

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



Université de Ghardaïa

N° d'ordre :
N° de série :

Faculté des Sciences et Technologies
Département hydraulique et génie civil

Mémoire présenté en vue de l'obtention du diplôme de

MASTER

Domaine : *Sciences et Technologies*

Filière : Génie Civil

Spécialité : *Structurer*

Par : GHAZALI Mohammed

Thème

Etude de comportement mécanique d'un matériau compacté à faible teneur en eau en vue de son utilisation dans le terrassement routier

Soutenu publiquement le 27/10/2020

Devant le jury :

Mr : SALHI Aimad	M.A.A	Ghardaïa	Président
Mr : DAHEUR El Hadj Guesmia	M.C.B	Ghardaïa	Examineur
Mr : AMIEUR Abdenacer	Dr Technique	L.T.P.Sud	Encadreur

Année universitaire 2019/2020

Remerciements

Avant tout, nous remercions dieu le tout puissant qui nous a donnés le courage, la volonté, la patience et la santé durant toutes ces années d'étude et que grâce à lui ce travail a pu être réalisé.

Nous tenons à exprimer mes remerciements et mes gratitude à mon encadreur Monsieur Amieur Abdenacer et membres du jury.

Je tiens à remercier vivement mon maitre de stage, Mr Chikh Boudiaf, dans l'entreprise LTPS, pour son accueil, le temps passé ensemble et le partage de son expertise au quotidien.

Je remercie également toute l'équipe LTPS pour leur accueil, leur esprit d'équipe et en particulier Mr Miloud, qui m'a beaucoup aidé à comprendre toute l'essai.

Un grand remerciement aussi au département sciences de la technologie de l'université Ghardaïa et à tous ses enseignants.

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail :

- Aux êtres les plus chers à mon cœur, ma mère et mon père, qui m'ont beaucoup soutenu durant mon cursus d'étude et à qui je serai éternellement reconnaissant ;

- A mes chères sœurs.

- A mes frères.

*- A mon encadreur **Amieur Abdenacer** pour son amabilité et sa disponibilité.*

- A tous les enseignants qui m'ont aidé de près ou de loin à obtenir mon master en génie civil.

*- A tous mes amis surtout mon ami **Belbali Abdelkader***

- La promotion de master 2 génie civil

2019 et 2020.

- Enfin à tous ceux et celles qui m'ont encouragé et soutenu.

MOHAMMED GHAZALI

Résume

Le présent travail rentre dans le cadre des études d'optimisation des sources notamment les réserves en eau, elle concerne l'étude de compactage des matériaux à faibles teneurs en eau.

Cette étude a été élaborée selon une approche expérimentale qui consiste à compacter deux matériaux des faibles teneurs en eau avec augmentation de l'énergie de compactage et de déterminer dans ces conditions quelques caractéristiques des matériaux et les comparer aux caractéristiques optimales de ce matériau.

Les résultats obtenus ont montré qu'il est possible d'atteindre des bonnes performances en compactant le matériau à faibles teneurs en eau si on respecte les autres paramètres liés au compactage.

Mots clés: compactage, faible teneurs en eau, étude expérimentale, caractéristiques matériaux, optimales.

Abstract

The present work falls within the framework of optimization studies of sources including water reserves, it concerns the study of compaction of materials with low water contents.

This study was developed according to an experimental approach which consists in compacting two materials of low water contents with increased compaction energy and in these conditions to determine some characteristics of the materials and compare them with the optimal characteristics of this material.

The results obtained showed that it is possible to achieve good performance by compacting the material with low water contents if the other parameters related to compaction are respected.

Key words: compaction, low water content, study experimental, characteristics materials, optimal.

ملخص

يندرج العمل الحالي في إطار دراسات التحسين للمصادر بما في ذلك احتياطات المياه ، ويتعلق بدراسة ضغط المواد ذات المحتوى المائي المنخفض.

تم تطوير هذه الدراسة وفق منهج تجريبي يتمثل في ضغط مادتين ذات محتوى مائي منخفض مع زيادة طاقة الضغط وفي هذه الظروف لتحديد بعض خصائص المواد ومقارنتها بالخصائص المثلى لهذه المادة.

أظهرت النتائج التي تم الحصول عليها أنه من الممكن تحقيق أداء جيد عن طريق ضغط المادة بمحتويات منخفضة من الماء إذا تم مراعاة المعايير الأخرى المتعلقة بالدمج.

الكلمات المفتاحية: ضغط ، محتوى مائي منخفض ، دراسة ، تجريبي ، خصائص المواد ، الأمثل .

Sommaire	
Remerciement	I
Dédicace	II
Résumé	III
Sommaire	IV
Liste des Figures	VII
Liste des tableaux	IX
Liste des photos	X
Liste des symboles et des abréviations	XI
INTRODUCTION GENERALE.	1
CHAPITRE I : Généralités sur le compactage.	
I.1. Introduction.	3
I .2. Définition de compactage.	3
I .3-Objectifs du compactage.	4
I .4 Les caractéristiques améliorées par le compactage.	5
I .5 La méthode de compactage.	5
I .5 .1 Compactage de surface.	6
I .5.2 Compactage dynamique.	7
I .6 Matériel et procédés spéciaux de compactage.	7
I .6.1 Procédés courants de compactage.	7
I .6.2. Procédés spéciaux de compactage.	8
I .7. classification des sols en vue du compactage.	9
I.7.1 Groupe I : Enrochements.	9
I.7.2 Groupe II : sables et graviers.	9
I.7.3 Groupe III: limons, sols siliceux.	10
I.7.4 Groupe IV : Argiles.	10
I .8. Théorie de compactage.	10
I .9 . Condition de compactage.	11
I .10 Paramètre de compactage.	12
I .10. Conclusion.	12
CHAPITRE II : Les paramètres ayant influence sur le compactage.	
II.1. Introduction.	14
II.1.1. Influence de la teneur en eau	14
II.1.2. Influence L'énergie de compactage.	16
II.1.3. Influence de la granulométrie.	16
II.1.4. influence de la nature du sol.	17
II.1.5. Influence de type de sol.	18
II .1.6. Influence de la méthode de compactage.	19
II .2. Influence du mode compactage sur les caractéristiques mécaniques	21
II.3. Conclusion	25
CHAPITRE III : Le contrôle de compactage.	
III .1. Introduction.	27
III .2. Les essais de laboratoire.	27
III .2 .1. Compactage par essai Proctor.	28
III .2.1.1. La correction de la teneur en pierre.	28
III .2.1.2. La correction de la teneur en eau optimale.	30
III .2.2.Compactage par impact.	31
III .2.3. Compactage statique.	32

III .2.4. Compactage par pétrissage.	33
III .2.5. Compactage par vibration.	33
III .2.5.1. Compactage à la table vibrante.	34
III .3. Les essais in situ.	35
III .3.1. La planche d'essai	35
III .3.2. Rôle de la planche d'essai.	36
III .3.3. Dimensions de la planche d'essai.	36
III .3.4. Mesures concernant l'efficacité d'un compacteur.	37
III.3. Conclusion.	38
Introduction à la partie expérimentale	
1. Préambule.	40
2. Méthodologie adoptée.	40
3. Programme de l'étude expérimentale.	40
CHAPITRE IV : Présentation des matériaux utilisés	
IV.1. Introduction	43
IV.2. Présentation des matériaux	43
IV.3. Caractérisation des matériaux	43
IV.3.1. Analyse granulométrique	43
IV.3.1.1. But de l'essai	44
IV.3.1.2 Analyse granulométrique par tamisage (voie sèche)	44
IV .3.2 Qualité des fines	47
IV.3.2.1. Les Limites d'Atterberg :(NF P 94-051)	47
IV.3.2.2. L'équivalence de sable	49
IV .3.2.3. Essai au bleu de Méthane	50
IV .3.2.4. Analyses chimiques	51
IV .4. Conclusion	52
CHAPITRE V : Etude au laboratoire de compactage à faible teneur en eau.	
V .1 .Introduction.	54
V .2 . Présentation d'essai utilisé	54
V .2 .1 . Essai Proctor	54
V .2 .1 .1. But de l'essai	54
V .2 .1 .2. Principe de l'essai	54
V .2 .1 .3. Mode opératoire	55
V .2 .2 . Essai CBR	56
V .2 .2 .1. But de l'essai	56
V .2 .2 .2. Matériel utilisés	56
V .2 .2 .3. Principe de l'essai	57
V .3. présentation des résultats	58
V .3.1. Influence de la teneur en eau sur la densité.	58
V .3.1.1. compactage selon le protocole de l'essai Proctor modifié (56coups).	58
V .3.1.2 . Compactage en changeant l'énergie de compactage augmenté	60
V.3.2. Etude d'évolution de la densité sèche en fonction de l'énergie de compactage	63
V .3.3. Influence de la teneur en eau sur l'indice Portant (CBR)	66

V .3.3.1.compactage selon le Protocole modifié de l'essai Proctor modifié (56coups)	66
V .3 .3.2. compactage en chateau l'énergie de compactage augmenté	68
V .3.4. Etude Influence de l'Index CBR en fonction de l'énergie de compactage	72
V.4. Conclusion	76
Conclusion Générale	78
Bibliographie	81

Liste des Figures	
Figure I.1: Types de compactage de surface [18].	6
Figure I.2 : Courbe de compactage	9
Figure II.1 : Courbe typique du compactage d'un sol cohérent [9]	15
Figure II.2: Courbe typique du compactage d'un sol grenu. [9]	15
Figure II.3: L'influence de l'énergie de compactage [10].	16
Figure II.4: Influence de la nature du sol sur le compactage [10].	17
Figure II.5 : Influence de la nature du sol sur la courbe Proctor.	18
Figure II.6: L'influence de type de sol sur le compactage [12].	19
Figure II.7: Influence de la méthode de compactage, d'après [20]	20
Figure II.8: Résistance en fonction de la profondeur dans un moule Proctor [15]	21
Figure II.9 : Influence du mode de compactage sur le déviateur de contraintes SEED et CHAN ,1959	22
Figure.II.10 : Influence de la méthode de compactage sur le retrait axial du limon d'Orly Bouche ,1967	23
Figure II.11: Influence du mode de compactage d'une argile limoneuse sur la perméabilité Michel et Al. ,1965	23
Figure II.12 : Influence de la méthode de compactage sur la résistance à la compression simple de la marne de Layrac	24
Figure II.13 : Influence de la méthode de compactage sur la résistance relative de différents sols Seed et Chan ,1959	25
Figure III.1: Résistance en fonction de la profondeur dans un moule Proctor [15].	36
Figure III.2: Compactage par un rouleau vibrant [15].	37
Figure III.3: Essais de compactage in-situ sur une planche d'essai [16].	38
Figure IV.1 : Courbe granulométrique pour mat (1) échantillon (1)	44
Figure IV .2 : Courbe granulométrique pour mat (1) échantillon (2)	45
Figure IV .3 : Courbe granulométrique pour matériau (2) échantillon (1)	45
Figure IV.4 : Courbe granulométrique pour matériau (2) échantillon (2)	46
Figure IV.5 : diagramme de Casagrande pour matériau (1)	48
Figure IV .6 : diagramme de Casagrande pour matériau (2)	48
Figure V.1: courbe Proctor Modifie 56 coups avec les (2%,4%, 6%,8%,10%) d'eau Pour Mat(1)	58
Figure 2: courbe Proctor Modifie 56 coups avec les (2%,4%, 6%,8%,10%) d'eau Pour Mat (2)	59
Figure V.3: courbe Proctor Modifie 60 coups avec les (1%,2%, 4%) d'eau Pour Mat (1)	60
Figure V.4: courbe Proctor Modifie 60 coups avec les (1%,2%, 4%) d'eau Pour Mat (2)	61
Figure V.5: courbe Proctor Modifie 70 coups avec les (1%,2%, 4%) d'eau Pour Mat (1)	62
Figure V. 6: courbe Proctor Modifie 70 coups avec les (1%,2%, 4%) d'eau Pour Mat (2)	62
Figure V.7 : comparaison la Proctor normal et Proctor pour (60,70) coupe et (2%,4%) d'eau avec Densité pour Mat (1)	65
Figure V.8 : comparaison la Proctor normal et Proctor pour (60,70) coupe et (2%,4%) d'eau avec Densité pour Mat (2)	65
Figure V.9 : courbe CBR IPI pour 56 coups Mat (1) échantillon (1)	66

Figure.V.10 : courbe CBR IPI pour 56 coups Mat (1) échantillon (2)	67
Figure.V.11 : courbe CBR IPI pour 56 coups Mat (2) échantillon (1)	67
Figure.V.12 : courbe CBR IPI pour 56 coups Mat (2) échantillon (2)	68
Figure.V.13 : courbe CBR IPI pour 60 coups Mat (1) échantillon (1)	68
Figure.V.14 : courbe CBR IPI pour 60 coups Mat (1) échantillon(2)	69
Figure. V.15 : courbe CBR IPI pour 60 coups Mat (2) échantillon(1)	69
Figure.V.16 : courbe CBR IPI pour 60 coups Mat (2) échantillon(2)	70
Figure.V.17 : courbe CBR IPI pour 70 coups Mat (1) échantillon (1)	70
Figure.V.18 : courbe CBR IPI pour pour70 coups Mat (1) échantillon(2)	71
Figure.V.19 : courbe CBR IPI pour pour70 coups Mat (2) échantillon (1)	71
Figure.V.20 : courbe CBR IPI pour pour70 coups Mat (2) échantillon (2)	72
Figure.V.21 : index CBR pour Mat (1)	75
Figure.V.22 : index CBR pour Mat (2)	75

Liste des tableaux	
Tableau III.1: Essai Proctor Normal et Modifié selon la norme ASTM D 1557.	32
Tableau IV.1 : Résultante d'essai granulométrique	44
Tableau IV.2 : Valeurs de Limites d'Atterberg du mat (1) et mat (2)	47
Tableau IV.3 : Classification suivant IP	47
Tableau IV. 4 : Résultat d'équivalent de sable pour les deux matériaux	50
Tableau IV .5 : Quelques valeurs indicatrices du VBS (Classification des sol d'après philipponnat 1997)	51
Tableau IV.6: Résultat de VBS pour les deux matériaux	51
Tableau IV.7 : Résultante d'Analyse chimique	51
Tableau V.1 : Résultats des mesures pour Mat (1) avec 56 coups	58
Tableau V. 2 : Résultats des mesures pour Mat (2) avec 56 coups	59
Tableau V. 3 : Résultats des mesures pour Mat(1) avec 60 coups	60
Tableau V. 4 : Résultats des mesures pour Mat(2) avec 60 coups	61
Tableau V.5 : Résultats des mesures pour Mat(1) avec 70 coups	62
Tableau V .6 : Résultats des mesures pour Mat (2) avec 70 coups	63
Tableau V.7 : l'évolution de la densité en fonction de l'énergie de compactage pour Mat (1)	63
Tableau V.8 : l'évolution de la densité en fonction de l'énergie de compactage Mat (2)	64
Tableau V .9 : valeur index CBR Mat (1) échantillon (1) pour 56 coups	66
Tableau V.10: valeur index CBR Mat (1) échantillon (2) pour 56 coups	67
Tableau V.11 : valeur index CBR Mat(2) échantillon (1) pour 56 coups	67
Tableau V .12 : valeur index CBR Mat(2) échantillon (2) pour 56 coups	68
Tableau V.13 : valeur index CBR Mat (1) échantillon (1) pour 60 coups	69
Tableau V .14 : valeur index CBR Mat (1) échantillon (2) pour 60 coups	69
Tableau V .15 : valeur index CBR Mat (2) échantillon(1) pour 60 coups	70
Tableau V.16 : valeur index CBR Mat (2) échantillon(2) pour 60 coups	70
Tableau V .17 : valeur index CBR Mat (1) échantillon(1) pour 70 coups	71
Tableau V .18 : valeur index CBR Mat (1) échantillon(2) pour 70 coups	71
Tableau V .19 : valeur index CBR Mat (2) échantillon (1) pour 70 coups	72
Tableau V .20 : valeur index CBR Mat (2) échantillon (2) pour 70 coups	72
Tableau V.21 : l'évolution de la densité en fonction de l'énergie de compactage pour Mat (1)	73
Tableau V.22 : l'évolution de la densité en fonction de l'énergie de compactage pour Mat (2)	74

Liste des photos	
Photo I.1 : Chantier d'un compactage dynamique profond [19].	7
Photo III.1 : Matériel pour essai de compactage Proctor	31
Photo III.2 : deux types de compactage.	33
Photo IV.1 : tamis	46
Photo IV. 2 : Siphonage d'échantillon de sol	46
Photo IV .3 : Appareil de Casagrande	47
Photo IV .4 : Mode opératoire de l'essai d'équivalent de sable	49
Photo V.1 : Matériel nécessaire de Proctor Modifié	54
Photo V.2 : Bacs d'homogénéisation pour Préparation du matériau	55
Photo V. 3 : Dame Proctor Electrique	55
Photo V. 4 : presse CBR	56
Photo V.5 : échantillon qui don presse CBR	56
Photo V. 6 : préparé échantillon avons passé de presser CBR	57
Photo V.7 : les échantillons qui après passent de presse CBR	58

Liste des symboles et des abréviations

liste des symboles	
IPI	L'indice portant immédiat
OPM	Optimum Proctor Modifié
ω OPM	Teneur en eau à l'Optimum Proctor Modifié
γ_d	Densité sèche
γ_d opm	Densité sèche à l'Optimum Proctor Modifié
ω	la teneur en eau
Cc	Coefficient de courbure
Cu	coefficient d'uniformité
CaCO ₃	Teneur en carbonates
SO ₃ ²	Teneur de sulfates
WL	Limite de liquidité
WP	Limite de plasticité
I _p	Indice de plasticité
CBR	Indice de Portance Californien (California Bearing Ratio)
d ₆₀	Diamètre à 60 % passant
d ₃₀	Diamètre à 30 % passant
d ₁₀	Diamètre à 10 % passant
DC	Degré de compacité
ρ_d max	masse volumique sèche maximal
ρ_w	masse volumique de l'eau
G _s pierre	densité de la pierre
PL	teneur en pierre en laboratoire
P _c	teneur en pierre sur le chantier.
I _d	indice de densité relative
ρ_d max	masse volumique sèche maximale
ρ_d chantier	masse volumique sèche sur le chantier
ρ_d min	masse volumique sèche minimale
e	indice des vides associé à ρ_d
G _s	densité du sol
ρ_w	Masse volumique de l'eau
ρ_d	Masse volumique du sol sec
e max	indice des vides maximal associé à ρ_d min
e chantier	indice des vides sur le chantier
e min	indice des vides minimal associé à ρ_d max
p	Teneur en pierre
liste des abréviations	
CPS	cahiers des prescriptions spéciales
AASHTO	American Association of State Highway and Transportation Officials
GTR	Guide des Terrassements Routier
BSI	British Standards Institution

INTRODUCTION GÉNÉRALE

En Algérie, vu le manque flagrant dans les autres moyennes de transport, le réseau routier demeure le nerf principal de l'économie nationale, en particulier dans les régions de sud. Durant ces dernières années, le développement des infrastructures routières a engendré un besoin énorme en matériau de construction et en eau.

Le compactage des matériaux dans les projets routiers représente un souci pour les différents opérateurs concernés par la construction routière (maîtres d'ouvrage, entreprises de réalisation et organismes de contrôle) vu l'importance de cette technique pour la stabilisation des matériaux et l'amélioration des caractéristiques mécaniques et hydrauliques de différents ouvrages. Les techniques adoptées sont très variées et différents selon le lieu d'utilisation (in situ ou au laboratoire), le type de compactage, et le but recherché.

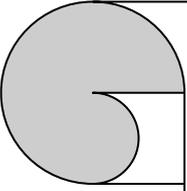
Le compactage des matériaux est influencé par plusieurs paramètres, certains sont liés au matériaux même et d'autres dépendent des facteurs externes tels que l'énergie de compactage, et la quantité d'eau, ce dernier représente un facteur déterminant pour atteindre des bonnes qualités de compactage, l'importance de ce facteur nous conduit à s'élever le problème de rareté des eaux dans certaines régions notamment dans grand sud, c'est dans ce cadre que plusieurs études de recherche ont abordé le sujet de compactage à sec ou plus précisément le compactage à faibles teneurs en eau, notre mémoire de fin d'étude rentre dans ce contexte, on cherche à déterminer certaines caractéristiques de matériau compacté à faibles teneurs en eau et les comparer à ceux obtenues lors d'un compactage en utilisant la quantité optimale d'eau.

Le présent travail fait partie d'un projet de recherche élaboré par du laboratoire **LTPS** et qui concerne la thématique des sols compactés A faible teneur en eau.

Ce mémoire d'études constitue une étude expérimentale qui consiste à sélectionner deux matériaux différents de la Wilaya d'Illizi au sud de l'Algérie et de mener une étude sur l'effet de compactage à faibles teneur en eau sur les caractéristiques mécaniques de ces matériaux.

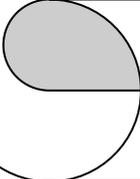
Ainsi ce mémoire est organisé en deux parties. Une partie bibliographique en trois chapitres, et une partie expérimentale rédigée en deux chapitres. Dans la partie bibliographique, et après une introduction générale, une généralité sur le compactage seront traitées dans le premier chapitre. Dans le deuxième chapitre, étude le différent type d'influence sur le compactage. Dans le chapitre trois commence par l'introduction des essais in situ et les essais au laboratoire. Une étude expérimentale en deux chapitres, le quatrième chapitre à travers différents essais. Il s'agit de l'essai analyse granulométrique, l'essai de limite d'Atterberg, l'essai VB (valeur du bleu). Le chapitre cinq basée sur l'étude de compactage des matériaux à différente teneur en eau et en changeant l'énergie de compactage.

Enfin, une conclusion générale sur les principaux résultats obtenus sera donnée.



Chapitre I:

Généralités sur le compactage



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 répondant à certaines caractéristiques ou exigences techniques et technologiques des constructions.

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 :

C'est l'ensemble des opérations mécaniques qui conduisent à accroître la densité en place d'un sol. Il augmente la compacité du sol, donc réduit ses possibilités de déformation et améliore sa capacité portante. Il agit en réduisant presque instantanément le volume du sol, essentiellement par réduction de volume des vides remplis d'air

Le compactage est gouverné par quatre facteurs :

- Le poids volumique sec du sol.
- La teneur en eau du sol.
- L'énergie de compactage.

Le compactage est l'ensemble des opérations mécaniques (apport d'énergie mécanique), qui conduisent à accroître la densité d'un sol. En faisant, la texture du sol est resserrée ce qui réduit les déformations et tassements et augmente la compacité du sol et améliore sa capacité portante. Les ouvrages couramment concernés par le compactage sont les remblais routiers, les barrages en terre et les aérodromes. La densification mécanique du sol peut entraîner :

- Modification de la granulométrie.
- Modification de la teneur en eau.
- Réduction ou élimination des risques de tassement.
- Augmentation de la résistance du sol et la stabilité du talus.
- Amélioration de la capacité portante.
- Limitation des variations de volume causées par gel, gonflement et retrait. [1]

I.3. Objectifs du compactage :

L'Objectifs du compactage consiste à assurer la compacité exigée des chaussées par les normes, standards, et cahiers des prescriptions spéciales (CPS) durant la réalisation des travaux. Cette qualité consiste essentiellement dans la résistance à l'orniérage et la faible déformabilité, pour chaque couche élémentaire de la plate-forme, pour assurer une bonne traficabilité des véhicules roulants. Elle consiste également à supprimer les tassements différés soit sous l'effet du poids propre du matériau considéré, soit sous l'effet de charges roulantes répétées.

A diminuer la perméabilité de la couche traitée afin de s'opposer à l'intrusion d'eau de pluie dans les couches sous-jacentes. Et en l'amélioration des caractéristiques mécaniques qui en résultent généralement : portance et module de déformation, résistance à la compression et au poinçonnement etc. Cet intérêt du compactage doit être connu et bien estimé. Durant la phase d'exploitation de la route, afin d'assurer une qualité de service satisfaisante sans entretien prohibitif.

