultats d'essai Proctor pour le premier échantillon

ESSAI PROCTOR							RETENU
γ_d (g/cm ³)	1,864	1,777	1,86	1,859	1,859	1,79	1,86
ω (%)	0,1775	1,151	2,22	2,405	2,905	3,45	2,30

Tableau III.5 : Les valeurs de la courbe de saturation pour l'échantillon 1

COURBE DE SATURATION						
ω (%)	0,1775	1,151	2,22	2,405	2,905	3,45
Sr (100%)	2,65	2,15	1,90	1,88	1,84	1,80
Sr (90%)	2,65	2,10	1,84	1,81	1,77	1,74

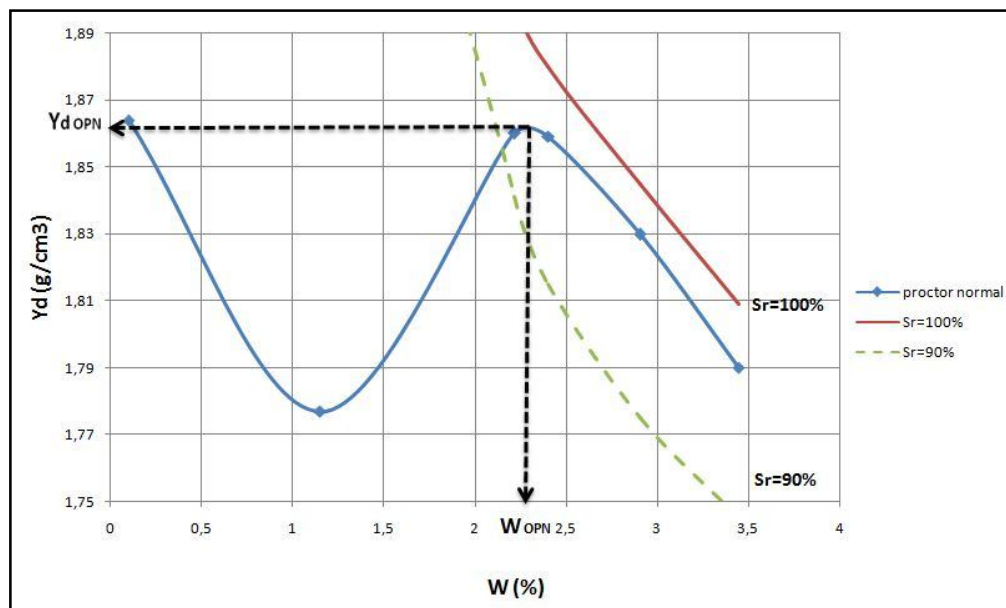


Figure III.4: Courbe Proctor du premier échantillon.

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

Tableau III.6: Résultats d'essai Proctor pour le deuxième échantillon.

ESSAI PROCTOR						RETENU
γ_d (g/cm ³)	1,59	1,31	1,67	1,46	1,35	1,67
ω (%)	0,009	1,045	2,565	3,18	3,49	2,57

Tableau III.7 : Les valeurs de la courbe de saturation pour l'échantillon 2

COURBE DE SATURATION					
ω (%)	0,009	1,045	2,565	3,18	3,49
Sr (100%)	2,65	2,25	1,75	1,55	1,49
Sr (90%)	2,65	2,07	1,57	1,42	1,37