Les qualités recherchées sont alors multiples et dépendent de la nature de l'ouvrage, des techniques utilisées du trafic et des conditions météorologiques. Pour les remblais, le tassement doit rester faible dans son ensemble, et surtout ne pas se manifester de façon différentielle.

Le compactage, au voisinage des ouvrages d'art devra donc être particulièrement soigné et devra être le plus homogène possible pour une couche de remblai donnée. Les ouvrages se classent donc dans l'ordre des degrés de liberté décroissants, en matière d'emprunts, ce qui, rejaillit sur les techniques de traitement.

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

suit, nous aborderons l'ensemble des aspects liés aux objectifs assignés au compactage des sols. [4]

I.4 . Les caractéristiques améliorées par le compactage :

Une caractéristique très intéressante pour l'utilisation du matériel de compactage est la capacité horaire de compactage, c'est à-dire le nombre de compactés par-l'engin en une heure.

Cette caractéristique est aisée à calculer, si l'on connaît, pour le matériau envisagé, la teneur en eau de compactage, la relation entre le nombre de passes et la compacité, Ainsi que l'épaisseur maximum pour laquelle le poids spécifique apparent sec est supérieur ou égal au poids spécifique apparent sec imposé. [2]

I.5 . La méthode de compactage :

Un compactage inadéquat est souvent le résultat d'une mauvaise méthode de travail. Une méthode ou une séquence de cylindrage bien conçue assure un compactage conforme et uniforme. La meilleure façon d'établir un plan de cylindrage adéquat consiste à faire une planche d'essai où le degré de compaction est vérifié à l'aide d'un nucléo densimètre.

Avant de procéder au cylindrage, et quel que soit le type de rouleau, il est important d'y aller par étapes :

1. Déterminer le nombre de passes requises pour couvrir complètement la surface du revêtement.
2. Établir le nombre de fois que cette première étape doit être répétée.
3. S'assurer que le mélange est cylindré à une température convenable.
4. Fixer la vitesse du rouleau.

Afin de déterminer le nombre de passes requises pour compacter complètement la surface du revêtement, le rapport est calculé entre la largeur du rouleau (en tenant compte d'un chevauchement nécessaire de 150 mm) et la pleine largeur du revêtement.

Ainsi, la largeur du revêtement divisée par la largeur du rouleau moins 150 mm donne le nombre de passes. Il arrive souvent qu'il y ait une couronne au centre de la voie.

Dans ce cas, le calcul est effectué pour chaque côté. Lorsque la couche est épaisse, soit plus de 50 mm, et qu'il n'y a pas de possibilité de confinement (en raison de l'absence de

Chapitre I : Généralités sur le compactage

bordures ou d'un revêtement adjacent), la première passe est réalisée à 300 mm du bord intérieur du revêtement, pour éviter le déplacement latéral du mélange.

Il est important de procéder au cylindrage initial sur toute la largeur du revêtement dès que l'enrobé est répandu, avant qu'il n'ait eu le temps de refroidir. Le cylindrage débute par le côté le plus bas de la chaussée. À cet endroit, le rouleau ne doit pas déborder de plus de 50 mm de la bordure extérieure du revêtement. Le nombre de passes supplémentaires pour obtenir le degré de compacité exigé est ensuite établi. Pour ce faire, l'utilisation d'un nucléo densimètre est essentielle.

L'exemple présenté à la figure I.1 montre que le degré de densité exigé a été atteint après deux passes. Remarquez que les passes subséquentes augmentent peu le degré de compacité. Lorsque le mélange est exagérément cylindré, on observe une diminution du degré de compacité après la cinquième passe.

Cette perte de compacité peut se produire, quel que soit le type de rouleau utilisé.

Toutefois, un rouleau vibrant permet d'atteindre le degré de compacité exigé en moins de passes; conséquemment, le seuil de « décompactage » risque d'être atteint plus rapidement. [6]

I.5.1. Compactage de surface :

Le compactage est un procédé de densification des sols en place. Ce procédé mène à une diminution des vides du sol par des moyens mécaniques aboutissant ainsi à une augmentation de la densité et de la résistance ainsi qu'une réduction de la compressibilité (Figure I.1).

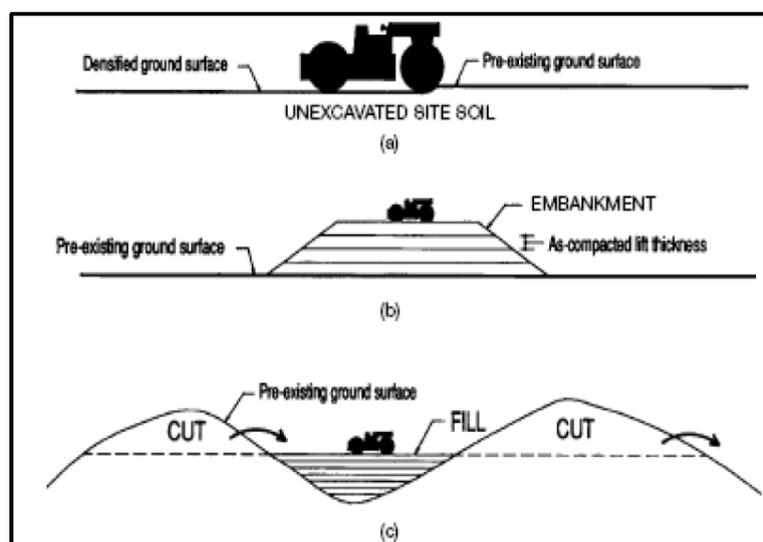


Figure I.1: Types de compactage de surface [18].

Chapitre I : Généralités sur le compactage

L'application des charges sur le sol à compacter par le biais de certains rouleaux de compactage statiques ou vibratoires induisent une densification dans le sol qui sera proportionnelle à l'énergie mécanique appliquée. Le compactage de surface peut être accompli sur différents types de sites.

I.5.2 Compactage dynamique :

Le compactage de surface peut être utilisé pour une profondeur maximale de 3m, au-delà de cette profondeur un autre type de compactage existe connu sous le nom de compactage dynamique profond. C'est un procédé qui consiste à pilonner le sol en surface avec une dame en chute libre (Photo. I.1). L'énergie transmise par chaque impact pénètre dans le sol et produit une déstructuration. Au bout de quelques jours ou semaines, une restructuration s'opère qui aboutit à des caractéristiques de portance améliorées (Photo. I.1).



Photo I.1 : Chantier d'un compactage dynamique profond [19].

I.6. Matériel et procédés spéciaux de compactage :

I.6.1. Procédés courants de compactage :

Dans les procédés courants de compactage, on utilise :

Chapitre I : Généralités sur le compactage

a- Vibration : Pour les sols pulvérulents et granulaires, le compactage efficace se fait par vibration en utilisant : plaque vibrante manuelle, rouleau vibrant autopropulsé, rouleau à pneus et grosse masse en chute libre.

b- Pylons à air comprimé : Pour le compactage des couches de faibles épaisseurs

- Dames à explosion (grenouille) pour les terrains cohérents ou non de faible surface.
- Pylons de 2 à 3 tonnes montés sur grue roulante, est utilisé pour tous les terrains mais ne sont intéressants que pour les faibles surfaces.

c- Rouleaux lisses : sont utilisés pour les terrains cohérents non argileux.

d- Rouleaux à pneus : pour le compactage des terrains non cohérents.

e- Rouleaux à pieds de mouton : pour les terrains cohérents. En particulier il est indispensable pour les terrains argileux.

f- Engins vibrant (rouleaux, sabots,...) : pour les sols à gros grains (sables et graviers). [1]

I.6.2. Procédés spéciaux de compactage :

Dans le cas de couches à grandes épaisseurs, on utilise des procédés de compactage dynamique tels que :

a- Compactage par explosifs :

- ✓ **Explosifs ponctuels** : pour les sols pulvérulents le compactage se fait par création d'une onde de choc de compression.
- ✓ **Explosifs linéaires** : pour les sols cohérents le compactage se fait par mise en place de pieux sableux.

b- Compactage par vibro flottation :

Le procédé consiste à la génération de contraintes et déformations alternées d'où réarrangement des grains.

- ✚ **Tubes en vibration** : se pratique pour les matériaux très perméables.
- ✚ **Colonnes ballastées** : les colonnes sont formées de matériaux pulvérulents compactés. Elles sont pratiquées dans les sols cohérents.

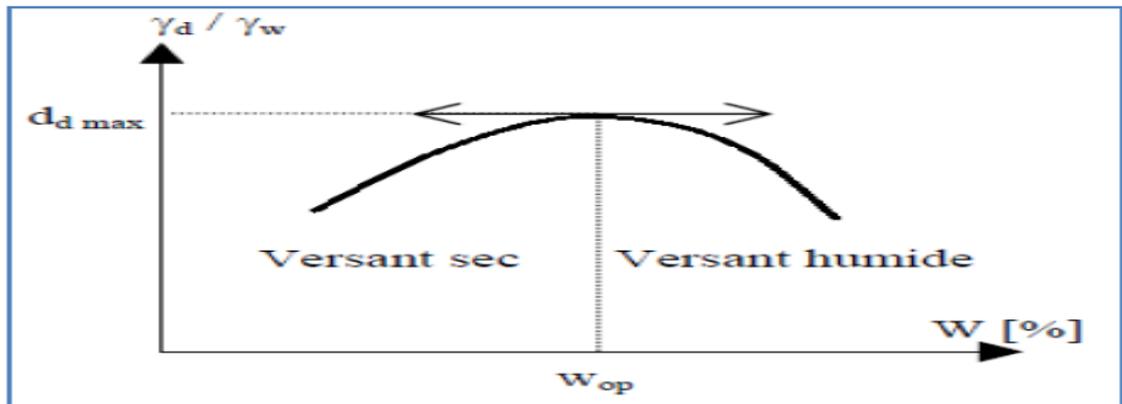


Figure I.2 : Courbe de compactage

I.7. Classification des sols en vue du compactage :

I.7.1. Groupe I : Enrochements

Des essais de force portante sur des enrochements non compactés, comparés à des essais sur des enrochements vibrés ont indiqué que la capacité portante est multipliée par dix, dans certain cas par un compactage efficace. Le module d'élasticité d'enrochements peut atteindre $800 - 1600 \text{ kg/cm}^2$ au premier cycle de chargement et $1600 - 3200 \text{ kg/cm}^2$ aux cycles suivants de chargement.

Les tassements mesurés dans des enrochements de bonne qualité bien compactés se sont révélés très faibles [10].

I.7.2. Groupe II : sables et graviers

Il est important de comparer les courbes Proctor des sables et graviers à drainage libre avec celles d'autres types de sols. Les sables et graviers atteignent leur densité maximale, soit complètement secs, soit complètement saturé. Entre ces deux extrêmes, à la teneur en eau naturelle normale, on obtient des densités plus faibles. Les courbes Proctor des sables et des graviers sont, cependant, souvent relativement plates, ce qui signifie qu'un compactage par vibrations efficace à la teneur en eau naturelle donne une densité assez élevée qui est acceptable dans de nombreux cas.

Des essais récents, au laboratoire et en vraie grandeur, ont montré clairement qu'un sable ou un gravier complètement sec pouvait également être vibré jusqu'à une très haute densité. Lorsque le sable est complètement sec ou complètement saturé, la cohésion apparente due à la capillarité de l'eau interstitielle ne gêne plus le réarrangement des particules du sol.

I.7.3. Groupe III: limons, sols siliceux

Des rouleaux vibrants lourds ont aussi été utilisés sur des sables siliceux, ainsi que sur des silts purs. De tels sols ont été compactés avec succès jusqu'à des épaisseurs de couches de 75 à 100 cm par des rouleaux vibrants lourds.

Il ressort de ce qui vient d'être dit que, sur des couches épaisses de remblais, les rouleaux vibrants tractés représentent, dans de nombreux cas, une solution bien adaptée et économique.

I.7.4. Groupe IV : Argiles

Une argile, à sa teneur en eau optimale, réclame un effort de compactage important. Les machines qui sont utilisées doivent exercer des forces de compression et de cisaillement relativement importantes sur le matériau. Avec tous les types de compacteurs, le compactage doit être réalisé en couches d'une épaisseur plus faible que dans le cas des sols non cohérents.

Deux solutions, principalement, sont envisageables pour le compactage par vibrations de tels matériaux cohérents. Dans certains cas, des rouleaux vibrants lourds à bille lisse ont donné de bons résultats. L'autre possibilité est d'utiliser des rouleaux à pieds de moutons ou à pieds dameurs. [7], [10]

I. 8 .Théorie de compactage :

L'ingénieur américain Proctor (1933), qui a mis au point l'essai de compactage a montré que le compactage dépend spécialement des paramètres suivants : la teneur en eau et le poids volumique, l'énergie de compactage, et la nature du sol. [3]

D'après, on conçoit théoriquement, tout au moins, qu'il puisse exister deux structures limites entre lesquelles se situent toutes les autres [5]:

✚ L'une où, l'imbrication étant poussée au maximum, les vides entre les particules sont réduits au minimum ; corrélativement la densité apparente passe par sa plus grande valeur ; on dit alors que la terre atteint sa compacité maximale.

✚ L'autre où le squelette prend la disposition la plus relâchée que les grains puissent former en gardant contact entre eux avec une certaine stabilité ; la terre atteint, dans ce cas le foisonnement maximal. La densité apparente est, par contre, minimale.

Entre ces deux structures limites, la terre possède un squelette plus ou moins foisonné. En pratique, la terre sortant de fouille ou de carrière, meuble et légère, présente son foisonnement le plus élevé. Par roulage, pilonnage et arrosage, on augmente sa compacité : c'est le compactage.

Chapitre I : Généralités sur le compactage

Pour l'édification d'une digue ou d'un barrage les terres naturelles, telles qu'on les trouve dans le sol, ne peuvent être utilisées sans préparation préalable c'est à dire les terre du remblai, il est bien évident que les terrains d'assise ne peuvent être remaniés, quoique des injections puissent en modifier les propriétés. Tous d'abord l'extraction (en carrière ou dans un terrain d'emprunt) les ameublissent : elles foisonnent.

A leurs mises en place dans l'ouvrage en construction, elles se tassent, progressivement, sous l'effet du poids croissant des terres qu'on leur superpose : c'est le phénomène de la consolidation naturelle ; mais il peut durer plusieurs mois, et même plusieurs années ; le barrage ne sera donc pas immédiatement en état de résister aux efforts pour lesquels il est conçu. De plus, les tassements peuvent se produire inégalement et amener, dans la digue, des fissures par lesquelles l'eau du réservoir se fraierait un passage et risquerait d'emporter l'ouvrage. Le compactage a pour objet de prévenir ces désordres, en provoquant artificiellement un tassement immédiat des terres, au cours de même de l'édification des remblais. On voit ainsi que le tassement des terres peut être accéléré :

✚ En mettant en jeu des forces capables de vaincre les frottements entre particules : ce sont les forces de compactage.

✚ En sélectionnant les terres de manière à obtenir, au besoin par des mélanges, une granulométrie qui favorise le logement des petites particules entre les grosses et assure ainsi une meilleure compacité.

En lubrifiant les terres, par une addition d'eau appropriée ; ainsi est facilité le glissement des particules les unes sur les autres. [7]

I.9 . 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[10]

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. [1]

I.10 . Paramètre de compactage :

Chapitre I : Généralités sur le compactage

Le compactage des sédiments a été effectué à l'aide de l'essai Proctor. Il existe deux types d'essai Proctor à deux énergies différentes de compactage. L'essai Proctor normal et modifié.

Pour la construction des remblais, c'est l'essai Proctor normal qui est utilisé alors que pour la réalisation des couches de chaussée, le compactage est effectué à l'aide de l'essai Proctor modifié utilisant une énergie plus grande. L'objectif de cette étude est d'évaluer l'aptitude des sédiments à être utilisés en couches d'assises de chaussée. L'essai Proctor modifié a donc été choisi comme test de compactage selon la norme NF P-94 093.

Cet essai consiste à humidifier un matériau à différentes teneurs en eau et procéder à son compactage pour chacune des teneurs en eau. Ensuite la masse volumique sèche du matériau est déterminée pour les différentes teneurs en eau.

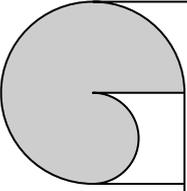
La courbe Proctor est obtenue en traçant la variation de la masse volumique sèche en fonction de la teneur en eau. D'une façon générale, cette courbe présente une teneur en eau particulière pour laquelle la densité sèche du matériau est maximale.

Ces deux valeurs sont appelées caractéristiques optimales de compactage Proctor. Des mesures de poinçonnement sont effectuées sur les éprouvettes compactées afin d'estimer la capacité portante des matériaux. L'indice portant immédiat (IPI) à tenir en compte correspond à celui déterminé pour les caractéristiques optimales. Ce paramètre permet d'estimer l'aptitude d'un matériau à supporter la circulation des engins de terrassement. [5]

I.11 . Conclusion :

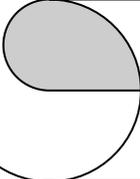
Dans ce chapitre nous avons présenté les notions générales sur l'ensemble des aspects liés au compactage des sols. Ensuite, nous avons parlé sur objectif de compactage et la classification des sols en vue du compactage. Enfin nous avons vu les conditions et paramètre de compactage.

Le chapitre suivant détaille l'influence de différentes conséquences de compactage.



Chapitre II:

*Les paramètres ayant influence sur
compactage*



II.1. INTRODUCTION :

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. [8]

Le compactage est influencé principalement par :

- La teneur en eau du matériau ;
- L'énergie de compactage ;
- La granulométrie ;
- la nature du sol ;
- Le type du sol ;
- La méthode de compactage.

II .1.1. 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. II.1), 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) [9] 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.

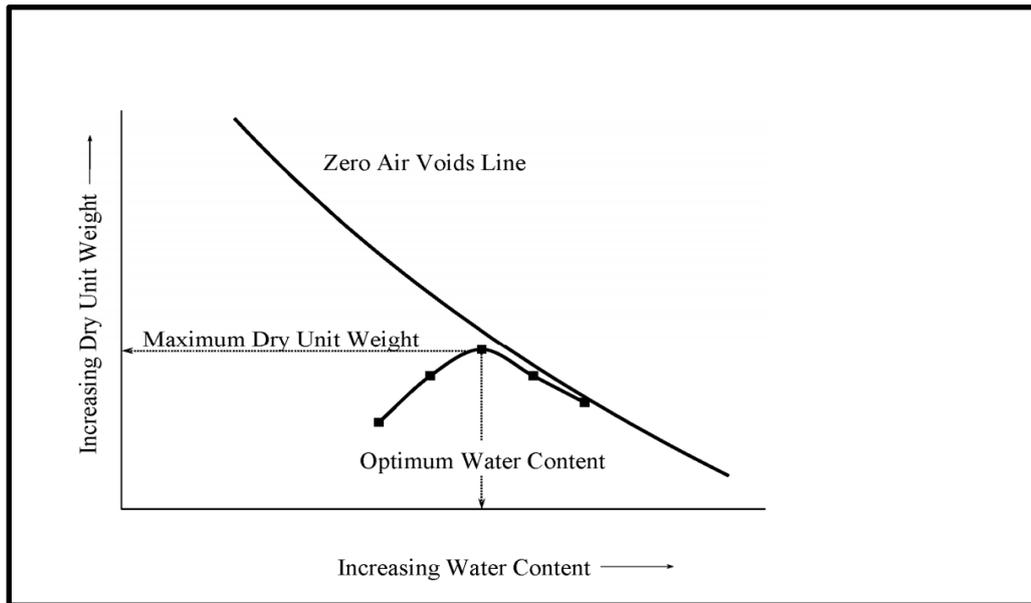


Figure II.1 : Courbe typique du compactage d'un sol cohérent. [9]

On note aussi que, pour les sables secs ($W < 1\%$), 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 II.1). Ce type de compactage est très utile dans les régions arides. Dans le cas des sols argileux, ce phénomène est toujours beaucoup plus complexe.

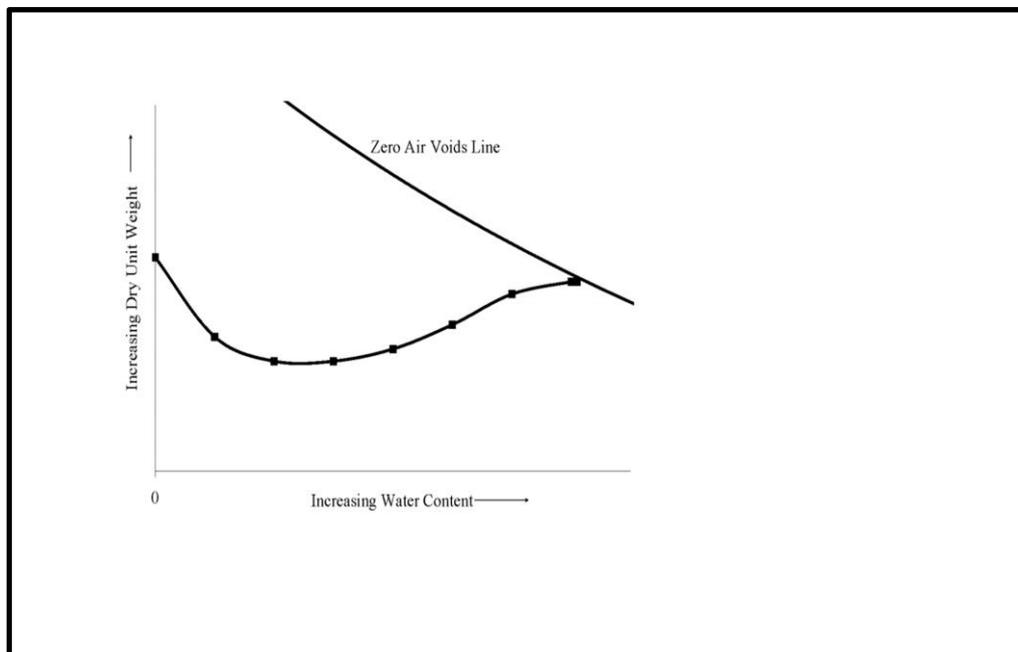


Figure II.2: Courbe typique du compactage d'un sol grenu. [9]

II .1.2. 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 II.3).

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.

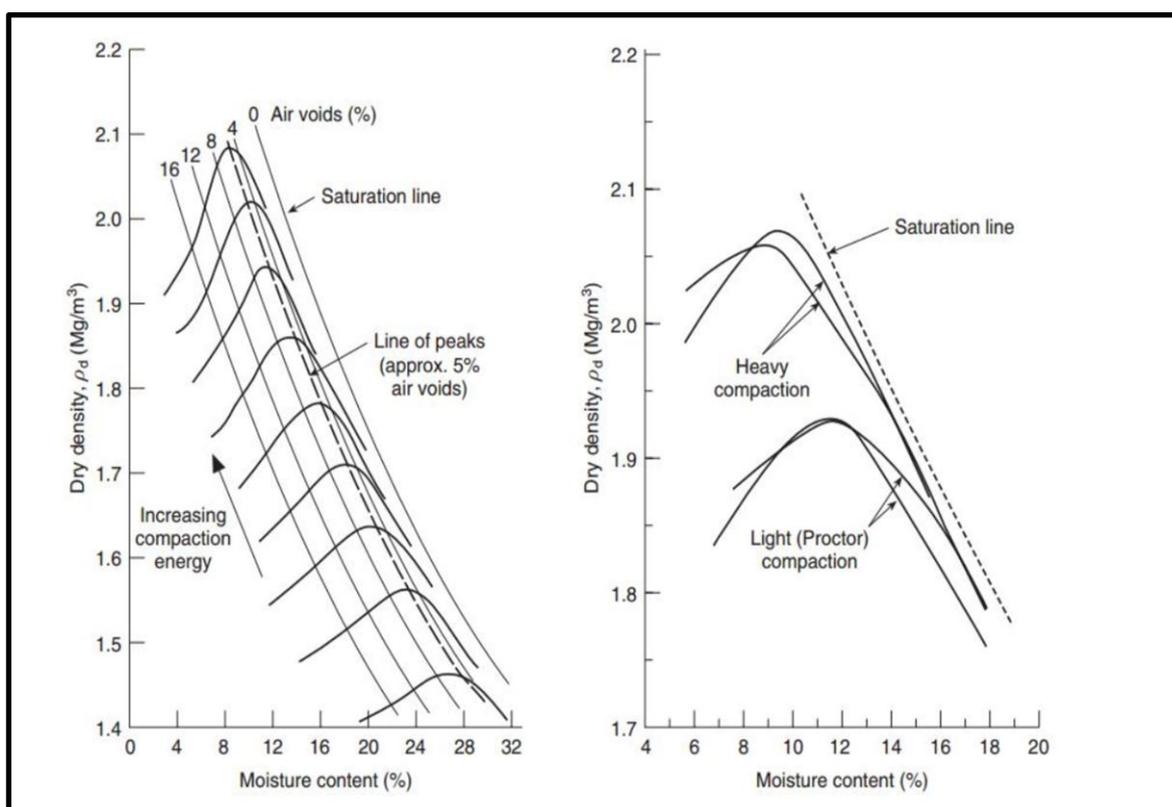


Figure II.3: L'influence de l'énergie de compactage [10].

II.1.3. 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 II.4) 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.

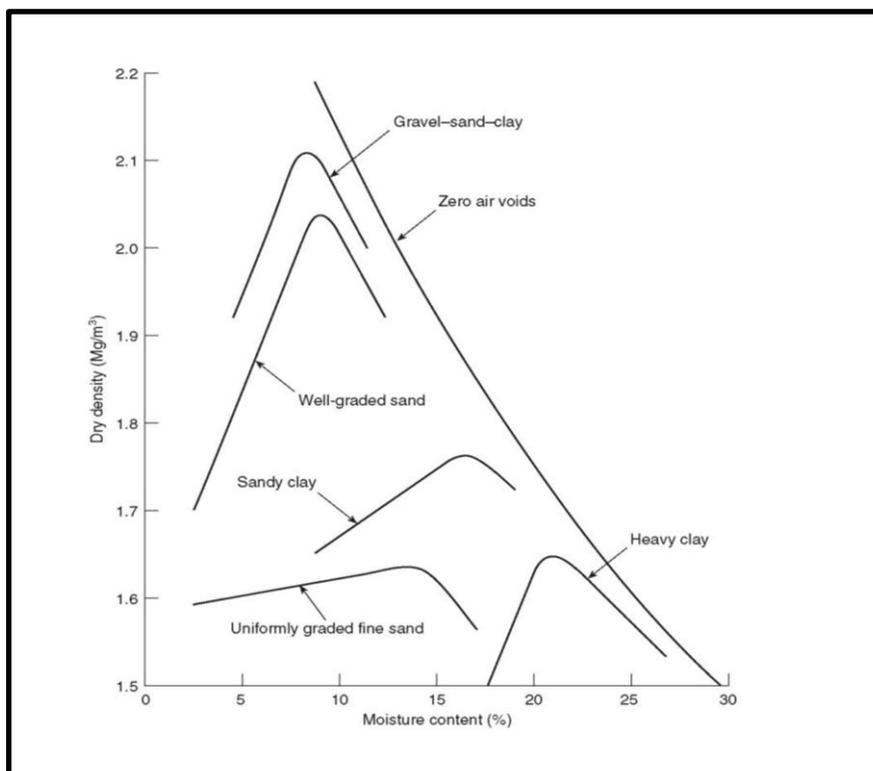


Figure II.4: Influence de la nature du sol sur le compactage [10].

II .1.4. Influence de la nature du sol :

Un sol dont le compactage sera fortement influencé par la teneur en eau présentera une courbe de compactage avec un maximum très marqué.

A l'inverse, un sol dont la teneur en eau influence peu le compactage sera caractérisé par une courbe de compactage très plate.

Les sols de ce type font généralement les meilleurs remblais. La figure.II.5 1 donne quelques exemples des allures que peuvent présenter les courbes de compactage des sols courants.

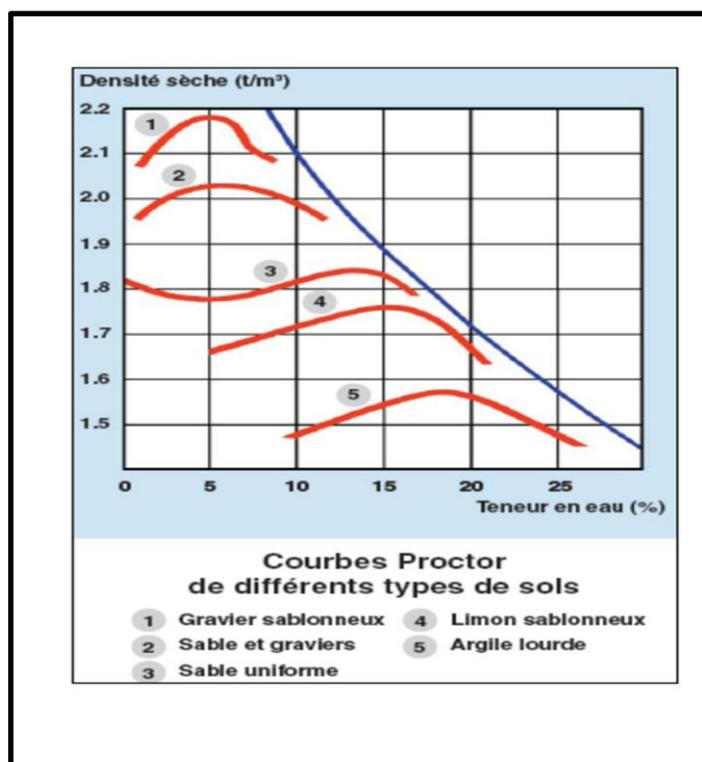


Figure II.5 : Influence de la nature du sol sur la courbe Proctor.

On voit que les sables sont très peu sensibles à l'eau en ce qui concerne le compactage, tandis que s'ils contiennent une fraction argileuse, leur courbe s'infléchit de manière importante. On voit en effet, la courbe du compactage se déplacer vers le haut et la gauche du diagramme à mesure que le nombre de coups augmente.

II .1.5 . 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, ainsi la relation entre la densité sèche optimum maximum et la limite de liquidité, 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.

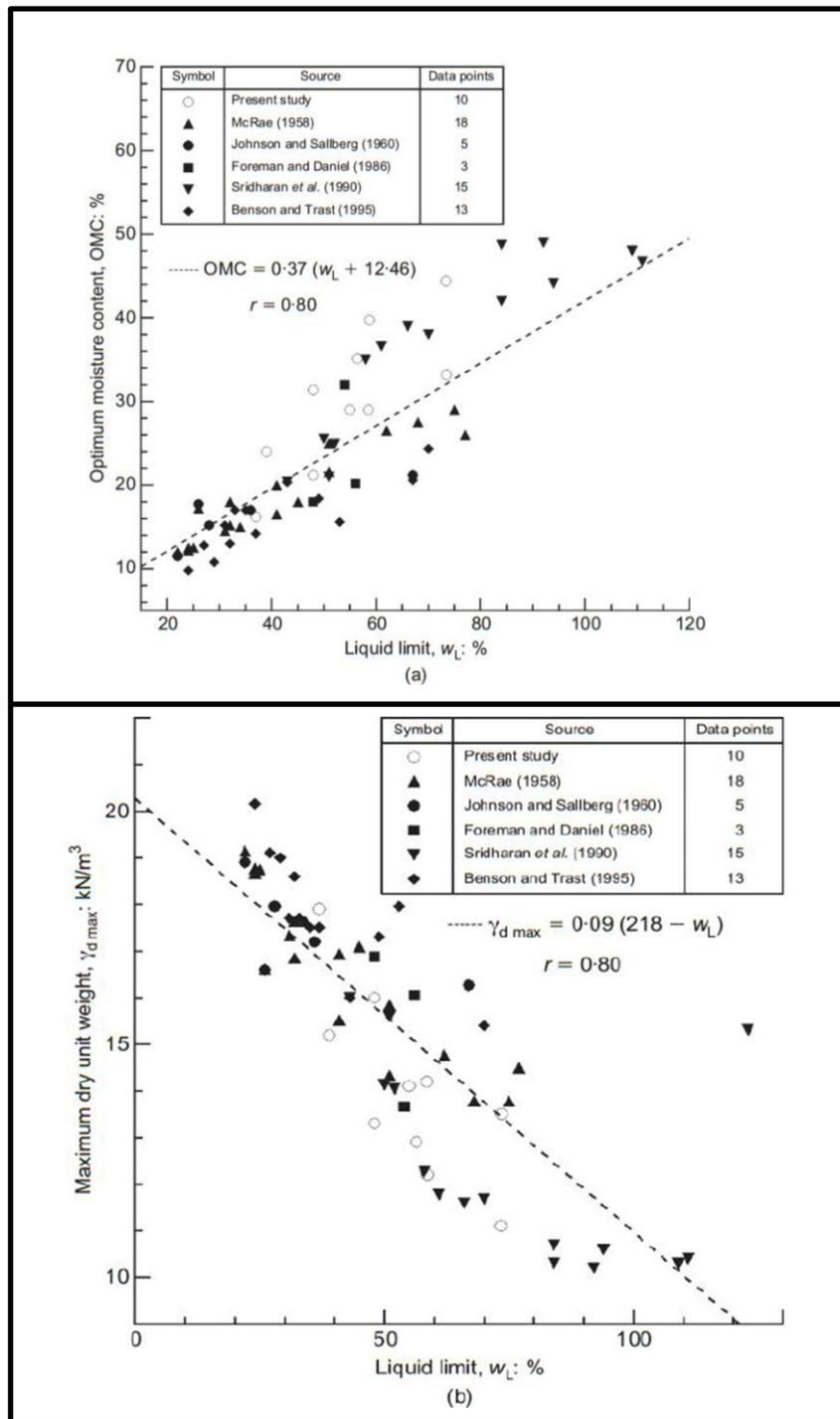


Figure II.6: L'influence de type de sol sur le compactage [12].

II .1.6. 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.7), 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/m³ (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/m³, la densité sèche par le compactage statique est de 0.07 g/cm³ supérieure à celle du Proctor Normal.

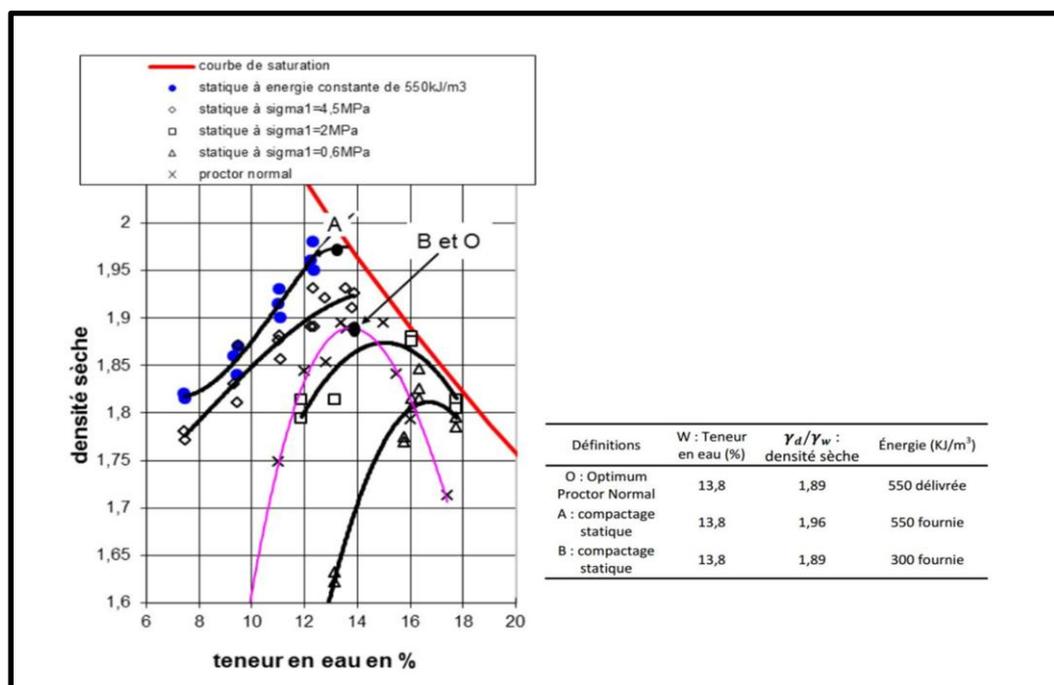


Figure II.7: Influence de la méthode de compactage, d'après [20]

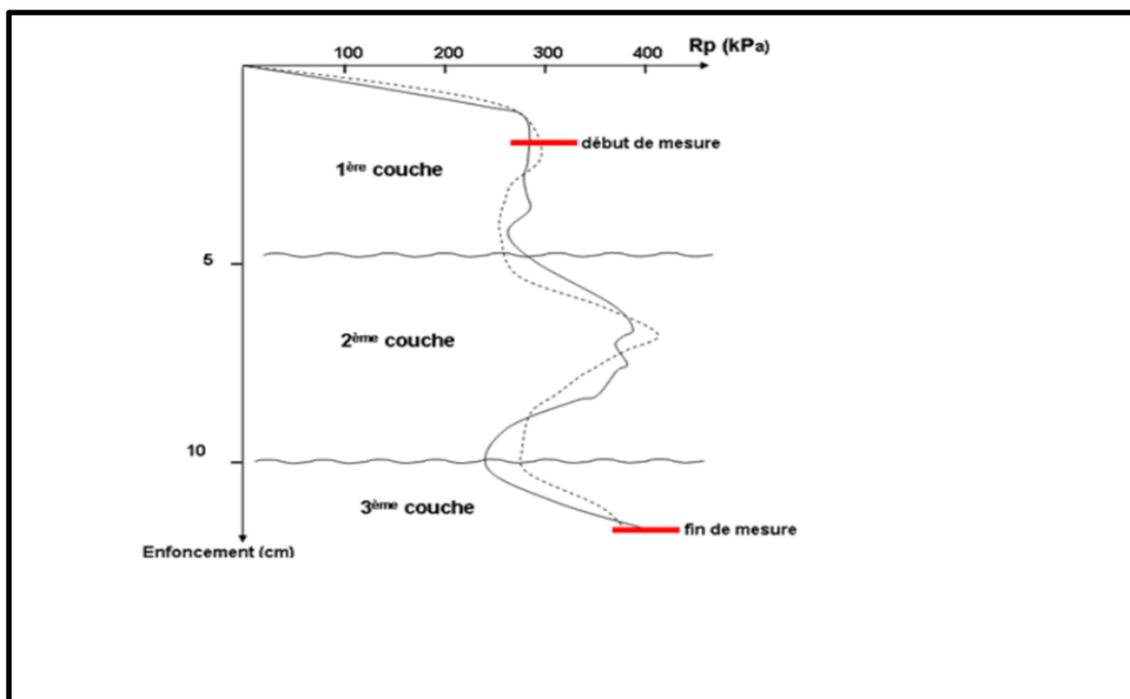


Figure II.8: Résistance en fonction de la profondeur dans un moule Proctor [15]

II .2. Influence du mode compactage sur les caractéristiques mécaniques :

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'amplitude très différentes : par ailleurs, selon leur composition, les sols seront plus ou moins sensibles à la méthode de compactage utilisée. Les sols ayant une forte tendance à la floculation (prédominance des forces d'attraction) ou à la dispersion (prédominance des forces répulsives) sont peu sensibles à la méthode de compactage. Cette sensibilité dépend aussi de l'énergie et de la teneur en eau de compactage. Seed et al ,1960 indiquent en particulier que le comportement du sol n'est influencé par la méthode de compactage que pour des teneurs en eau supérieures à la teneur en eau optimale. Il semble préférable de considérer que l'évolution de ce comportement est liée au développement de la double couche. L'augmentation de la teneur en eau peut aussi avoir un effet lubrifiant (ou anti lubrifiant), diminuant (ou augmentant) le frottement entre particules. L'évolution de l'orientation des particules dépendra de l'intensité des déformations de cisaillement, elle-même fonction de la teneur en eau, de l'énergie et du mode de compactage.

D'après Seed et al, 1960, l'engendrement de structures dispersées est favorisé dans l'ordre croissant par le compactage statique, le compactage par vibration et le compactage du

type "Kneading" (pétrissage). Le compactage "Kneading" étant de type dynamique il conduit le sol à une structure proche à celle du compactage Proctor.

Les figures II.9 et II.10 et présentées dans la littérature illustrent l'influence de la méthode de compactage et de la teneur en eau sur la résistance à la compression, le retrait et la perméabilité à saturation. De manière générale, ces résultats montrent que la susceptibilité du comportement d'un sol vis-à-vis de la méthode de compactage peut dépendre très fortement de la teneur en eau. Par ailleurs ; Seed et Chan, 1959, ont montré que la sensibilité de la résistance au mode de compactage dépend de la nature du sol et du niveau de déformation considéré (figure.II.11). Pour les grandes déformations, les résistances obtenues sont très proches. Puisque ces déformations ont conduit le sol à des structures semblables, indépendamment de celles induites par le mode de compactage.

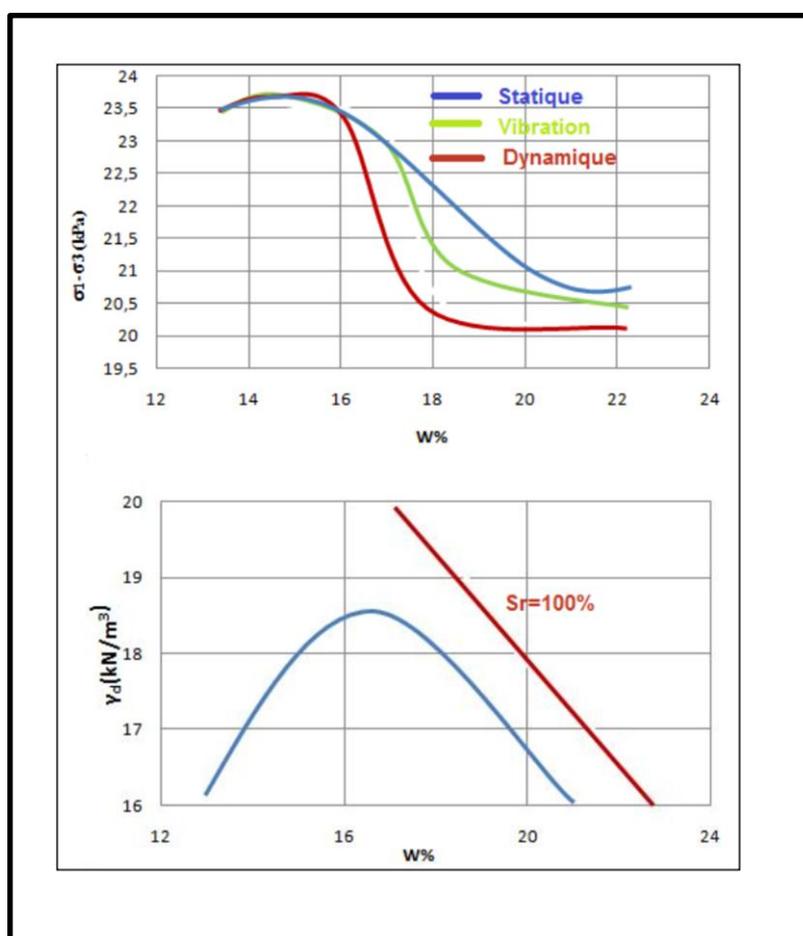


Figure II.9 : Influence du mode de compactage sur le déviateur de contraintes SEED et
CHAN ,1959

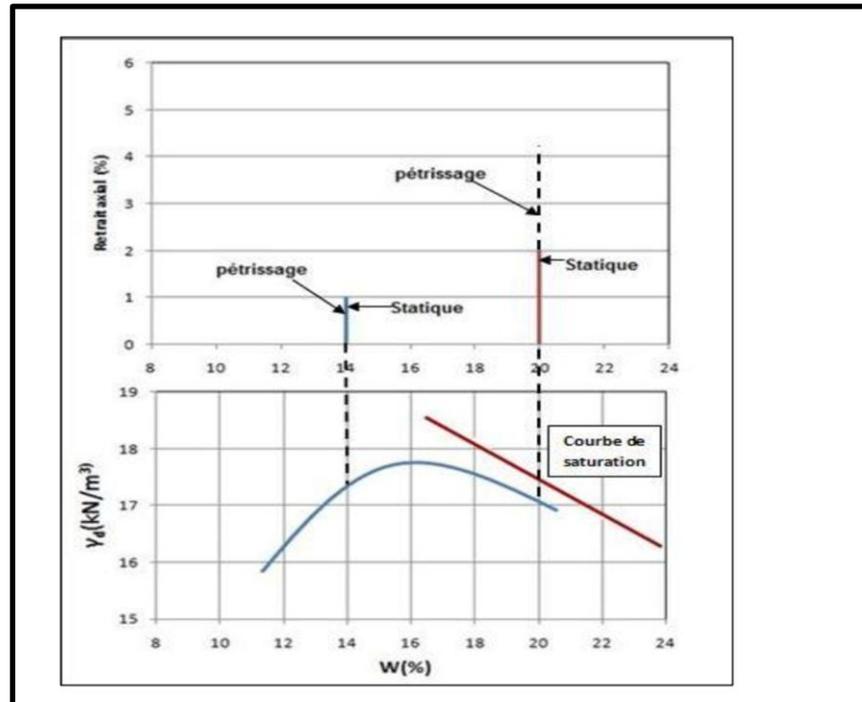


Figure II.10 : Influence de la méthode de compactage sur le retrait axial du limon d'Orly
Bouche ,1967

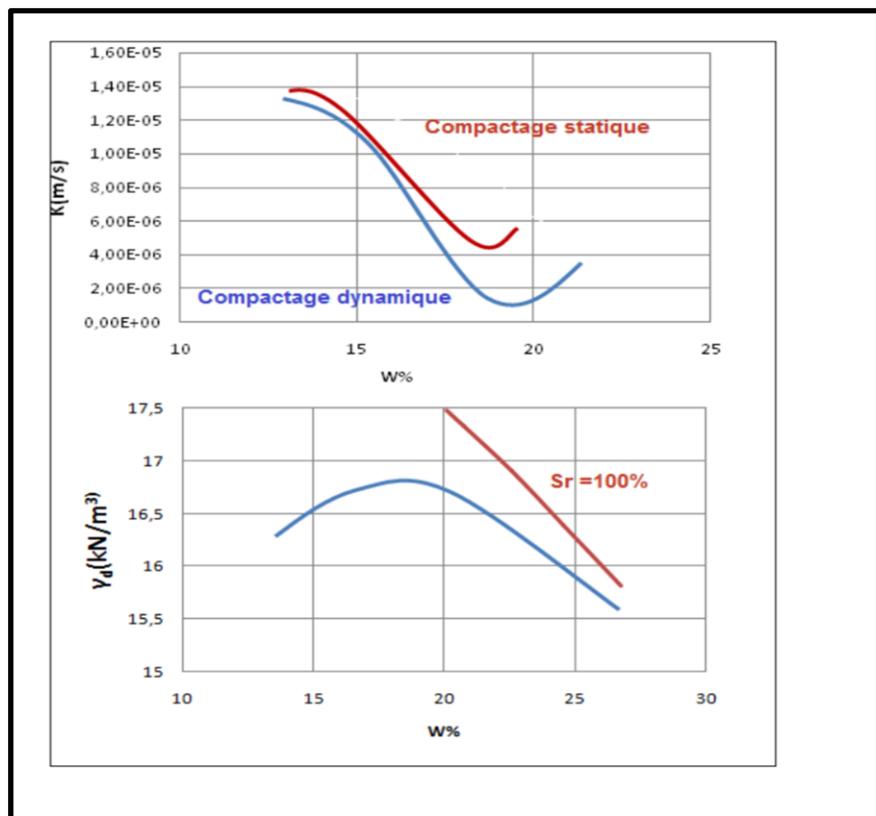


Figure II.11: Influence du mode de compactage d'une argile limoneuse sur la perméabilité
Michel et Al. ,1965

Chapitre II: Les paramètres ayants influence sur compactage

La figure.II.12 montre, à partir de résultats d'essais de compression simple, obtenues par Carvalho et al, 1987, que dans le cas de la marne de Layrac ($w_L=34\%$, $I_p=17,6\%$), le comportement mécanique dépend du mode de compactage. Le comportement plus fragile présenté par l'échantillon compacté statiquement (compactage sur une presse à vitesse de déplacement ou de chargement constante) est caractéristique d'une structure floculée, alors que celui de l'échantillon compacté dynamiquement (essai Proctor modifié) correspond à une structure dispersée. Le fait que ce sol soit sensible à la méthode de compactage est en accord avec sa faible activité dans l'échelle de Skempton ($IP/\% < 2 \text{ um} = 0,41$; sol inactif) qui correspond à des forces d'attraction entre particules faibles et qui facilite le développement de déformations de cisaillement.