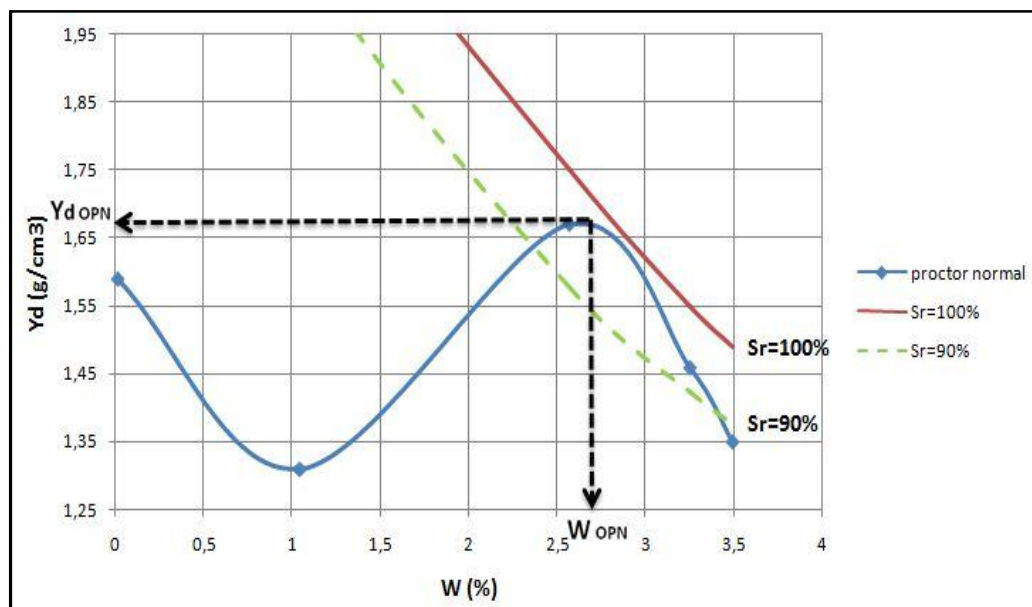


Figure III.5: Courbe Proctor du deuxième échantillon.

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

Tableau III.8: Résultats d'essai Proctor pour le troisième échantillon

ESSAI PROCTOR							RETENU
γ_d (g/cm ³)	1,6112	1,5784	1,5988	1,6315	1,632	1,586	1,635
ω (%)	0,127	1,465	2,495	3,15	3,90	5,65	3,50

Tableau III.9 : Les valeurs de la courbe de saturation pour l'échantillon 3

COURBE DE SATURATION						
ω (%)	0,127	1,465	2,495	3,15	3,90	5,65
Sr (100%)	2,65	2	1,78	1,70	1,64	1,59
Sr (90%)	2,65	1,80	1,67	1,63	1,60	1,65

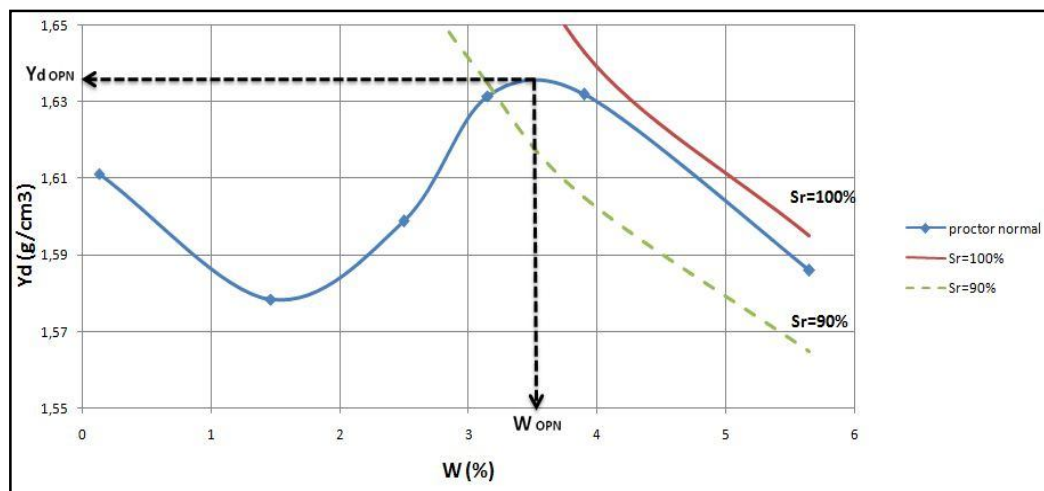


Figure III.6: Courbe Proctor du troisième échantillon.

III.8 INTERPRÉTATION

La détermination de la courbe Proctor normal complète des trois tufs, depuis une teneur en eau quasi nulle, jusqu'à des teneurs en eau importantes permet d'obtenir une courbe de forme différenciée.

On remarque que, la densité sèche diminue à partir d'une teneur en eau quasi nulle, jusqu'à une teneur en eau critique. À partir de cette teneur en eau la densité augmente jusqu'à une

teneur en eau optimale. Après, la densité sèche commence à diminuer lorsque la teneur en eau augmente (figure III.7)

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 2,22 % à 3,90 % avec une densité sèche γ_d qui varie aussi de 1,635 g/cm³ à 1,862 g/cm³. Le tableau suivant (tableau III.10) résume les valeurs de la teneur en eau et la densité sèche γ_d obtenue.

Tableau III.10: Récapitulation des essais Proctor pour les trois échantillons.

Échantillon	1	2	3
γ_d (g/cm ³)	1,86	1,67	1,63
ω (%)	2,22	2,56	3,9

On constate que la densité sèche γ_d du premier matériau **B_{52m}** est plus importante que celles du deuxième et du troisième, ce qui engendre par la suite que la portance du 1^{er} matériau est aussi très marquée par rapport aux autres matériaux.

On remarque que le ω_{OPN} des matériaux de classe **A_{2m}** (2^{ème} et 3^{ème} matériaux) est plus grand que celui du (1^{er} matériau) classé **B_{52m}**, ceci s'explique par l'enrichissement des matériaux de classe **A_{2m}** en fines. Ces derniers ont besoin de plus d'eau pour leur hydratation en engendrant un foisonnement du mélange.

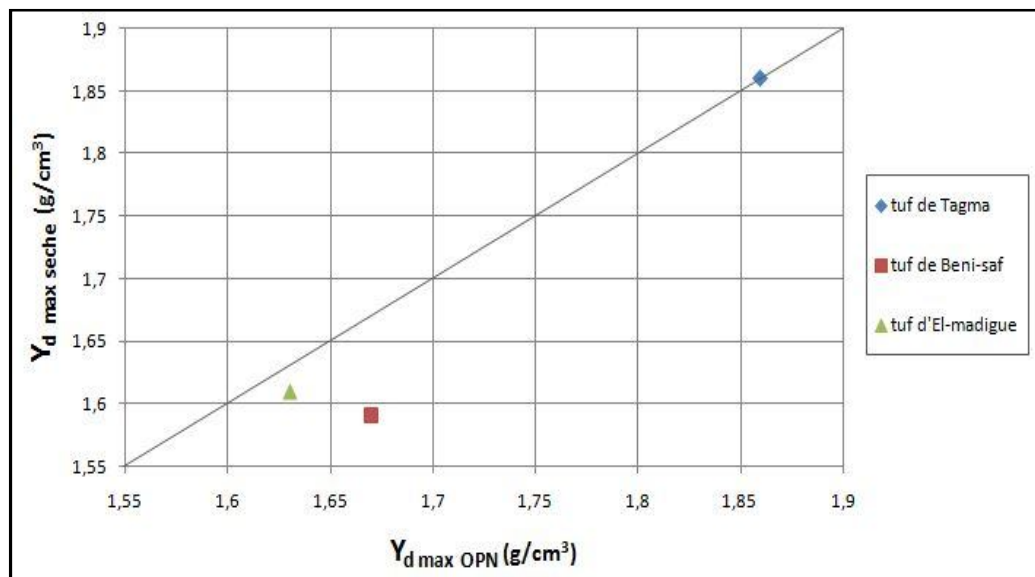


Figure III.7: La densité sèche maximale à sec en fonction de la densité sèche maximal à l'OPN.

La (figure III.7) représente la densité sèche maximale à une teneur en eau nulle des trois tufs en fonction de la densité sèche maximale à l'optimum Proctor normal. On remarque que pour le tuf de Beni-saf et El-madigue, la densité sèche à l'optimum Proctor normal est plus importante que la densité sèche maximale à la teneur en eau quasi nulle ce qui implique sa position au dessous de la droite médiane, par contre, le tuf de Tagma est situé sur la ligne médiane ce qui implique que les densités à sec et à OPN sont égales. En plus, on voit que les densités sèches maximales soit à sec ou à OPN de ce dernier sont très élevées par rapport aux deux autres tufs.

III.9 CONCLUSION

Dans ce chapitre nous avons effectué des différents essais d'identification et de caractérisation géotechniques (analyse granulométrique, analyse sédimentométrique, 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 (B_{52m} et A_{2m}) selon le GTR et la norme NF P 11-300.
- Les trois matériaux ont des différentes densités sèches maximales avec la même énergie Proctor normal.
- L'enrichissement des tufs de Beni-saf et d'El-madigue en particules fines. Ces derniers ont besoin de plus d'eau pour leur hydratation en engendrant un foisonnement du mélange.
- Finalement, on peut retenir que le tuf de Tagma, compacté à sec, présente des caractéristiques de compactage meilleures que les deux autres matériaux.

CONCLUSION GÉNÉRALE

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 ne fait aucun doute que la technique de compactage du sol à sec, fournit un avantage capital pour la réalisation des infrastructures routières dans les zones arides. Malheureusement ces expériences qui ont été menées à l'occasion de la réalisation de la transsaharienne n'ont pas été poursuivies pour trancher la question de la faisabilité pratique de la technique. On rappelle que la contribution réalisée dans ce travail s'est assigné 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.
- Faire ressortir 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.

Pour réaliser ces objectifs un programme expérimental a été dimensionné et réalisé dans sa majorité au laboratoire. Ce programme expérimental a consisté en une série de compactage de trois matériaux granulaires à l'aide de l'essai Proctor Normal.