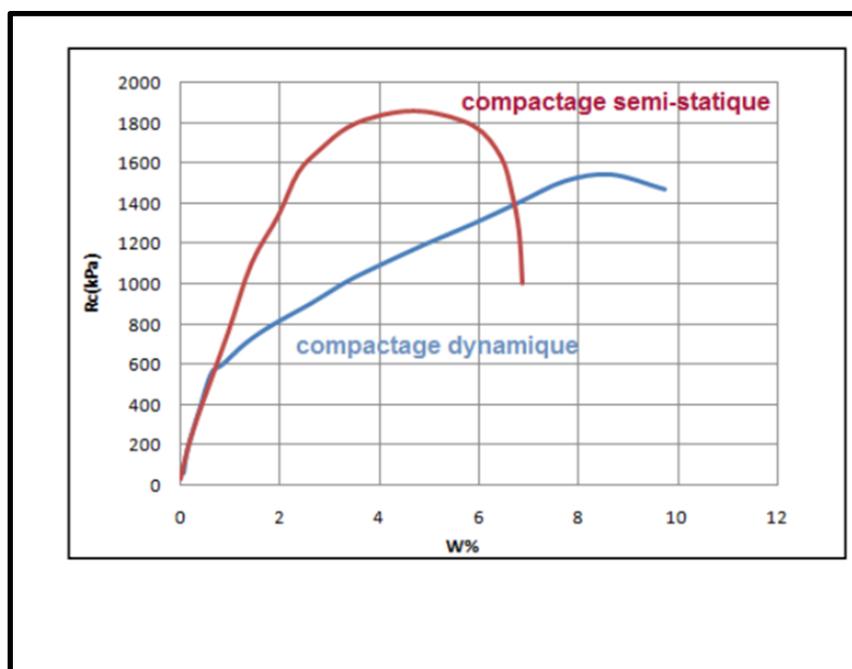


Figure II.12 : Influence de la méthode de compactage sur la résistance à la compression simple de la marne de Layrac

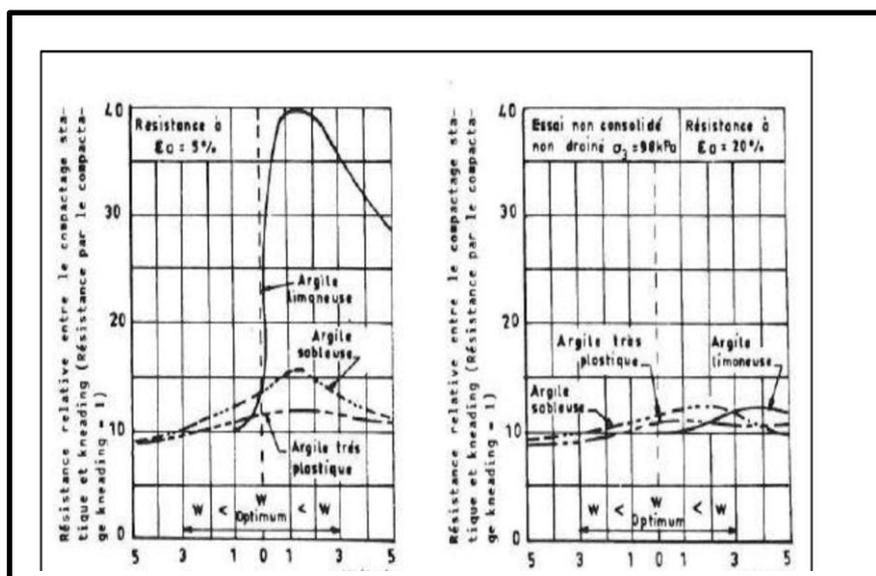


Figure II.13 : Influence de la méthode de compactage sur la résistance relative de différents sols Seed et Chan ,1959

(BELAHCENE .K et BELLA .A;1992) ont réaliser un comparaison entre 3 matériaux de la région de Tlemcen (MANSOURAH) :

Matériau A : $w_1=32,5\%$, $I_p=8,1\%$;

Matériau B : $w_1=34,5\%$, $I_p=8\%$;

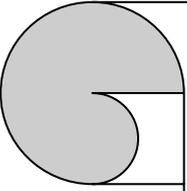
Matériau C : $w_1=35,2\%$, $I_p=10,2\%$;

Ces matériaux ont compacté dynamiquement et statiquement dans une presse manuelle, le résultat obtenu montre que les résistances à la compression et à la traction obtenue sur le matériau compacté dynamiquement sont nettement supérieures à celle obtenues par un compactage statique.

Selon les auteurs ceci est attribué à la pression de compactage développée par la presse manuelle qui est de l'ordre 1MPa, valeur juger inférieur à la contrainte de compactage dynamique.

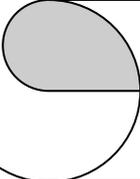
II.3. Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons présenté l'influence des différents paramètres sur les conséquences du compactage ainsi que la réponse de type de sol vis-à-vis des éléments liés à l'application au sol d'une énergie de compactage.



Chapitre III:

Le contrôle de compactage



III .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. Le but principal de ce chapitre est de présenter tous les types des essais au laboratoire et les essais in situ.

III .2. Les essais de laboratoire :

Le principe des essais au laboratoire est de compacter un échantillon de sol, avec une teneur en eau connue, dans un moule, aux dimensions normalisées, par l'action de la chute d'une dame. Le poids et la hauteur de chute de cette dernière sont également normalisés. La teneur en eau du sol testé est maîtrisée en étuvant l'échantillon, puis par adjonction de quantités précises d'eau. Une série d'essais est réalisée pour différentes teneurs en eau, le résultat de chacun produisant un couple de valeurs (w, 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.[9]

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 À savoir :

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

III .2 .1. Compactage par essai Proctor :

En 1933, l'Engineering News Record publia une série d'articles de R.R. Proctor qui portaient sur le compactage des sols. Il y présentait un essai de compactage en laboratoire qu'on appelle aujourd'hui l'essai Proctor normal et qui est décrit dans la norme NQ 2501-250.

L'essai Proctor normal consiste à mesurer la masse volumique sèche d'un sol disposé en trois couches dans un moule de volume connu, chaque couche étant compactée avec un marteau de 2,49 kg tombant d'une hauteur libre de 305mm. On répète l'essai à plusieurs reprises en faisant varier la teneur en eau du sol. On porte chaque mesure de la masse volumique du sol sec sur un graphique en fonction de la teneur en eau correspondante, ce qui permet de tracer une courbe de compactage. Aparté de cette courbe, on détermine la masse volumique sèche maximale du sol (pd_{max}) et sa teneur en eau optimale (w_{OPM}). En comparant la masse volumique du sol sec sur le chantier ($pd_{chantier}$) avec la masse volumique sèche maximale (d_{max}), on établit le degré de compacité (Dc), ou pourcentage de compactage, à l'aide de l'équation suivante :

$$Dc = \frac{pd_{chantier}}{pd_{max}}$$

Le degré de compacité est l'un des critères sur lesquels on s'appuie pour accepter ou refuser un compactage. Ce degré, qui s'exprime en pourcentage, tend vers 100 % lorsque la valeur de $pd_{chantier}$ tend vers celle de d_{max} . Plus il est élevé, plus la compacité du sol est grande et plus le compactage a été efficace.

Durant la seconde Guerre mondiale, comme on disposait d'engins de compactage plus performants sur les chantiers, on modifia légèrement l'essai original en augmentant l'énergie de compactage, pour créer l'**essai Proctor modifié**. On pouvait ainsi établir des comparaisons plus justes entre pd_{max} et $pd_{chantier}$.

On constate que l'énergie déployée dans l'essai Proctor modifié est d'environ 4.5 fois supérieure à celle de l'essai.

III .2.1.1. La correction de la teneur en pierre :

Le terme pierre désigne toutes les particules dont le diamètre équivalent est supérieur à 5 mm. La teneur en pierre est donc la quantité de ces particules dans un sol ; elle s'exprime en pourcentage :

p = teneur en pierre (%)

$$p = \frac{\text{masse du sol sec retenu sur le tamis de 5mm}}{\text{masse totale du sol sec}}$$

Chapitre III : le contrôle de compactage

Certaines observations ont permis de constater que la teneur en pierre influe sur la masse volumique sèche maximale d'un sol donné : lorsqu'elle augmente. La masse volumique sèche maximale augmente, et vice-versa. L'équation suivante développée par le Civil Aeronautique Administration traduit assez bien cette relation :

$$\rho_{dmaxp} = (1-p) \rho_{dmaxp=0\%} + (0,9 * P * G_{spierre} * \rho_w)$$

Ou ρ_{dmaxp} = masse volumique sèche maximale à p % de pierre

P = teneur en pierre

$\rho_{dmax p=0\%}$ = masse volumique sèche maximale à 0 % de pierre

G_s pierre = densité de la pierre

ρ_w = masse volumique de l'eau

$$= 1g/cm^3$$

Quand on connaît $d_{max p=0\%}$ et $G_{gpierre}$, il est facile de calculer la nouvelle valeur de $d_{max p}$ résultant d'une variation de la teneur en pierre. Si les variations sont faibles, l'équation demeure assez fiable. Elle perd toutefois beaucoup de sa précision lorsque les écarts entre les teneurs en pierre deviennent importants.

Lorsque la teneur en pierre d'un sol analysé en laboratoire diffère de celle qui a été mesurée sur le chantier, on doit la corriger.

La correction, que l'on applique sur la masse volumique sèche maximale déterminée par l'essai Proctor, s'effectue en deux étapes :

1-On calcule la masse volumique sèche maximale pour une teneur en pierre égale à 0 % :

$$\rho_{dmaxp} = 0\% \frac{\rho_{dmax} - (0,9 \times PL \times G_{spierre} \times \rho_w)}{(I - PL)}$$

Ou ρ_{dmax} = masse volumique sèche maximale de l'essai proctor, à PL % de pierre

PL = teneur en pierre en laboratoire

2-On calcule la masse volumique sèche maximale pour une teneur en pierre p_c :

$$\rho_{dmax pc} = (I-PC)\rho_{dmax p=0\%} + (0,9 \times p_c \times G_{spierre} \times \rho_w)$$

Ou $\rho_{dmax pc}$ = masse volumique sèche maximale à p_c % de pierre

P_c = teneur en pierre sur le chantier

Après avoir effectué la correction, on peut établir le degré de compacité et ainsi évaluer plus exactement la qualité du compactage

$$D_c = \frac{\rho_{dchantier}}{\rho_{dmax}}$$

Si aucune correction de la teneur en pierre n'est apportée à la masse volumique sèche maximale de l'essai Proctor, on aura tendance à sous-estimer ou à surestimer le degré de compacté, selon l'importance de l'écart entre les teneurs en pierre. Lorsque l'écart dépasse 15 %, il est préférable de ne pas appliquer la correction, mais plutôt de faire un nouvel essai Proctor après avoir prélevé un échantillon représentatif de sol sur le chantier.

III .2.1.2. La correction de la teneur en eau optimale :

La teneur en eau optimale (w_{opt}) est elle aussi influencée par les variations de la teneur en pierre. Plus cette dernière est élevée, plus la teneur en eau optimale est faible.

En effet, les particules supérieures à 5 mm ne retiennent qu'une faible quantité d'eau à leur surface, la plus grande partie s'écoulant à travers les vides qu'elles forment.

Si la teneur en pierre diminue, les vides entre les particules deviennent plus petits et l'eau circule alors plus difficilement : la teneur en eau optimale augmente. Comme la pierre ne retient qu'une faible quantité d'eau, on exprime sa teneur en eau par l'**absorption**, une notion qui traduit l'état saturé superficiellement sec de la pierre. L'absorption de la pierre varie normalement de 0,5 % à 1 % .

On peut connaître l'influence qu'exerce la teneur en pierre sur la teneur en eau d'un échantillon de sol à l'aide de l'équation suivante :

$$W = ABS_{pierre} \times p + w_{passant\ 5\ mm} (I-p)$$

Ou w = teneur en eau d'un échantillon de sol

ABS_{pierre} = absorption de la pierre

P = teneur en pierre

$w_{passant\ 5\ mm}$ = teneur en eau du sol passant le tamis de 5 mm

$(I-p)$ = pourcentage de sol passant le tamis de 5 mm

Lorsque les teneurs en pierre en laboratoire et sur le chantier différent, on doit corriger la teneur en eau optimale, sans quoi il sera impossible de reproduire sur le chantier les conditions idéales d'humidité déterminées en laboratoire à l'aide de l'essai Proctor.

Pour corriger la teneur en eau optimale, on procède en deux étapes :

- 1- A l'aide des résultats de l'essai Proctor, on détermine la teneur en eau optimale ($w_{optp=0\%}$) pour une teneur en pierre de 0 % :

$$W_{opt\ p=0\%} = \frac{W_{opt} - (ABS_{pierre} \times pL)}{I - PL}$$

Ou w_{opt} = teneur en eau optimale de l'essai Proctor, à $P1$ % de pierre

pL = teneur en pierre en laboratoire

- 2- On calcule la teneur en eau optimale (w_{optpc}) pour une teneur en pierre pc égale à celle du sol sur le chantier :

$$W_{optpc} = ABS_{pierre} \times pc + w_{optp} = 0\% (I - pc)$$

Où pc = teneur en pierre sur le chantier.

III .2.2. 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 III.1: Matériel pour essai de compactage Proctor

Chapitre III : le contrôle de compactage

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

Caractéristiques	Proctor Normal ASTM D 698			Proctor Modifié ASTM D 1557		
	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

III .2.3. 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. 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.[16]

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 au teneur eau irréalistes.

III .2.4. 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.

III .2.5. 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 (photo III.2)



a) Compactage à marteau vibrant.



b) Compactage à table vibrante.

Photo III.2: deux types de compactage.

La différence entre les deux procédures est que la méthode de la table vibrante (Photo III.2b) 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 (Photo III.2a) 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 [17].

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.

III .2.5.1. Compactage à la table vibrante :

L'essai à la table vibrante (NQ 2501-062) ne sert que les graviers et les sables à granulométrie serrée, car Proctor effectué sur ces sols donne des courbes de compactage plates sur lesquelles il est difficile de situer l'optimum Proctor avec précision. En général, l'essai à la table vibrante fournit des masses volumiques sèches maximales supérieures à celles qui auraient résulté de l'essai Proctor.

L'essai à la table vibrante permet de déterminer les masses volumiques sèches minimale et maximale des sols pulvérulents. Ces valeurs, ainsi que la masse volumique du sol sec mesurée sur le chantier, permettent de calculer l'indice de densité relative, qui s'exprime en pourcentage :

$$Id = \frac{\rho_{dmax}}{\rho_{dchantier}} \left(\frac{\rho_{dchantier} - \rho_{dmin}}{\rho_{dmax} - \rho_{dmin}} \right)$$

Ou $Id =$ indice de densité relative

ρ_{dmax} = masse volumique sèche maximale

$\rho_{dchantier}$ = masse volumique sèche sur le chantier

ρ_{dmin} = masse volumique sèche minimale

Lorsqu'on connaît la densité du sol, on peut calculer l'indice des vides correspondants à chaque masse volumique du sol sec avec l'équation suivante :

$$e = \frac{G_s \rho_w}{\rho_d}$$

ou e = indice des vides associé à ρ_d

G_s = densité du sol

ρ_w = masse volumique de l'eau

ρ_d = masse volumique du sol sec

On peut alors exprimer l'indice de densité relative en se servant des indices des vides.

Quelques opérations mathématiques nous amènent à l'équation :

$$I_d = \frac{e_{\max} - e_{\text{chantier}}}{e_{\max} - e_{\min}}$$

Ou e_{\max} = indice des vides maximal associé à $\rho_{d\min}$

e_{chantier} = indice des vides sur le chantier

e_{\min} = indice des vides minimal associé à $\rho_{d\max}$

III .3. Les essais in situ :

III .3.1. 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. [14]

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. [7]

III .3.2. 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, compacté, ce qui permet d'en vérifier l'aptitude

III .3.3. 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), 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. [14]

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 (Figueur.III.1) 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.

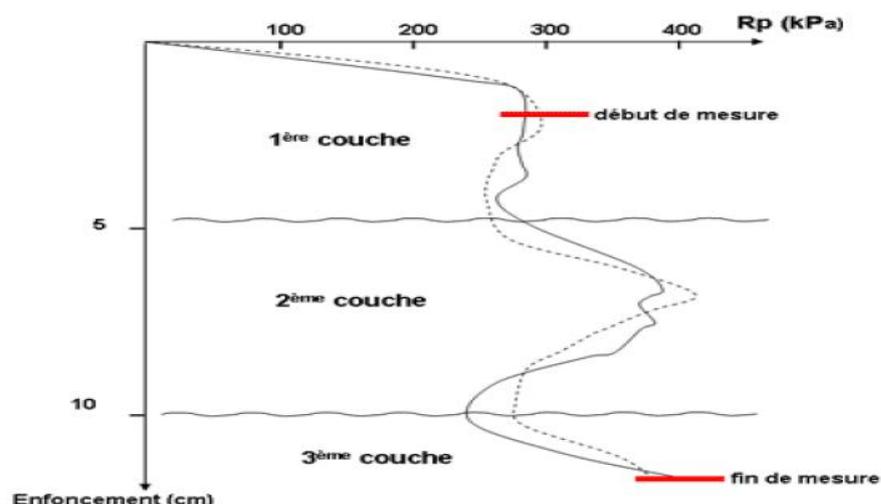


Figure III.1: Résistance en fonction de la profondeur dans un moule Proctor [15].

III.3.4. 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 III.2).

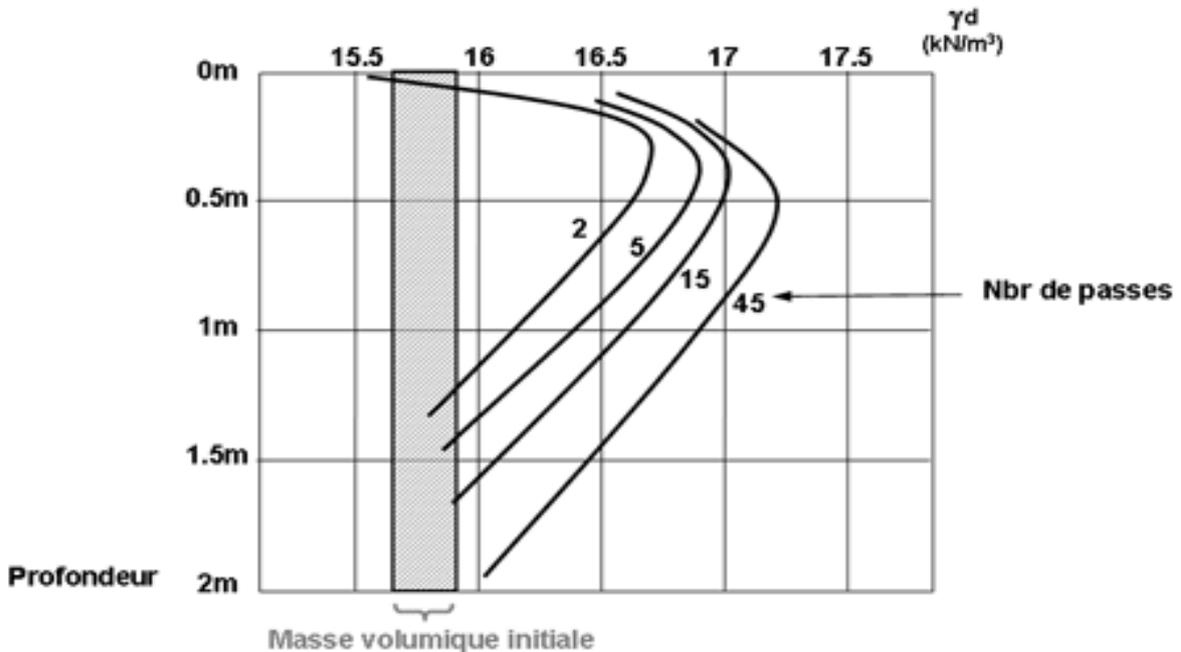


Figure III.2: Compactage par un rouleau vibrant [15].

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).[14]

Les deux schémas de la (figure III.3.a et Figure.III.3.b) permettent de voir encore deux phénomènes. Sur la (Figure III 3.a), on considère un sol à une teneur en eau donnée, et on représente l'évolution de la densité moyenne d'une couche d'épaisseur fixée en fonction du

nombre de passages d'un compacteur. Sur la (Figure III.3.b), on considère aussi le même sol à une épaisseur donnée, et on représente l'évolution de différents états hydriques en fonction du nombre de passages d'un compacteur. Ceci peut être utilisé en termes de planches d'essai de compactage pour rechercher les conditions optimales.

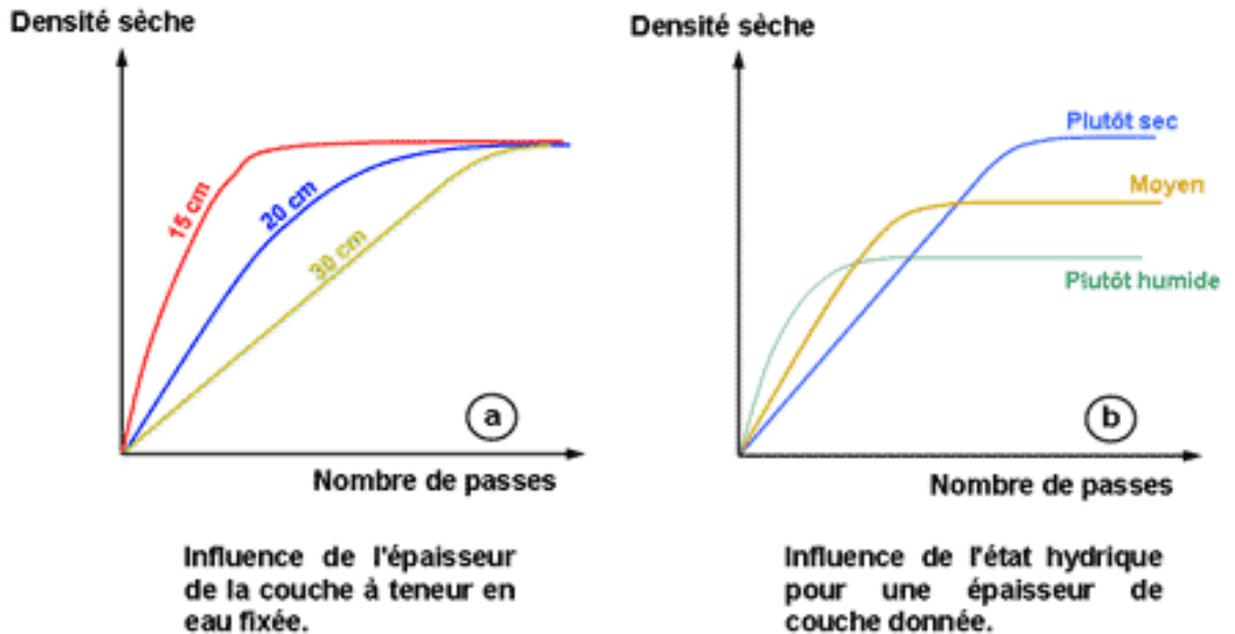
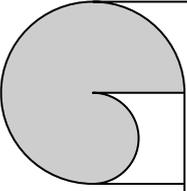


Figure III.3: Essais de compactage in-situ sur une planche d'essai. [16].

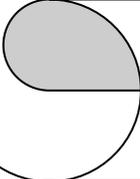
Cette épaisseur, après compactage, doit toutefois rester comprise entre $0,20$ et $0,50$ m. Il faut vérifier que toute l'épaisseur de la couche est bien compactée. L'exécution d'une tranchée peut permettre de constater l'homogénéité du matériau compacté.

III.4. Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons traité les différentes méthodes de compactage des essais au laboratoire à savoir : le compactage dynamique, représenté par l'essai Proctor, le compactage statique, Compactage par impact, Compactage par pétrissage ou la méthode "Kneading", Compactage vibrant ainsi les essais in situ.



***Introduction à la partie
expérimentale***



1. Préambule :

Comme il a été déjà montré dans la recherche bibliographique, le compactage des matériaux se fait toujours après humidification pour atteindre les meilleures densités sèches ou le minimum de vides dans le matériau, la problématique posée dans ce mémoire est-il possible de compacter le matériau en utilisant de faibles quantité d'eau ou juste l'eau naturel dans le matériau

Pour essayer de contribuer à la réponse à cette question nous avons entamé notre étude expérimentale qui consiste à déterminer certaines caractéristiques physico-mécaniques d'un matériau compacté à faibles teneur en eau et de les comparer aux mêmes caractéristiques obtenues dans le cas d'un compactage en utilisant une teneur en eau optimale

2. Méthodologie adoptée:

Notre étude expérimentale est basée sur le protocole suivant :

- Compactage des matériaux selon les conditions Proctor modifié :
- Détermination des caractéristiques physico-mécaniques des matériaux compactés selon les conditions de l'essai Proctor ;
- Compactage des matériaux à des faibles teneurs en eau en utilisant l'appareillage de l'essai Proctor modifié mai avec une augmentation de l'énergie de compactage
- Détermination des caractéristiques physico-mécaniques des matériaux compactés selon le protocole suscités ;
- Comparaisons des caractéristiques obtenues dans le nouveau protocole aux caractéristiques obtenues en utilisant le teneur en eau optimale dans les conditions classiques

A causes des contraintes rencontrées lors de la préparation des travaux au laboratoire nous avons limités les caractéristiques physico-mécaniques étudiées dans ce mémoire à deux à savoir :

- La densité sèche ;
- Indice portant I CBR

On considéré comme teneur en eau faible les pourcentages suivants : 1, 2 et 4%

3. Programme de l'étude expérimentale:

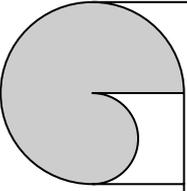
Pour exécuter le protocole suscité nous avons suivi le programme suivant :

- Détermination des caractéristiques physico-chimiques des matériaux ;
- Réalisation des essais Proctor modifié sur les deux matériaux en utilisant le maximum des points possibles (teneur en eau) ;
- Détermination de l'indice portant immédiat à chaque point de l'essai Proctor (poinçonnement de chaque moule) ;

Introductions à la partie expérimentale

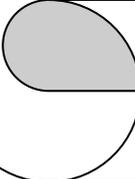
- Réalisation des essais de compactage en utilisant l'appareillage de l'essai Proctor mais avec une énergie de compactage de 60 coups/couche au lieu de 56, ces essais se feront pour les teneurs en eau 1, 2 et 4%.
- Détermination de l'indice portant immédiat à chaque point de l'essai de compactage à 60 coups/couche (poinçonnement de chaque moule) ;
- Réalisation des essais de compactage en utilisant l'appareillage de l'essai Proctor mais avec une énergie de compactage de 70 coups/couche au lieu de 56, ces essais se feront pour les teneurs en eau 1, 2 et 4%.
- Détermination de l'indice portant immédiat à chaque point de l'essai de compactage à 70 coups/couche (poinçonnement de chaque moule) ;

Interprétation des résultats en faisant la comparaison entre les caractéristiques obtenus avec la teneur en eau optimale dans les conditions classique et les caractéristiques obtenues avec des faibles teneur en eau avec augmentation de l'énergie.



Chapitre IV:

Présentations des matériaux utilisés



IV.1. Introduction :

Les matériaux choisis pour cette étude ont été ramenés de la Wilaya d'Illizi au Sud Est de l'Algérie, ce choix peut être justifié par le problème de rareté des eaux dans ce Il tombe sous le sens que, lorsqu'un matériau est bien serrés, les interstices n'y régions et la nécessité d'une technique de compactage à faibles teneurs en eau

En effet plusieurs échantillons des deux matériaux choisis, ont prélevés et ramenés par les services du L.T.P.Sud Ghardaïa.

IV.2. Présentation des matériaux :

Les deux matériaux utilisés dans la présente étude peuvent être présenté comme suit :

a) Matériaux Oued Samen :

Ce matériau correspond à un Tout Venant, identifié visuellement : Sable graveleux caillouteux peu limoneux de couleur brunâtre, il est prélevé d'une carrière située à Oued Samen à environ 25 Km d'Illizi sur la nouvelle route reliant Illizi à Bordj Omar Idriss(CW02).

Les coordonnées GPS de la carrière sont comme suit :

26° 27' 23,62"N ; 08° 17' 42,37" E

b) Matériaux Tikhourkhorine :

Ce matériau correspond à une Arène granitique graveleuse à caillouteuse de couleur noirâtre d'origine volcanique, il est prélevé d'une carrière située sur les frontières Algéro-Lybiennes à environ 200 Km au sud Est de la Ville de Djanet, cette carrière est utilisée pour les travaux de réalisation du projet de sécurisation des frontières.

Les coordonnées GPS de la carrière sont comme suit :

24° 9' 33,61"N ; 10° 30' 59,44" E

IV.3. Caractérisation des matériaux :

Pour faciliter l'exploitation des données dans notre étude nous allons appeler le matériau d'Oued Sement Mat1 et le matériau de Tikhourkhorine Mat2.

Deux échantillons de chaque matériau ont été soumis aux essais d'identification au laboratoire pour déterminer leurs caractéristiques physico-chimiques.

IV.3.1. Analyse granulométrique :

L'Analyse granulométrique s'effectue jusque à 0,080 mm par tamisage du matériau par voie sèche ou par voie Humide. Au-dessous de 0,080 mm, l'analyse granulométrique se fait par sédimentométrie qui est basée sur la loi de Stokes.

IV.3.1.1. But de l'essai :

Analyse granulométrique a pour but déterminer quantitativement la distribution des particules de sol par classes de diamètres. Le nombre et la grandeur des classes de diamètres de l'objectif poursuivi, éventuellement, de l'importance de l'échantillon dont on dispose, Il y a lieu de faire remarque dès à présent qu'il existe des différences quant aux limites des classes et quant aux appellations des sols en fonction du corps professionnel impliqué.

IV.3.1.2 Analyse granulométrique par tamisage (voie sèche) :

L'essai est réalisé suivant la norme NF P 18-560. L'analyse granulométrique permet de déterminer la répartition des grains de sol suivant leurs dimensions des un échantillon représentatif.

Cu est le coefficient d'uniformité ou le coefficient de Hazen : $Cu = D_{60}/D_{10}$

Cc est le coefficient de courbure : $Cc = D_{30}^2 / D_{10} \cdot D_{60}$

Tableau IV.1 : Résultante d'essai granulométrique

	Matériau (1)		Matériau (2)	
	Echantillon(1)	Echantillon(2)	Echantillon(1)	Echantillon(2)
d60	3	2,9	1	0,9
d30	0,19	0,19	0,2	,2
d10	0,04	0,04	0,05	0,05
Cu	75	72,5	20	18
Cc	0,3	0,31	0,8	0,8

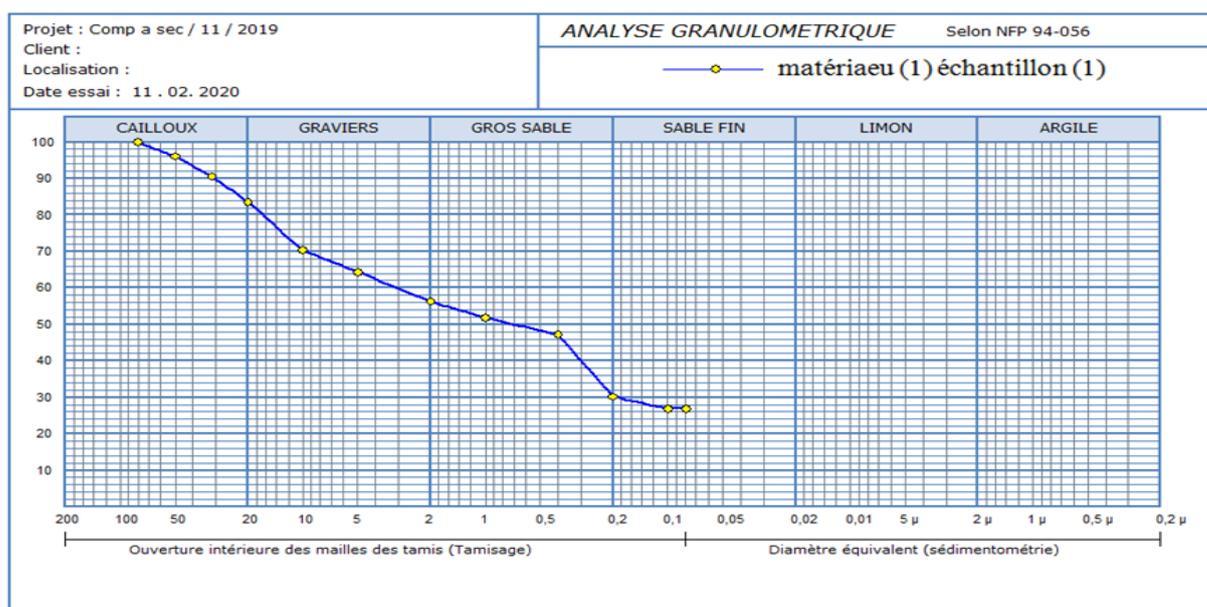


Figure IV.1 : Courbe granulométrique pour mat (1) échantillon (1)

Chapitre IV : Présentations des matériaux utilisés

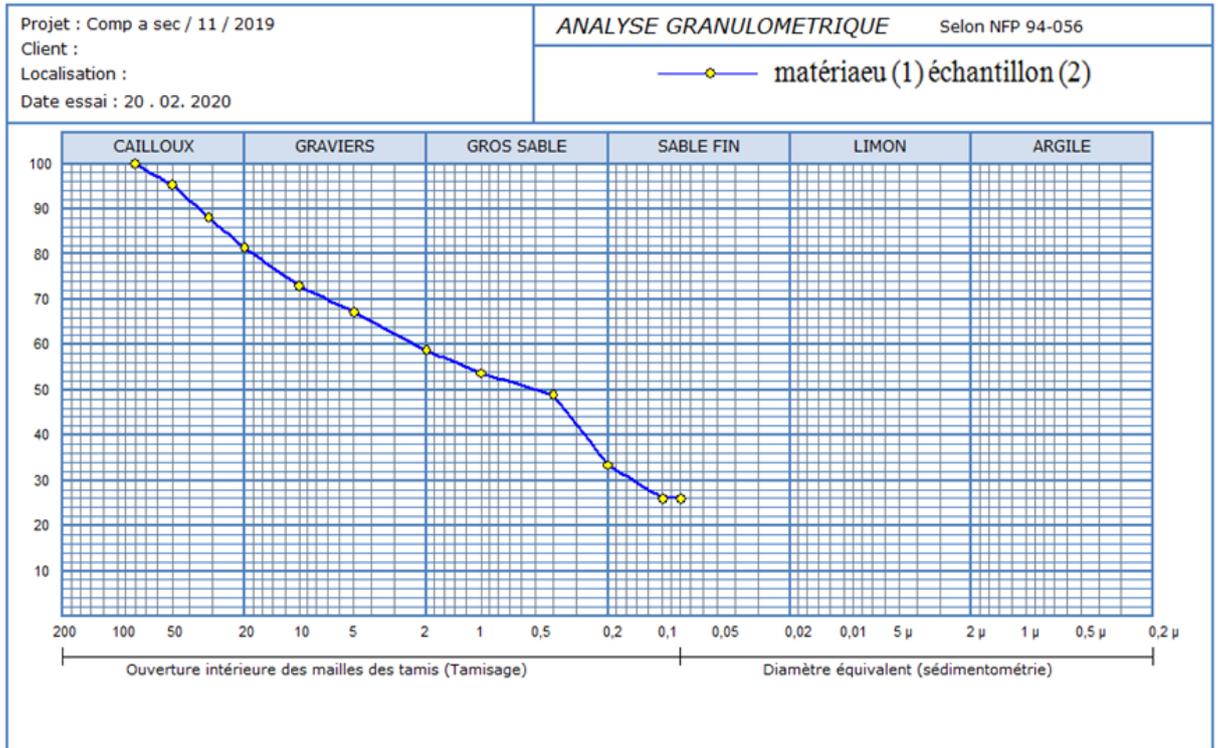


Figure IV .2 : Courbe granulométrique pour mat (1) échantillon (2)

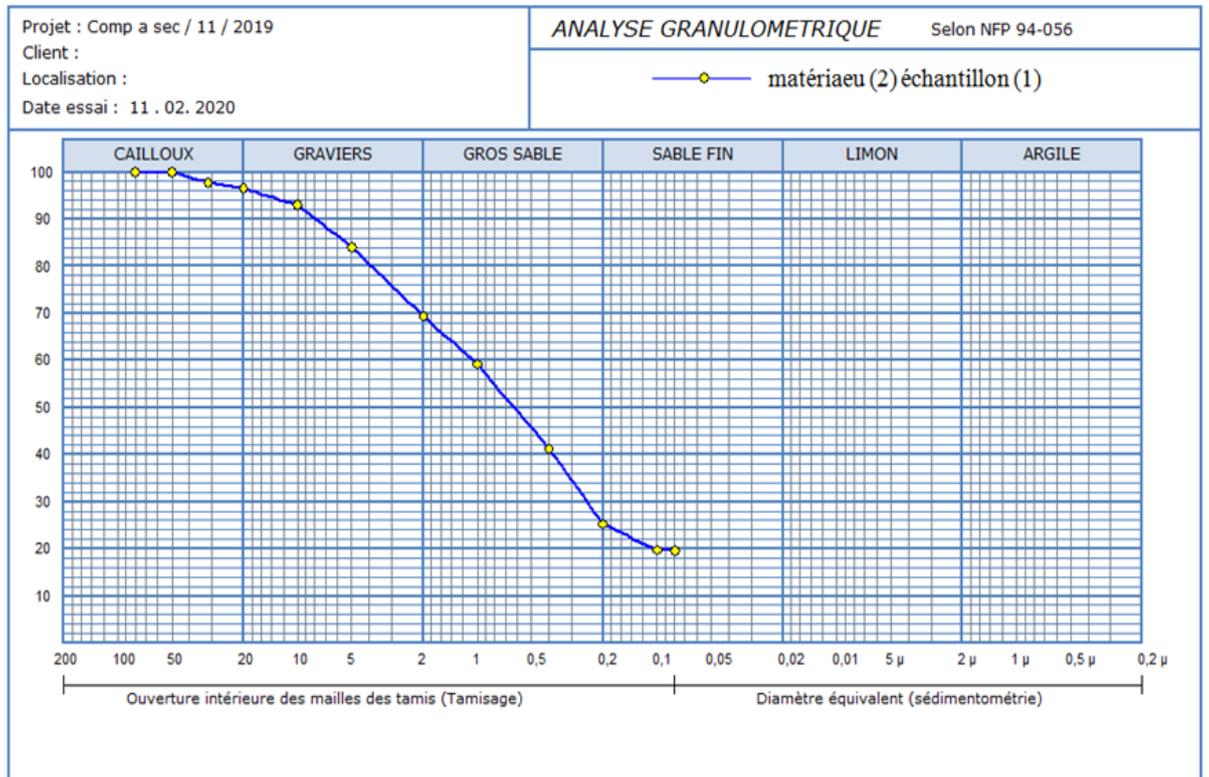


Figure IV .3 : Courbe granulométrique pour matériau (2) échantillon (1)

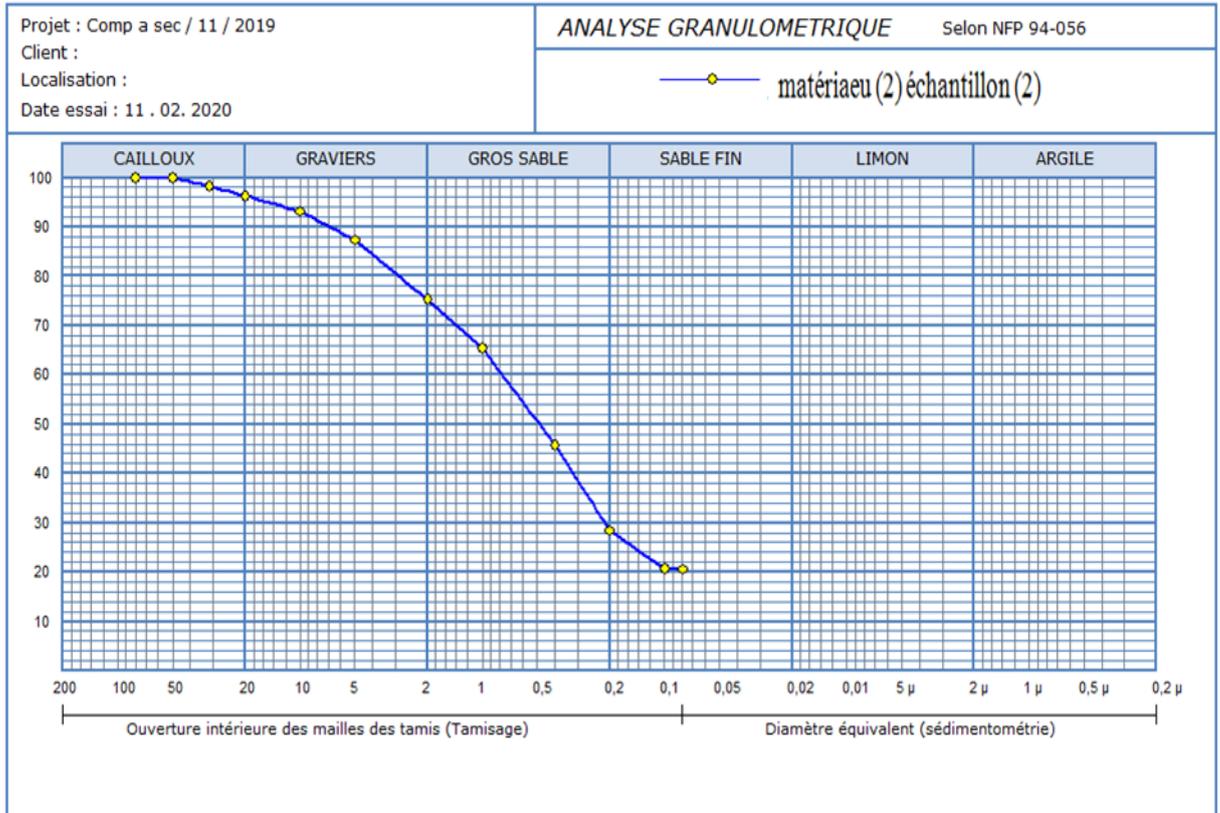


Figure IV.4 : Courbe granulométrique pour matériau (2) échantillon (2)



Photo IV.1 : tamis



Photo IV. 2 : Siphonage d'échantillon de sol



Les résultats obtenus:

Les deux matériaux ont donné :

- $D_{max} \leq 50\text{mm}$
- $C_u > 5$: donc les deux matériaux ont une granulométrie étalée

IV .3.2 Qualité des fines :

IV.3.2.1. Les Limites d'Atterberg :(NF P 94-051) :

L'essai se fait sur une partie du matériau tamisé au tamis 0,40mm. Ces deux caractéristique sont reliées par l'indice de plasticité IP qui est exprimé en % est donné par la formule suivante : **IP=WL-WP**

- Recherche de la teneur en eau pour laquelle une rainure pratiquée dans un sol placé dans une coupelle de caractéristique imposée se ferme lorsque la coupelle et son contenu sont soumis à des chocs répétés ;

- Recherche de la teneur en eau pour laquelle un rouleau de sol, de dimension fixée et confectionné manuellement, se fissure,



Photo IV .3 : Appareil de Casagrande

Tableau IV.2 : Valeurs de Limites d'Atterberg du mat (1) et mat (2)

Echantillon		W _L (%)	W _p (%)	IP (%)
matériau (1)	Echantillon(1)	27,79	18,80	8,99
	Echantillon(2)	25,24	17,21	8,26
matériau (2)	Echantillon(1)	25,26	18,27	6,99
	Echantillon(2)	26,47	18,36	8,11

Tableau IV.3 : Classification suivant IP

Etat du sol	Indice de plasticité
Non plastique	0 < IP < 5
peu plastique	5 < IP < 15
plastique	15 < IP < 40
Très plastique	IP > 40

Chapitre IV : Présentations des matériaux utilisés

Abaque de plasticité de casa grande : la classification des Echantillon utilise les critères de plasticité liés aux limites d'Atterberg. Elle est précisée dans les diagrammes de plasticité ci-dessous. Selon la dans le diagramme du point représentatif ayant pour l'abscisse la limite de liquidité et pour l'ordonnée l'indice de plasticité

Las courbes résume les résultats de l'essai des limites d'Atterberg des mat (1) et mat (2)

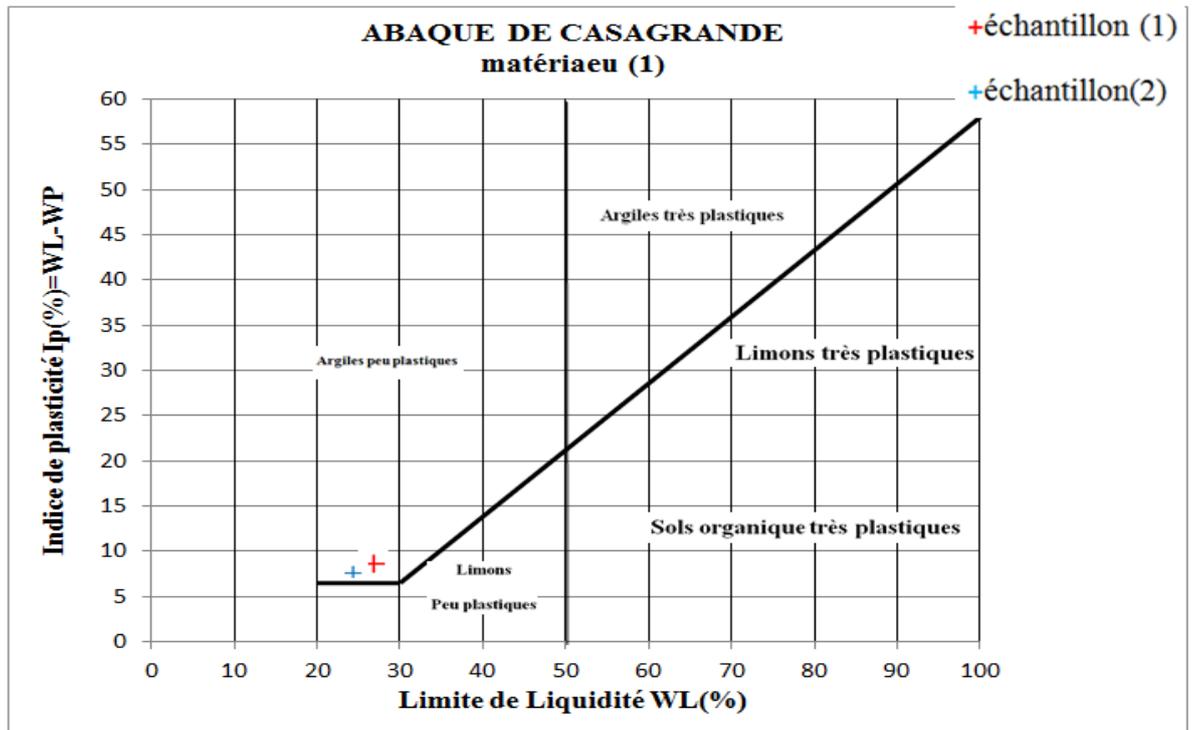


Figure IV.5 : diagramme de Casagrande pour matériau (1)