Par l'observation des profils de densité du sol compacté à différentes teneurs en eau, on a montré que l'augmentation de la teneur en eau jusqu'à l'OPN améliore le rendement du compactage (densité sèche). Ce résultat est en relation avec la résistance plus importante que le sol oppose au compactage. Cette résistance diminue sous l'effet la teneur en eau.

Dans cette étude on a synthétisé et examiné cette technique au niveau de laboratoire sur un sol choisi. Ce travail doit être complété par un plan volumineux au laboratoire pour tester l'expansion de cette technique sur des matériaux sahariens réels provenant du sud. Un travail sur le terrain devra être engagé pour tester et déceler les difficultés que pose cette technique sur site. Le travail de terrain considérera la réalisation de planches expérimentales dans une zone aride.

RÉFÉRENCES
BIBLIOGRAPHIQUES

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Aquié. (1973). Théorie générale de l'influence de la teneur en eau sur les résultats du compactage. Bulletin, LCPC.
- ASTM. (2004). American Society for Testing and Materials, Volume 04.09 Soil and Rock.
- Biarez. (1974). La pratique du compactage. (France).
- Boutonnier. (2007). Comportement hydromécanique des sols fins proches de la saturation cas des ouvrages en terre: coefficient B, déformations instantanées et différées, retrait / gonflement. Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Grenoble, France.
- Caamapum De Carvalho J., C. J. (1987). La reconstitution des éprouvettes en laboratoire : Théorie et pratique opératoire. LPC.
- Cissé, A. (1972). Le compactage à sec : Mythe ou réalité ?
- Cui, D. (2000). Sols non saturés : applications au calcul des ouvrages.
- Djedid.A, B. (1998). Introduction à la mécanique des sol 1. Université de Tlemcen, Algérie.
- Drnevich.V, E. (2007). A Study of Effective Soil Compaction Control of Granular Soils. West Lafayette: Purdue University.
- ELLIS.C.I. (1980, june 1-7). Soil compaction at low moisture content - field trials in Sudan. pp. 331-340.
- FENZY.E. (1966). Particularité de la technique routière au Sahara. Revue générale des routes et aérodromes.
- GMTR. (2001). Guide Marocain pour les Terrassements Routiers. Maroc.
- Guilbault, P. (2007). Compactage et décompactage (Vol. 6). France: Chambre d'agriculture de Gironde.
- Hafidi.F.Z, G. (2013). Compactage des barrages en remnlais. Université Abou bekr belkaid, Tlemcen.
- Hassaine, D. R. (1990). Contribution à l'étude du compactage au laboratoire. Tlemcen, Algérie. Univerversité Abou bekr belkaid.

- Holtz.R.D, K. (1999). Introduction à la géotechnique. (E. P. Montérial).
- ISTED-LCPC. (1987). Le savoir-faire français en matière de compactage à faible teneur en eau des sols et matériaux des terrassements et chaussées.
- Lambe. (1958). The structure of compacted clay.
- Larabi. (1998, février 26-28). Comportement des assises en matériaux granulaires en zones désertiques.
- Mesbah.A, M. J. (1999). Comportement des sols fins argileux pendant un essai de compactage statique: détermination des paramètres pertinents (École Nationale des Travaux Publics de l'État). 69518 Vaulx en Velin cedex, France.: Laboratoire Géo Matériaux, Département Génie Civil et Bâtiments.
- MOREL.G, A. (1988). Le compacage. Eyrolles.
- Morsli.M, K. (2002). Conception et Réalisation des Chaussées en Milieu Désertique (Design and Realization of Pavements in Desert Environment). Nancy.
- NAGARAJ, A. S. (2005). Plastic limit and compaction characteristics of fine grained soils. (I. I. Science, Éd.) Department of Civil Engineering, Bangalore,India.
- Paige-green, P. (2009). The use of natural resources for sustainable roads. General science, engineering & technology.
- Proctor. (1933). Fundamental Principles of Soil Compaction. Engineering NewsRecord.
- Sarsby, R. W. (2013). Environmental Geotechnics (éd. 2).
- SHAHIN, A. (2010). Investigation of the Variability in the Results of the NZ Vibrating Hammer Compaction Test. University of Auckland.
- Tliba. (1994). Séminaire Nationale de la technique routière saharienne. Ministère de l'Équipement, Beni abès.
- Zhong-Sen, L. (2015). Études des propriétés hydromécaniques des sols argileux non saturés proches de la saturation. Tèse de doctorat, Paris.