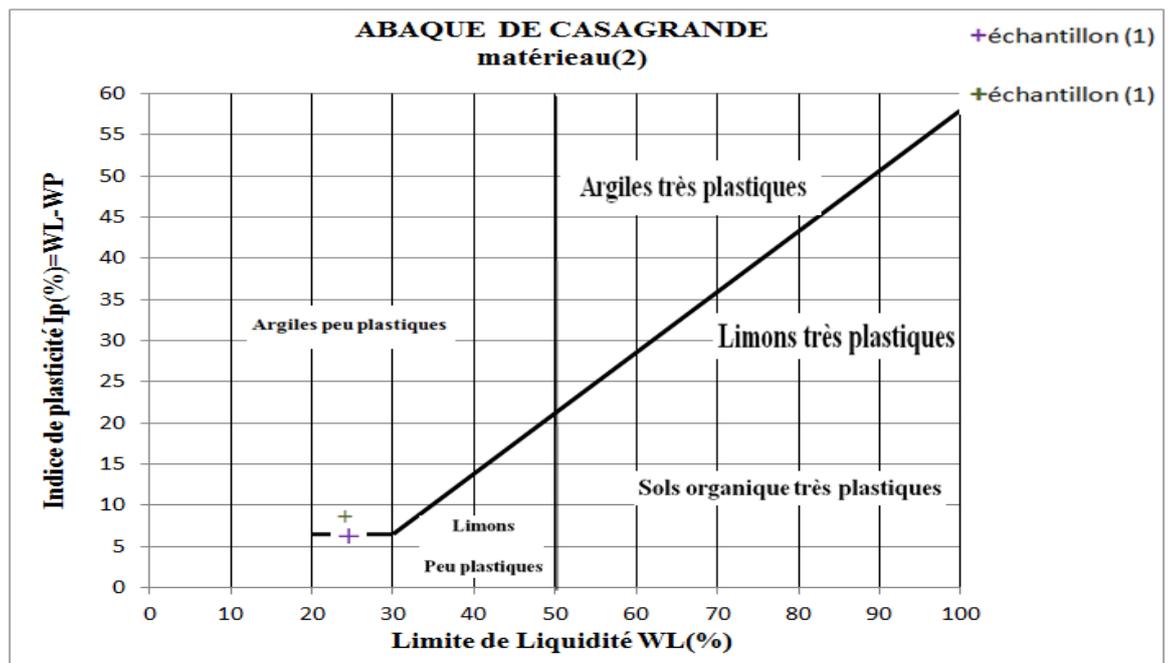


Figure IV .6 : diagramme de Casagrande pour matériau (2)

IV.3.2.2. L'équivalence de sable :

a-But de l'essai :

Cet essai utilisé de manière courante pour évaluer la propreté des sables entrant dans la composition des bétons. L'essai consiste à séparer les particules fines contenues dans les soldes éléments sableux plus grossiers. Une procédure normalisée permet de détermination un coefficient d'équivalent de sable qui quantifie la propreté de celui-ci

b-principe de l'essai :

L'essai est effectué sur la fraction 0 /5mm du matériau à étudier .Le tamisage se fait par voie humide afin de ne pas perdre d'élément fin .On lave l'échantillon selon un processus normalisé, et on laisse reposer le tout, au bout de 20 mm on mesure les éléments suivants :

- + **Hauteur h1** : Sable propre +élément fins
- + **Hauteur h2** : Sable propre seulement.

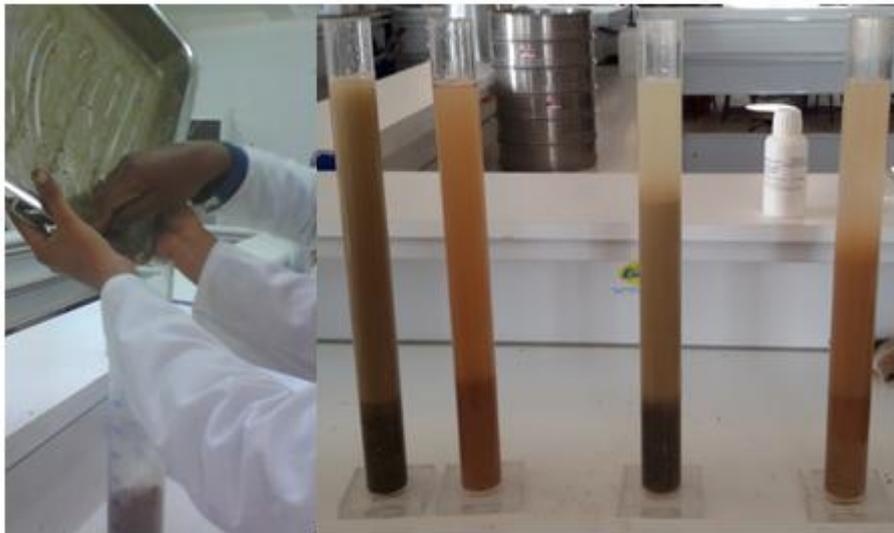


Photo IV .4 : Mode opératoire de l'essai d'équivalent de sable

On en déduit l'équivalent de sable que, par convention, est :

$$ES = \frac{h2}{h1} \times 100$$

Selon que la hauteur h2 est mesurée visuellement ou à l'aide d'un piston, on détermine ESV (équivalent de sable visuel) ou ESP (équivalent de sable au piston).

Tableau IV. 4 : Résultat d'équivalent de sable pour les deux matériaux

Echantillon	Equivalent de sable ES%
Mat (1) Echantillon(1)	14,93
Mat (1) Echantillon(2)	14,11
Mat (2) Echantillon (1)	16 ,75
Mat (2) Echantillon(2)	17,49

Ces résultats montrent que les deux matériaux contiennent une fraction sableuse polluée.

IV .3.2.3. Essai au bleu de Méthane :

L'essai est réalisé conformément à la norme NF P 94-068, il nous permet de mesurer indirectement la surface spécifique des grains solides par absorption d'une solution de bleu de méthane jusqu'à saturation. En d'autre terme, il exprime la quantité de bleu de méthylène pouvant être absorbé par les surfaces des particules des sols.

L'essai consisté à mesurer la quantité de bleu méthylène pouvant être absorbé par un matériau mis en suspension dans l'eau. Il a pour but de quantifier la fraction argileuse contenue dans le matériau qui possède cette propriété d'absorber le bleu de méthylène. La valeur du bleu VB est la quantité du bleu de méthylène absorbée par le poids sec de la prise.

$$Vb(0/d) = \frac{\text{Quantité du bleu absorbé}(cm^3)}{\text{Poids sec de la prise (g)}}$$

Connaissant la valeur du bleu de la fraction fin 0 /d, on peut calculer celle de la fraction globale 0/D à partir de la courbe granulométrique du sol.

$$VB(0/D) = \frac{Vb(0/d).Cd}{100}$$

Ou :Cd est la proportion de la classe granulaire 0/D l'essai se fait sur la fraction 0/0,4,La valeur du bleu VB et granulométrie des fines permettent de déterminer le coefficient d'activité CA.

$$CA = \frac{VB(0/D)}{\%2\mu m}$$

Les ordres de grandeurs des valeurs du bleu des sols d'après philipponnat (1997) sont représentés dans le tableau 6

Chapitre IV : Présentations des matériaux utilisés

Tableau IV .5 : Quelques valeurs indicatrices du VBS (Classification des sol d'après philipponnat 1997)

La valeur du bleu (VBS)	Type de sol
VBS <0,2	Sols sableux (sol insensible à l'eau)
0,2< VBS <2,5	Sols limoneux (sol peu plastique et sensible à l'eau)
2,5< VBS <6	Sols limon-argileux, (sol de plasticité moyenne)
6< VBS <8	Sols argileux
8< VBS	Sols très argileux

Tableau IV.6 : Résultat de VBS pour les deux matériaux

N° mat	N° échantillon	VBS
Mat (1)	échantillon(1)	0,76
	échantillon(2)	0,59
Mat (2)	échantillon(1)	0,50
	échantillon(2)	0,50

On remarque que toutes les valeurs obtenues pour les deux matériaux sont dans la fourchette $0,2 < \text{VBS} < 2,5$ donc les fines des deux matériaux étudiés correspondent à des Sols limoneux (sol peu plastique et sensible à l'eau)

IV .3.2.4. Analyses chimiques

Les analyses chimiques sommaires effectuées sur les échantillons des deux matériaux ont montré les résultats portés dans le tableau 7

Tableau IV.7 : Résultante d'Analyse chimique

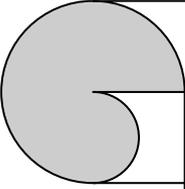
échantillon	Mat (1)		Mat (2)	
	échantillon(1)	échantillon(2)	échantillon(1)	échantillon(2)
Sulfates % SO_3^2	0,58	0,99	0,82	0,79
Carbonates % CaCO ₃	02	04	05	05
Insolubles %	93.2	92.1	92.5	93.4

IV .4. Conclusion :

Les résultats des différentes essais réalisés sur les échantillons prélevés des deux matériaux étudiée ont montré que ;

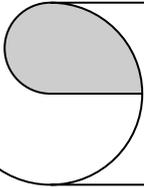
- Le matériau Mat 01 correspond à un sable grossier graveleux limoneux contenant une fraction fine peu plastique, il est classé selon la classification GTR en classe B4.

- Le matériau Mat 2 correspond à un sable grossier graveleux peu argileux contenant une fraction fine peu plastique, il est classé selon la classification GTR en classe B5.



Chapitre V:

*Étude au laboratoire de compactage
à faible teneur en eau*



V.1 . Introduction :

La méthode adoptée dans notre étude est basée sur l'étude de compactage des matériaux à différente teneur en eau et en changeant l'énergie de compactage.

V.2 . Présentation d'essai utilisé :

V.2.1 . Essai Proctor :

V.2.1.1. But de l'essai :

L'essai Proctor consisté à compacte dans un moule normalisée, avec énergie de compactage normalisée (dames de masse normalisée tombant d'une hauteur constant), pour but de déterminer la teneur en eau optimale pour un sol de remblai donné et des conditions de compactage fixées, qui conduit au meilleur compactage possible ou encore capacité portante maximale.

V.2.1.2. Principe de l'essai :

Le Principe de cet essai consiste à humidifier un matériau à plusieurs teneur en eau et à le compacter, pour chacune des teneur en eau, selon un procédé et une énergie conventionnel. Pour chacune des valeurs de teneur en eau considérées, on détermine la masse volumique sèche du matériau et on trace la courbe des variations de cette masse volumique en fonction de la teneur en eau. D'une manière générale cette courbe, appelée courbe Proctor, présente une valeur maximale de la masse volumique du matériau sec que est obtenue pour une valeur particulier de la teneur en eau .ce sont ces deux valeurs qui sont appelées caractéristique optimale de compactage Proctor Normal ou Modifié suivant l'essai réalisé.



Photo V.1 : Matériel nécessaire de Proctor Modifié



Photo V.2 : Bacs d'homogénéisation pour Préparation du matériau

V .2 .1 .3. Mode opératoire

- ❖ La préparation des échantillons
- ❖ Faire passer au tamis de diamètre 80mm
- ❖ Prendre 5,5 Kg de tamisât
- ❖ Ajouter une quantité d'eau mesurée au sol et homogénéiser le mélange
- ❖ Assembler moule + embase+ disque+ disque d'espacement +disque de papier au fond du moule.
- ❖ Remplir le moule en 5 couche en damant chacune au moyen de (56,60 ,70) coups
- ❖ Faire la pesée (sol +moule).
- ❖ Prélever à la fin de l'expérience un échantillon de la couche supérieure et un autre de celle du milieu afin de déterminer la teneur en eau .
- ❖ Reprendre l'expérience avec l'échantillon ayant précédemment servi et auquel il faudra ajouter parentage différent d'eau par de échantillon (5,5 Kg).



Photo V. 3 : Dame Proctor Electric

V .2 .2 . Essai CBR :

C'est un essai de poinçonnement d'une éprouvette de sol compacté suivant des conditions de densité et de teneur en eau fixées préalablement, il s'exprime par un chiffre CBR proportionnel à la force appliquée sur un piston s'enfonçant de 2,5 ou 5 mm dans le sol.

La valeur CBR chute très vite lorsque la compacité du sol diminue c'est un critère de portance d'un sol. [9]



Photo V. 4 : presse CBR



Photo V.5: échantillon qui donne dans la presse CBR

V .2 .2 .1. But de l'essai :

L'essai permet de déterminer la capacité de portance d'un sol compacté, en estimant sa résistance au poinçonnement, en fonction de son état, sa densité et son humidité, ainsi que les charges appliquées. Il mesure la résistance à l'effort tranchant d'un sol sous conditions d'humidité et de densité contrôlées et du niveau de compactage variable, en permettant d'obtenir un pourcentage du rapport de portance. Cet essai CBR est utilisé pour le dimensionnement des structures des chaussées et l'orientation des travaux de terrassements.

V .2 .2 .2. Matériel utilisés :

- Outils de test CBR comprenant:
- Moule de cylindre selon la méthode utilisée. Moule -
- La base de la boucle est manuelle ou mécanique.
- Marteau
- Outil de mesure avec indice de gonflement et poids.
- Machine de mesure de pression avec aiguille de pénétration installée.
- Balance - bacs - l'étude - la presse de CBR – chronomètre.

V.2.2.3. Principe de l'essai :

Les essais de CBR sont effectués sur des échantillons compactés avec une teneur en humidité optimale, obtenus à partir de l'essai de compactage Proctor. L'expression qui définit le CBR est la suivante :

- P = est la pression mesurée dans les sols du site [N / mm^2]
 - P_s = est la pression pour atteindre la pénétration égale sur sol standard [N / mm^2].
- L'équation représente le nombre CBR, qui représente le pourcentage de la charge unitaire standard. Dans la pratique, le symbole de (%) est enlevé et le rapport est représenté par un nombre entier.

Normalement le nombre CBR est basé sur le rapport de la charge pour une pénétration de 2,5 mm (0,1 pouces), cependant si la valeur de CBR à une pénétration de 5mm (0,2 pouces) est supérieure, l'essai doit être répété. Si, au cours du deuxième essai, la valeur CBR dépasse les 5 mm de pénétration, cette valeur pourra être acceptée.

Avant la détermination de la résistance à la pénétration, les éprouvettes peuvent être saturées d'eau pendant 96 heures pour simuler les conditions de travail les plus défavorables et pour déterminer sa possible expansion. Dans la plupart des cas, 3 et 6 éprouvettes au moins sont confectionnées, auxquelles sont appliquées différentes énergies de compaction (56, 60 et 70 de coups). Le sol doit avoir une petite quantité de matériel passant par le tamis de 50 mm et une retenue dans le tamis de 20 mm inférieure ou égale à 20%.

Le comportement du sol est différent en fonction du degré d'altération (inaltéré ou altéré), sa granulométrie et les caractéristiques physiques (granulaires, fins et peu plastique). Donc, la méthode à suivre dans chaque cas pour la détermination du CBR est différente.

Détermination du CBR pour sols perturbés et remoulés graviers et sables sans cohésion sols cohésifs, peu plastiques et pas expansifs sols cohésifs et expansifs -Détermination du CBR de sols inaltérés -Détermination du CBR in-situ -Équilibrer et sécher le four.



Photo V. 6: préparé échantillon avons passé de presser CBR



Photo V.7 : les échantillons qui après passent de presse CBR

V .3. Présentation des résultats :

V .3.1. Influence de la teneur en eau sur la densité :

V .3.1.1. Compactage selon le protocole de l'essai Proctor modifié (56coups)

Deux échantillons de chaque matériau ont été soumis aux essais Proctor pour déterminer la densité sèche max à différente teneur en eau.

Les résultats obtenus sont présenté dans la figure 1et2 et tableau 1et2

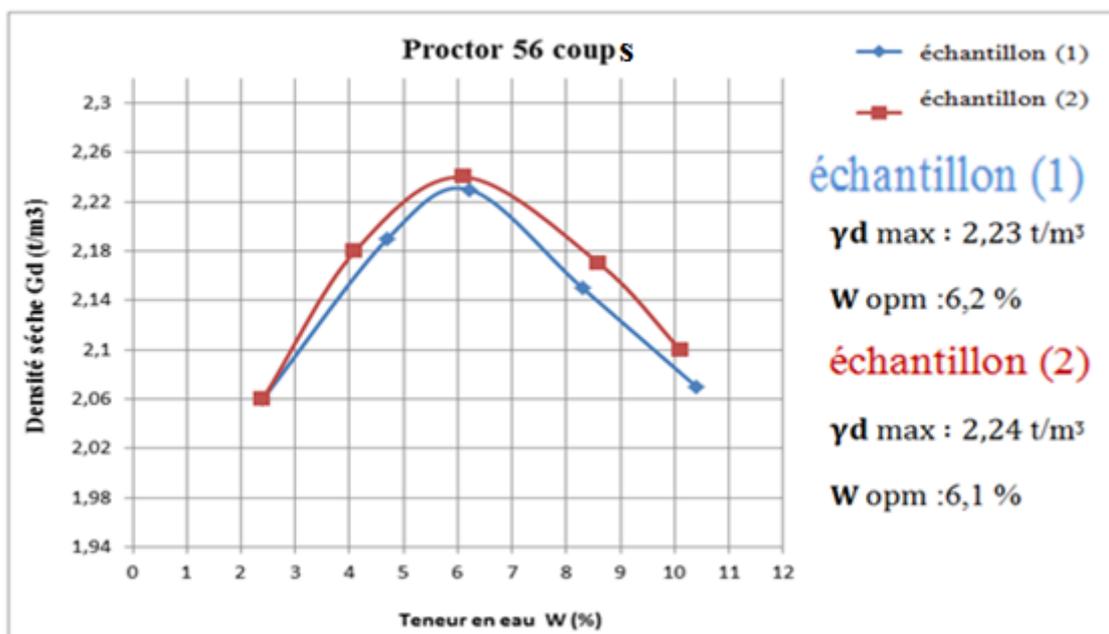


Figure V.1: courbe Proctor Modifiée 56 coups avec les (2%,4%, 6%,8%,10%) d'eau Pour Mat(1)

Tableau V.1 : Résultats des mesures pour Mat (1) avec 56 coups

Echantillon	échantillon (1)					échantillon (2)				
	W(%)	2,4	4,7	6,2	8,3	10,4	2,4	4,1	6,1	8,6
Densité (T/m3)	2,06	2,19	2,23	2,15	2,07	2,06	2,18	2,24	2,17	2,10

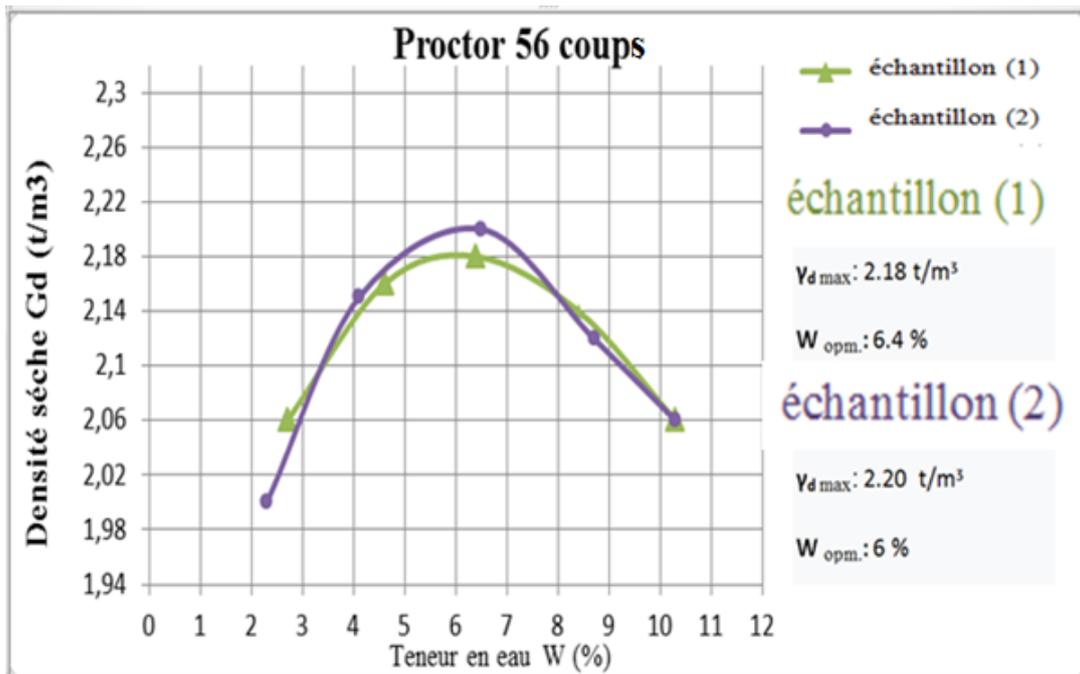


Figure V. 2: courbe Proctor Modifiée 56 coups avec les (2%,4%, 6%,8%,10%) d'eau Pour Mat (2)

Tableau V. 2 : Résultats des mesures pour Mat (2) avec 56 coups

Echantillon	échantillon (2)					échantillon (2)				
W(%)	2,7	4,6	6,4	8,4	10,3	2,3	4,1	6	8,7	10,3
Densité (T/m3)	2,06	2,16	2,18	2,14	2,05	2,00	2,15	2,20	2,12	2,06

Ces résultats montrent ce qui suit:

- La densité sèche max pour le Mat (1) est entre (2,23 et 2,24) t/m³

Pour le Mat (2) et entre (2,18 et 2,20) t/m³

- La densité sèche max pour les deux matériaux a été obtenue pour une teneur en eau 6,1 et 6,2 pour Mat (1)
6,0 et 6,4 pour Mat (2)

On remarque que la teneur en eau qui a donné les densités MAX est relativement faible
Les densités sèches obtenues pour des faibles teneur en eau (2%) sont de ordre de 2,06 t/m³
Pour matériau (1) et entre (2,0 et 2,06) t/m³ pour Mat (2)

- A une teneur en eau 2% on trouve une chute de 8% de la densité pour Mat (1) et 6% Pour Mat (2)

V .3.1.2. Compactage en changeant l'énergie de compactage augmenté :

a) Energie 60 coups /couche

Les deux matériaux ont été compacté à faible teneur en eau (1%,2%,4%) avec une énergie de Compactage de l'ordre de 60 coups (couche) les résultats obtenu son présentés don las figures (V.3etV.4) et les tableaux (V.3etV.4) .

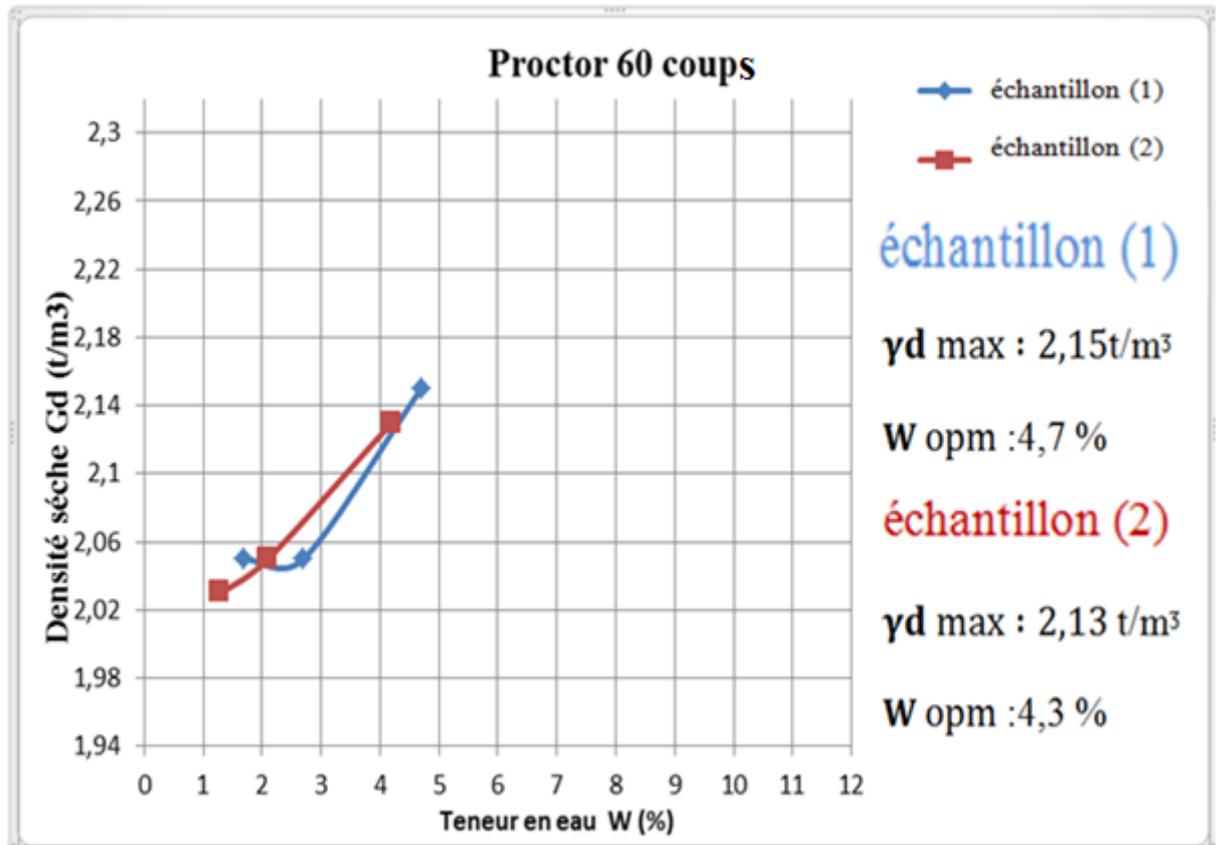


Figure V.3: courbe Proctor Modifiée 60 coups avec les (1%,2%, 4%) d'eau Pour Mat (1)

Tableau V. 3 : Résultats des mesures pour Mat(1) avec 60 coups

Echantillon	échantillon (1)			échantillon(2)		
	W(%)	1,7	2,7	4,7	1,3	2,1
Densité (T/m ³)	2,05	2,05	2,15	2,03	2,05	2,13

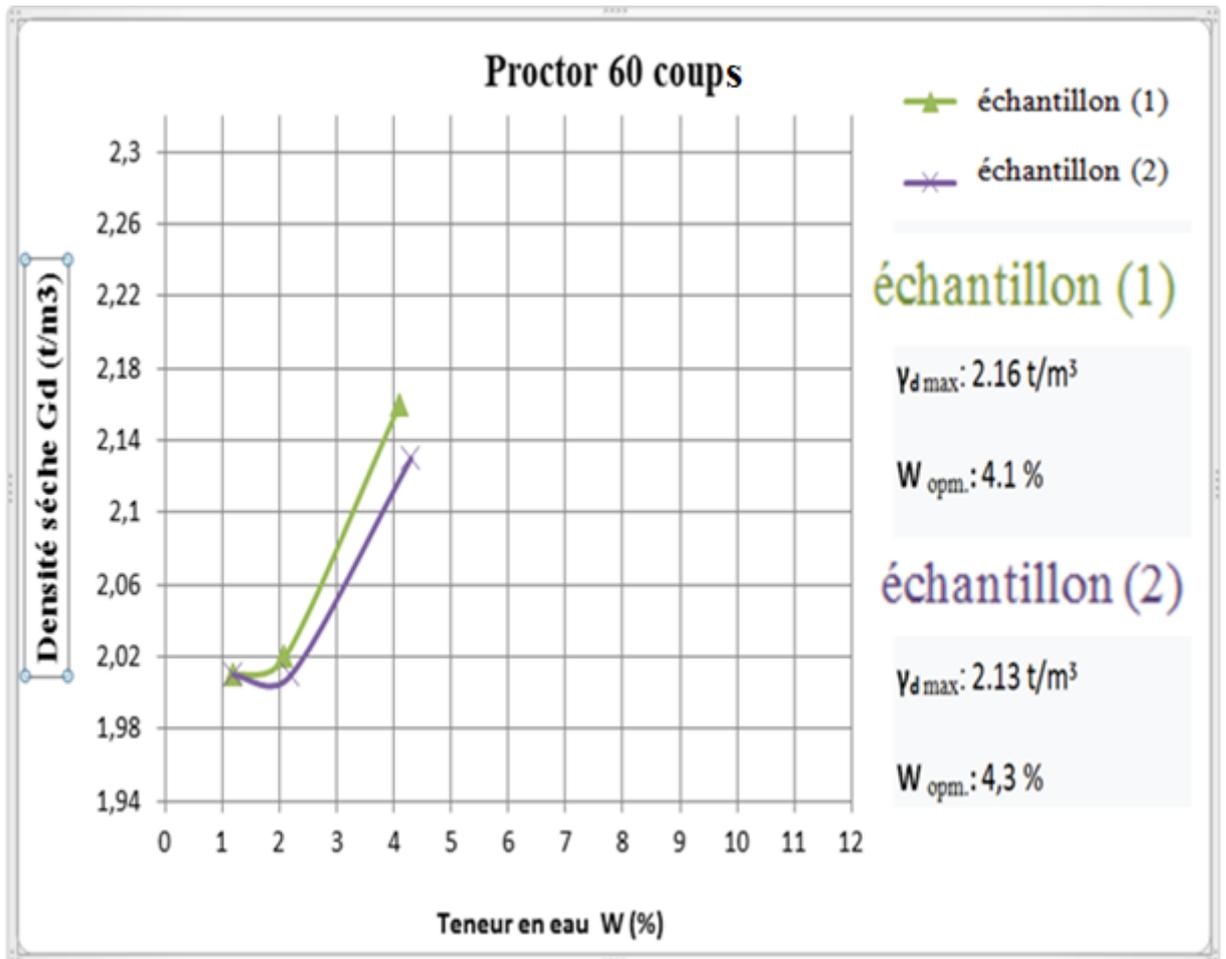


Figure.V.4: courbe Proctor Modifiée 60 coups avec les (1%,2%, 4%) d'eau Pour Mat (2)

Tableau. V. 4 : Résultats des mesures pour Mat(2) avec 60 coups

Echantillon	échantillon (1)			échantillon (2)		
	W(%)	Densité (T/m3)	W(%)	Densité (T/m3)	W(%)	Densité (T/m3)
	1,2	2,01	2,1	2,02	4,1	2,16
	1,2	2,01	2,2	2,01	4,3	2,13

b) Energie 70 coups /couche

Les deux matériaux ont été compacté à faible teneur en eau (1%,2%,4%) avec une énergie de Compactage de l'ordre de 70 coups /couche les résultats obtenu son présentés don la figure (V.5etV.6) et le tableau (V.5 etV.6)

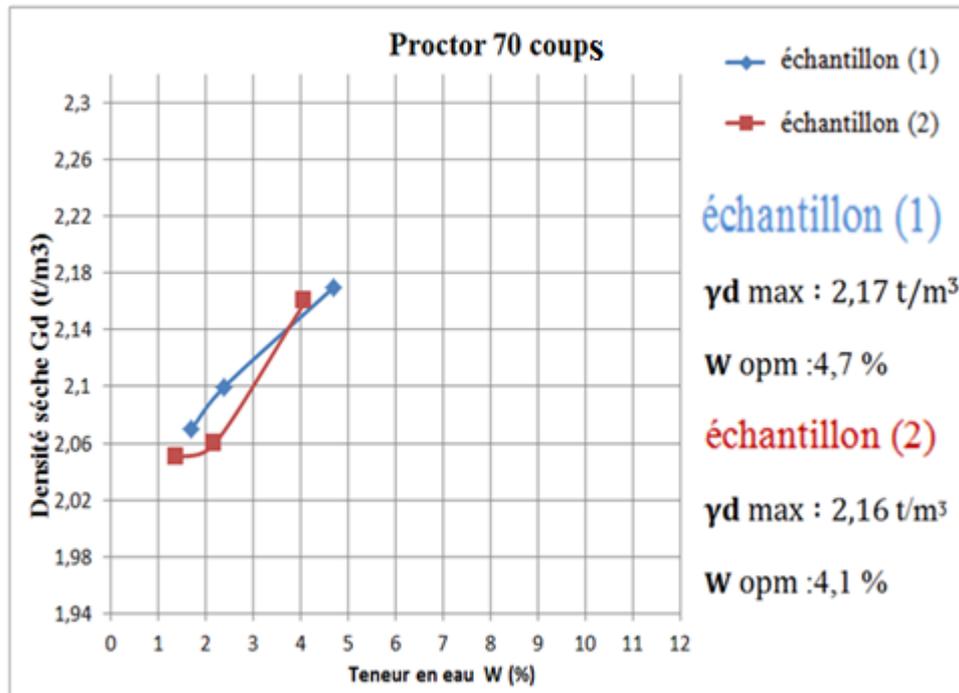


Figure V.5: courbe Proctor Modifiée 70 coups avec les (1%,2%, 4%) d'eau Pour Mat (1)

Tableau V.5 : Résultats des mesures pour Mat(1) avec 70 coups

Echantillon	échantillon (1)			échantillon (2)		
W(%)	1,7	2,4	4,7	1,4	2,2	4,1
Densité (T/m3)	2,07	2,10	2,17	2,05	2,06	2,16

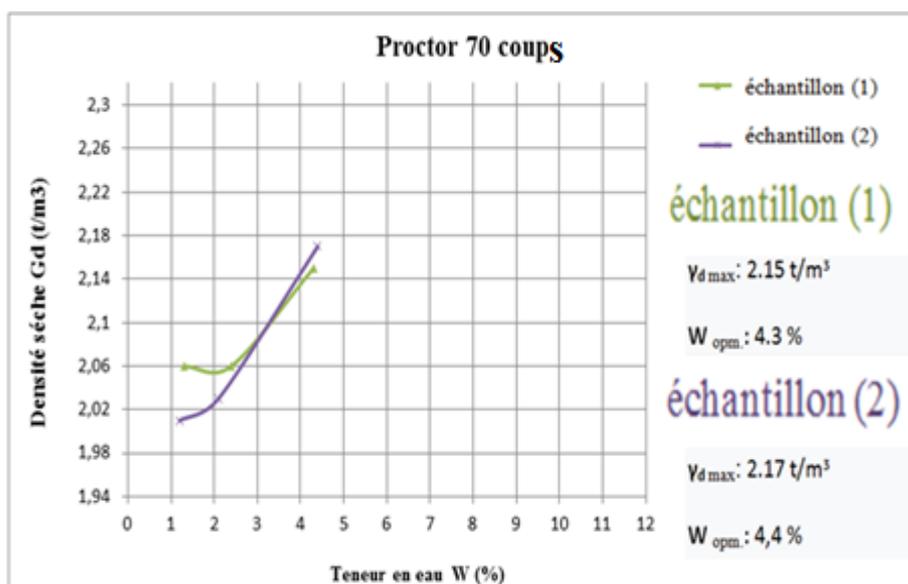


Figure V. 6: courbe Proctor Modifiée 70 coups avec les (1%,2%, 4%) d'eau Pour Mat (2)

Tableau V.6 : Résultats des mesures pour Mat (2) avec 70 coups

Echantillon	échantillon (1)			échantillon (2)		
W(%)	1,7	2,4	4,7	1,4	2,2	4,1
Densité (T/m3)	2,07	2,10	2,17	2,05	2,06	2,16

V.3.2. Etude d'évolution de la densité sèche en fonction de l'énergie de compactage :

Les tableaux (V.7 et V.8) montrent l'évolution de la densité en fonction de l'énergie de compactage

Tableau V.7 : l'évolution de la densité en fonction de l'énergie de compactage pour Mat (1)

W(%)	Densité			% / γ max Proctor		
	Proctor (56coups)	60 coups	70 coups	56 coups	60 coups	70 coups
1%	-	2,05	2,07	-	91	92
		2,03	2,05		90	91
2%	2,06	2,05	2,10	92	91	94
	2,06	2,05	2,06	91	91	92
4%	2,19	2,15	2,17	98	96	97
	2,18	2,13	2,16	97	95	96
6%	2,23	-	-	-	-	-
	2,24					
8%	2,15	-	-	-	-	-
	2,17					
10%	2,07	-	-	-	-	-
	2,10					
OPM	2,23					
	2,24					

Chapitre V : Étude au laboratoire de compactage à faible teneur en eau

On remarque que

- On peut atteindre 91% de la densité sèche maximale avec une teneur en eau faible (2%) lorsqu'on a augmenté l'énergie de compactage à 60 coups /coche
- On peut atteindre 92% et 94% de la densité sèche maximale avec une teneur en eau faible (2%) lorsqu'on a augmenté l'énergie de compactage à 70 coups /coche

Tableau v.8 : l'évolution de la densité en fonction de l'énergie de compactage pour Mat (2)

W(%)	Densité			% / γ max Proctor		
	Proctor (56coups)	60 coups	70 coups	56 coups	60 coups	70 coups
1%	-	2,01	2,07	-	92	94
		2,01	2,05		91	93
2%	2,06	2,02	2,10	94	92	96
	2,00	2,01	2,06	90	91	93
4%	2,16	2,16	2,17	99	99	99
	2,15	2,13	2,16	97	96	98
6%	2,18	-	-	-	-	-
	2,20					
8%	2,14	-	-	-	-	-
	2,12					
10%	2,05	-	-	-	-	-
	2,06					
OPM	2,18					
	2,20					

Chapitre V : Étude au laboratoire de compactage à faible teneur en eau

On remarque que :

- ✚ On peut atteindre 91% et 92% de la densité séchés maximale avec une teneur en eau faible (2%) lorsqu'a augmenté l'énergie de compactage à 60 coups /coche.
- ✚ On peut atteindre 93% et 96% de la densité séchés maximale avec une teneur en eau faible (2%) lorsqu'a augmenté l'énergie de compactage à 70 coups /coche.

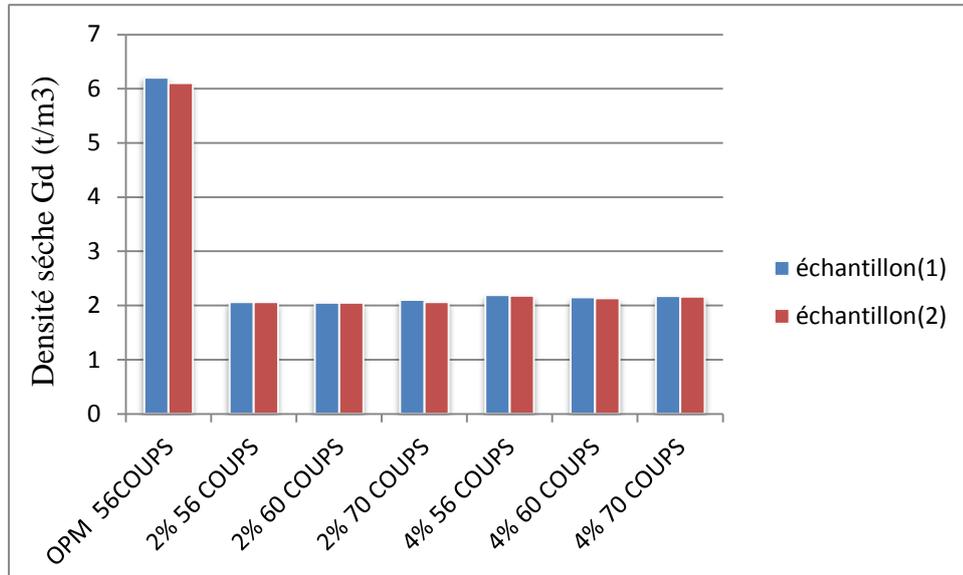


Figure V.7 : comparaison la Proctor normal et Proctor pour (60,70) coupe et (2%,4%) d'eau avec Densité pour Mat (1)

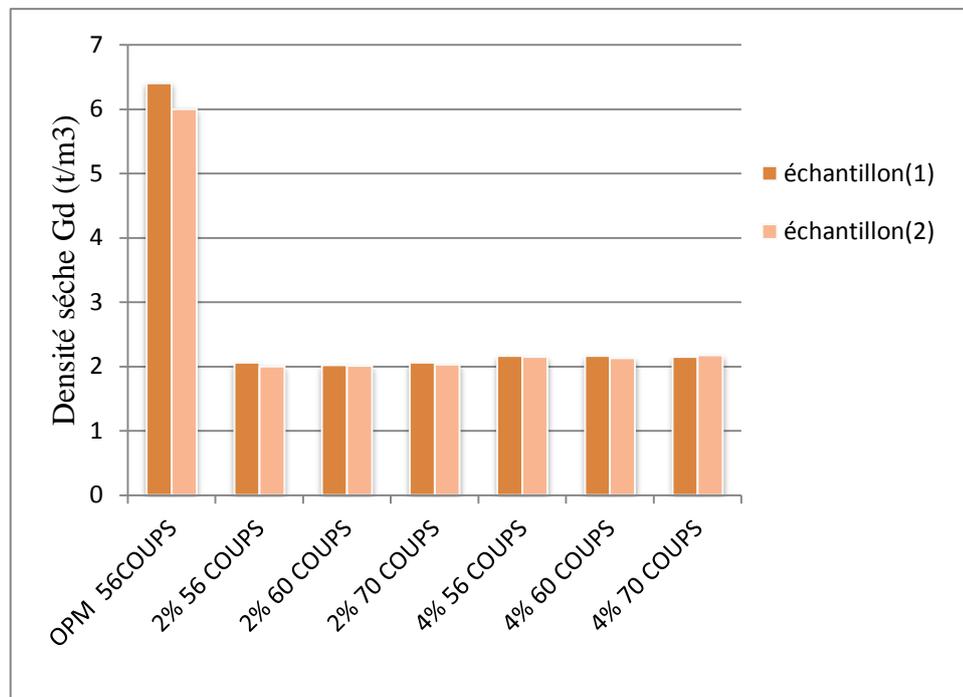


Figure V.8 : comparaison la Proctor normal et Proctor pour (60,70) coupe et (2%,4%) d'eau avec Densité pour Mat (2)

V .3 .3. Influence de la teneur en eau sur l'indice Portant (CBR) :

V .3 .3.1 Compactage selon le Protocole modifié de l'essai Proctor modifié (56coups)

Les deux matériaux étudiées ont été soumis aux essais de poinçonnement selon la norme de m »essai CBR pour déterminer l'indice portant à différent teneur en eau.

Les résultats obtenus sont portés dans les figures IV 9, IV10, IV11, I V12

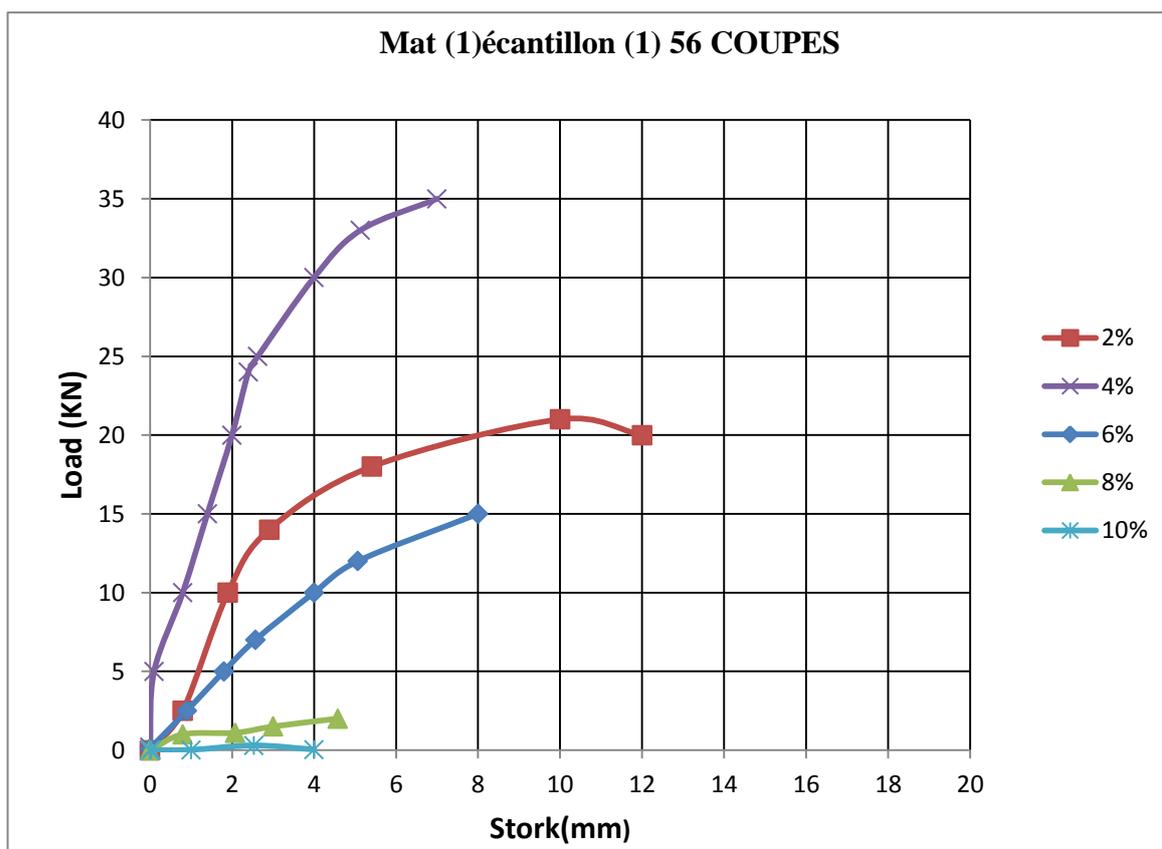


Figure V.9 : courbe CBR IPI pour 56 coups Mat (1) échantillon (1)

Tableau V .9 : valeur index CBR Mat (1) échantillon (1) pour 56 coups

Eau %	2%	4%	6%	8%	10%
Index	109,37	200,53	60,42	8,00	2,22

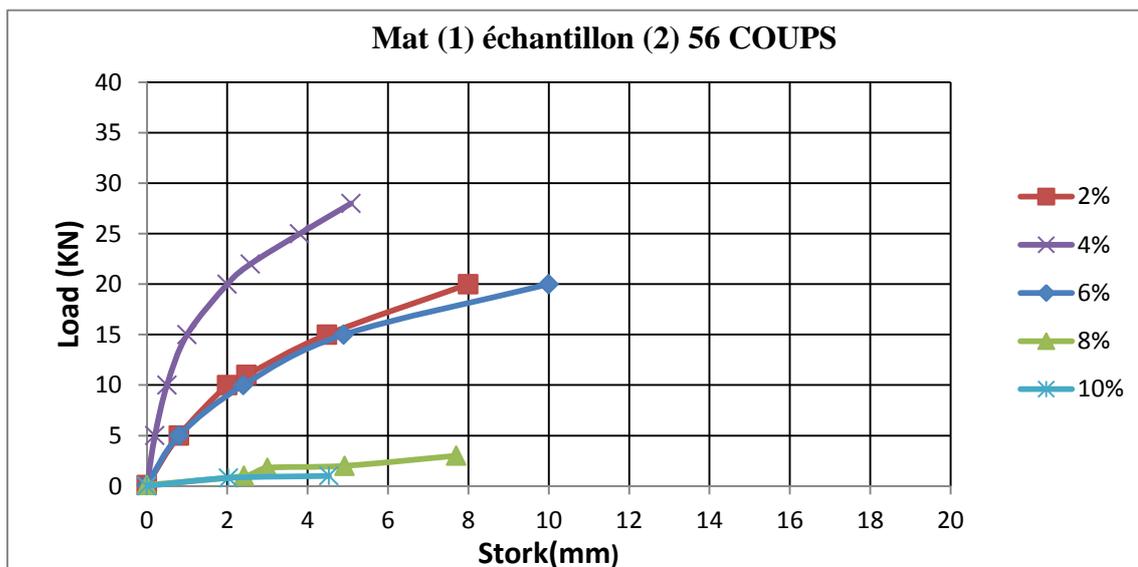


Figure V.10 : courbe CBR IPI pour 56 coups Mat (1) échantillon (2)

Tableau V.10: valeur index CBR Mat (1) échantillon (2) pour 56 coups

Eau %	2%	4%	6%	8%	10%
Index	82,44	158,58	81,06	10,41	3,89

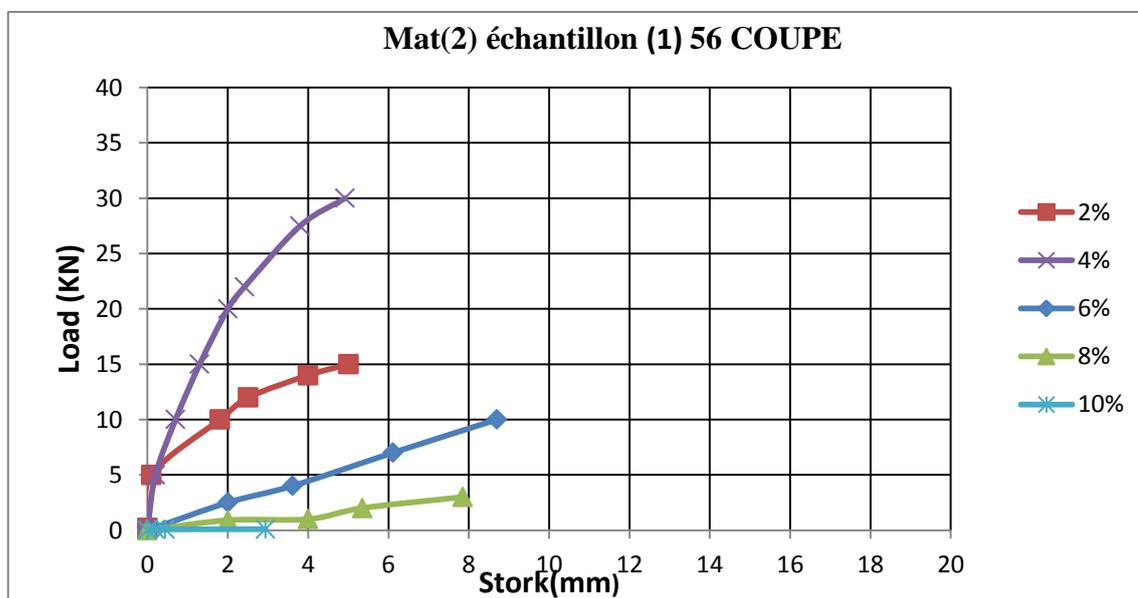


Figure V.11 : courbe CBR IPI pour 56 coups Mat (2) échantillon (1)

Tableau V.11 : valeur index CBR Mat(2) échantillon (1) pour 56 coups

Eau %	2%	4%	6%	8%	10%
Index	89,01	159,99	31,52	10,07	1,69

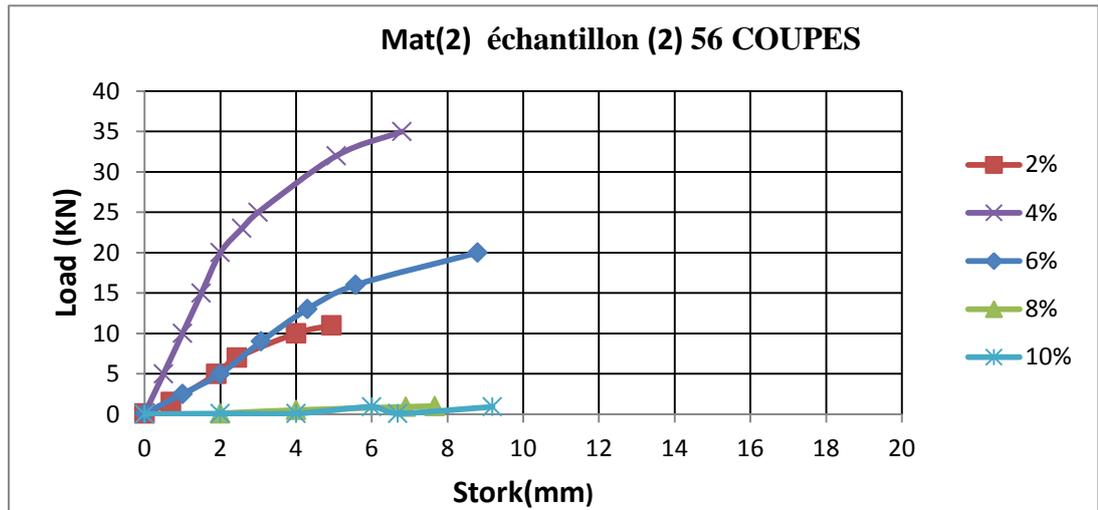


Figure V.12: courbe CBR IPI pour 56 coups Mat (2) échantillon (2)

Tableau V .12 : valeur index CBR Mat(2) échantillon (2) pour 56 coups

Eau %	2%	4%	6%	8%	10%
Index	58,13	158,55	77,15	5,56	3,64

V .3 .3.2. Compactage en chateau l'énergie de compactage augmenté :

a) Pour 60coups

Les deux matériaux compactés avec une énergie de compactage 60coups ont été soumis de poinçonnent immédiat pour déterminer leurs indice portant CBR les résultats obtenue sont les figure V 13, V 14, V15, V16

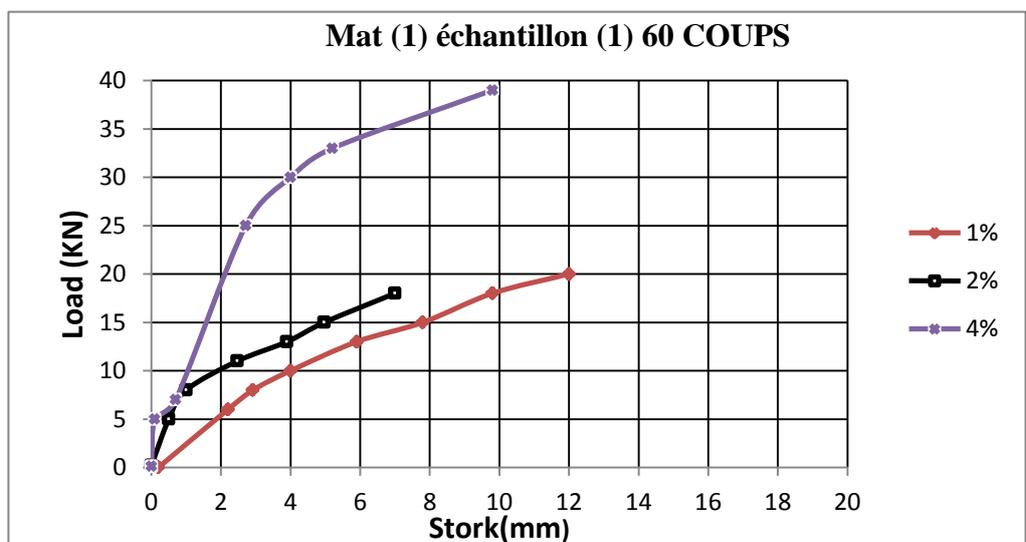
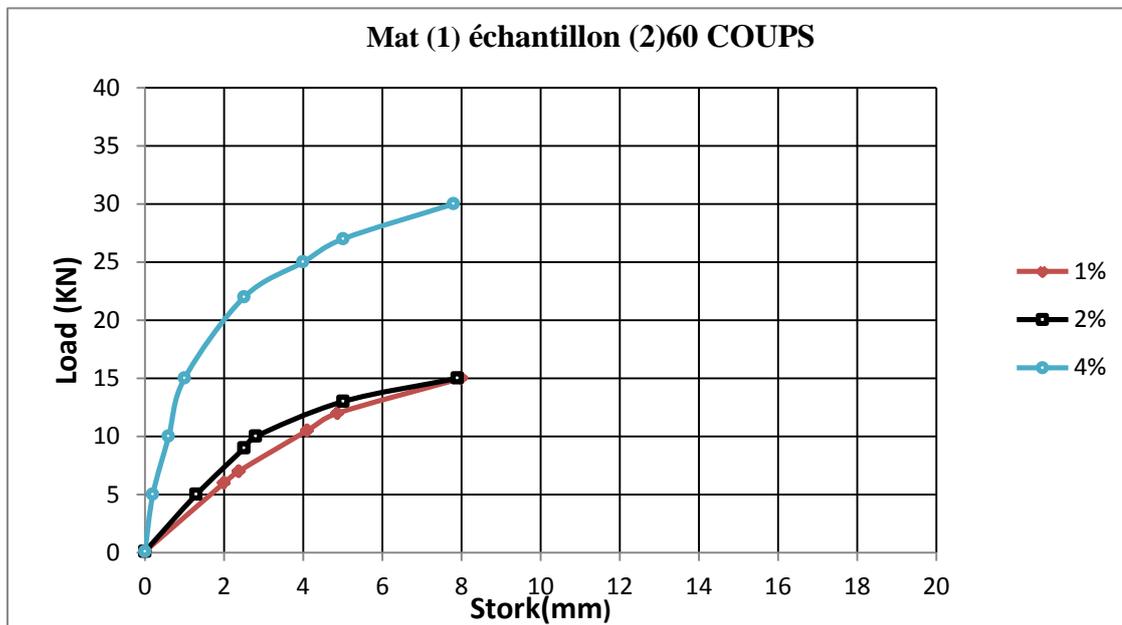


Figure V.13 : courbe CBR IPI pour 60coups Mat (1) échantillon (1)

Tableau V.13 : valeur index CBR Mat (1) échantillon (1) pour 60 coups

Eau %	1%	2%	4%
Index	67,53	80,06	193,53



Figur.V.14 : courbe CBR IPI pour 60coups Mat (1) échantillon(2)

Tableau V .14 : valeur index CBR Mat (1) échantillon (2) pour 60 coups

Eau %	1%	2%	4%
Index	54,36	64,11	145,61

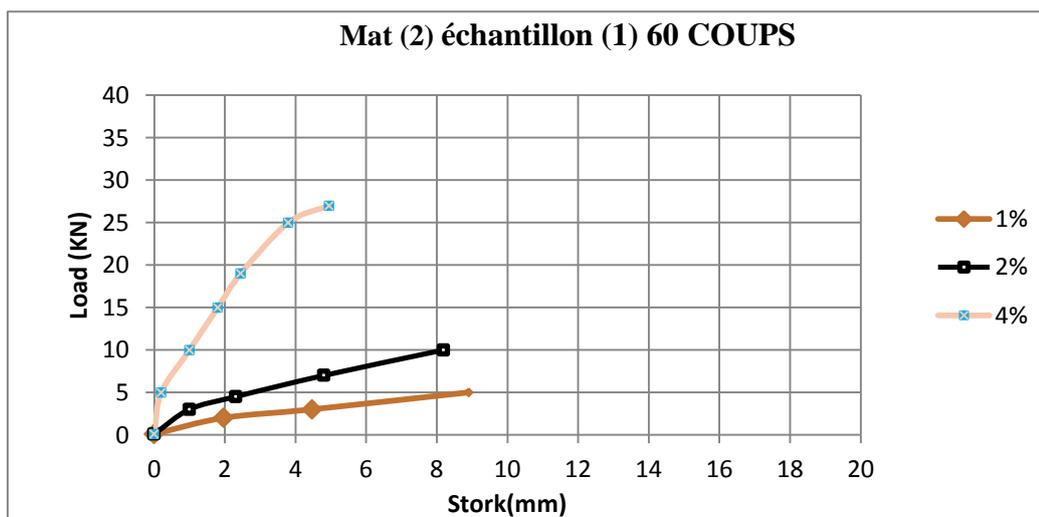
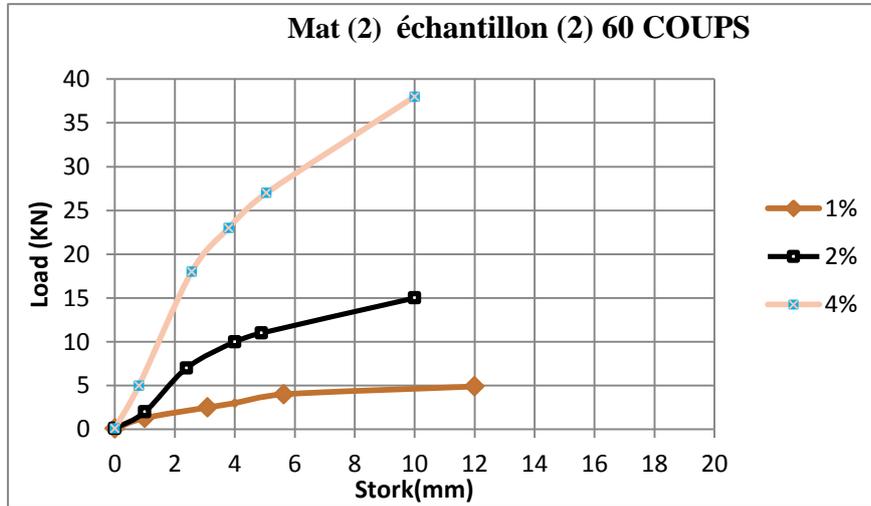


Figure V.15 : courbe CBR IPI pour 60 coups Mat (2) échantillon(1)

Tableau V .15 : valeur index CBR Mat (2) échantillon(1) pour 60 coups

Eau %	1%	2%	4%
Index	14,70	31,01	139,34



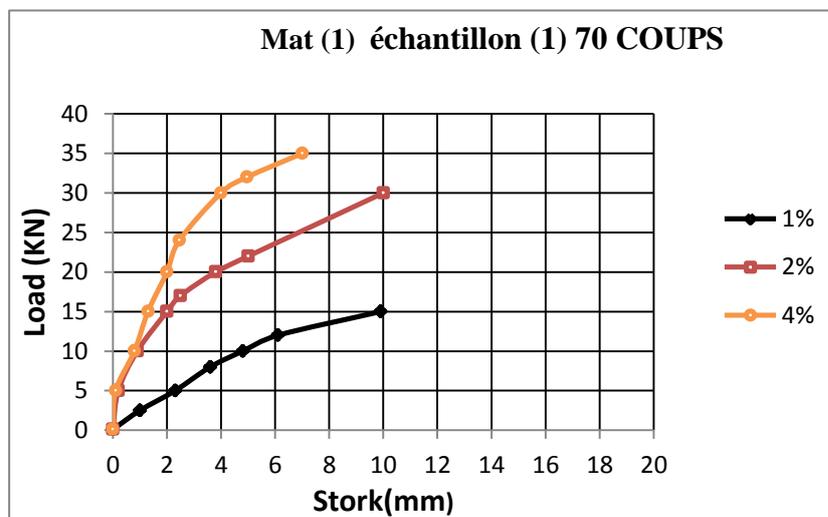
Figur.V.16 : courbe CBR IPI pour 60 coups Mat (2) échantillon(2)

Tableau V.16 : valeur index CBR Mat (2) échantillon(2) pour 60 coups

Eau %	1%	2%	4%
Index	15,96	52,81	131,60

B) Pour 70coups

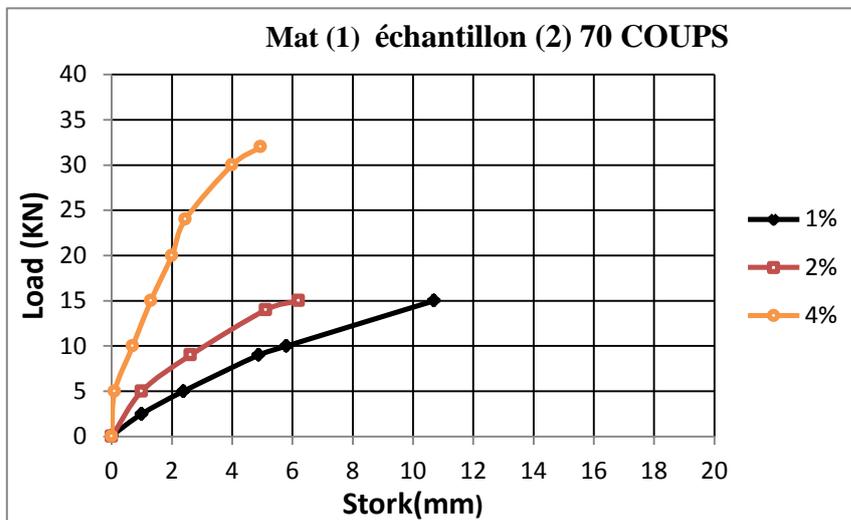
Les deux matériaux compactés avec une énergie de compactage 70coups ont été soumis de poinçonnent immédiat pour déterminer leurs indice portant CBR les résultats obtenue sont les figer VI 17, VI 18, VI 19, VI 20



Figur V.17 : courbe CBR IPI pour 60 coups Mat (1) échantillon (1)

Tableau V .17 : valeur index CBR Mat (1) échantillon(1) pour 70 coups

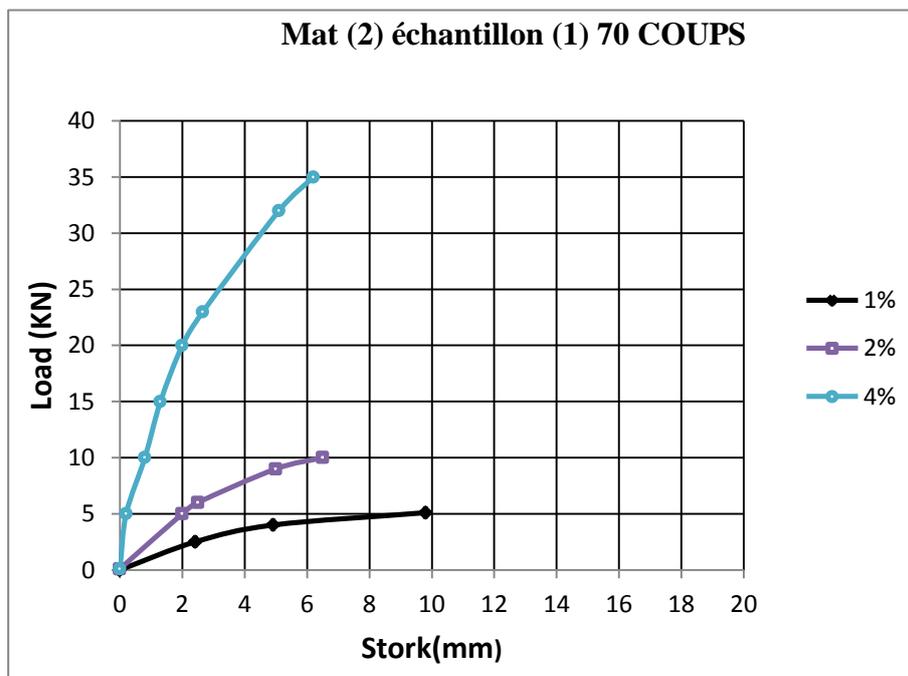
Eau %	1%	2%	4%
Index	59,10	127,27	163,18



Figur.V.18 : courbe CBR IPI pour 70coups Mat (1) échantillon(2)

Tableau V .18 : valeur index CBR Mat (1) échantillon(2) pour 70 coups

Eau %	1%	2%	4%
Index	39,65	68,76	177,36



Figur V.19 : courbe CBR IPI pour 70 coups Mat (2) échantillon (1)

Tableau V .19 : valeur index CBR Mat (2) échantillon (1) pour 70 coups

Eau %	1%	2%	4%
Index	16,72	43,35	155,81

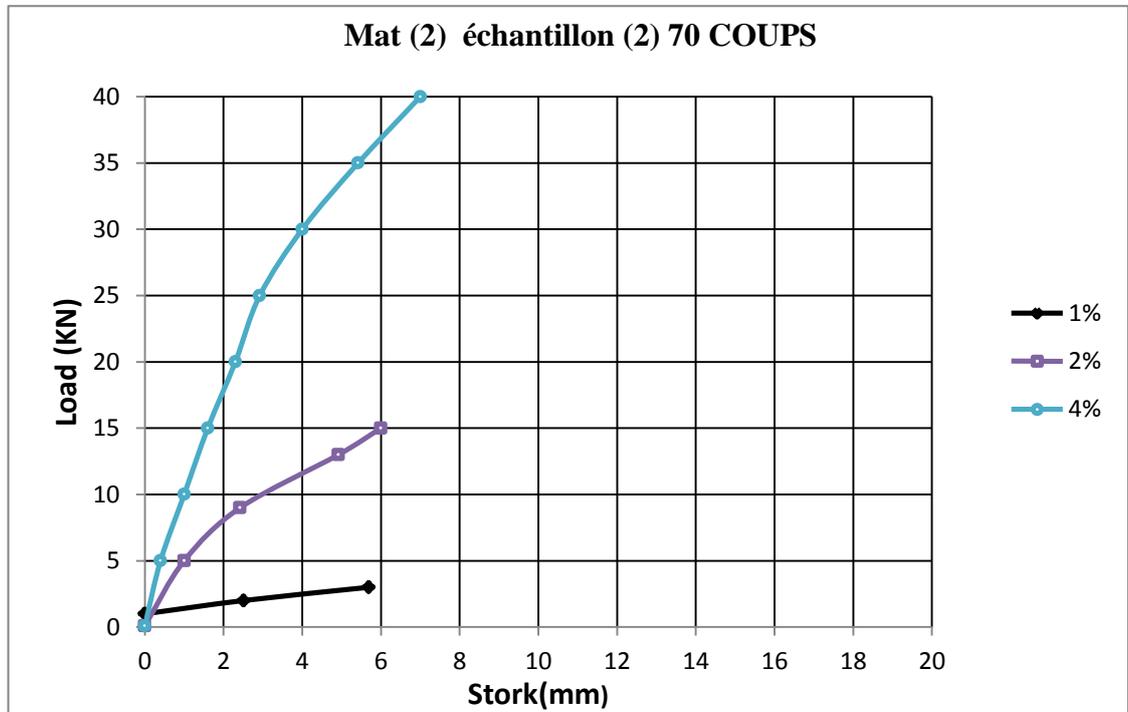


Figure V.20 : courbe CBR IPI pour 70 coups Mat (2) échantillon (2)

Tableau V .20 : valeur index CBR Mat (2) échantillon (2) pour 70 coups

Eau %	1%	2%	4%
Index	12,66	65,37	191,20

V .3.4. Etude Influence de la Index CBR en fonction de l'énergie de compactage :

Les tableaux (V21 et V22) montrent l'évolution de la densité en fonction de l'énergie de compactage.

Chapitre V : Étude au laboratoire de compactage à faible teneur en eau

Tableau V.21 : l'évolution de la densité en fonction de l'énergie de compactage pour Mat (1)

W(%)	Index CBR			% /CBR (OPM)		
	Proctor (56coups)	60 coups	70 coups	56 coups	60 coups	70 coups
1%		67,53	59,10	-	71	62
	-	54,36	39,65		56	41
2%	109,37	80,06	127,27	116	85	135
	82,44	64,11	68,76	86	67	72
4%	200,53	193,53	163,18	213	205	173
	158,58	145,61	177,36	166	152	185
6%	60,42	-	-	-	-	-
	81,06					
8%	8,00	-	-	-	-	-
	10,41					
10%	2,22	-	-	-	-	-
	3,89					
I CBR(OPM)	94,01					
	95,50					

Chapitre V : Étude au laboratoire de compactage à faible teneur en eau

Tableau V.22 : l'évolution de la densité en fonction de l'énergie de compactage pour Mat (2)

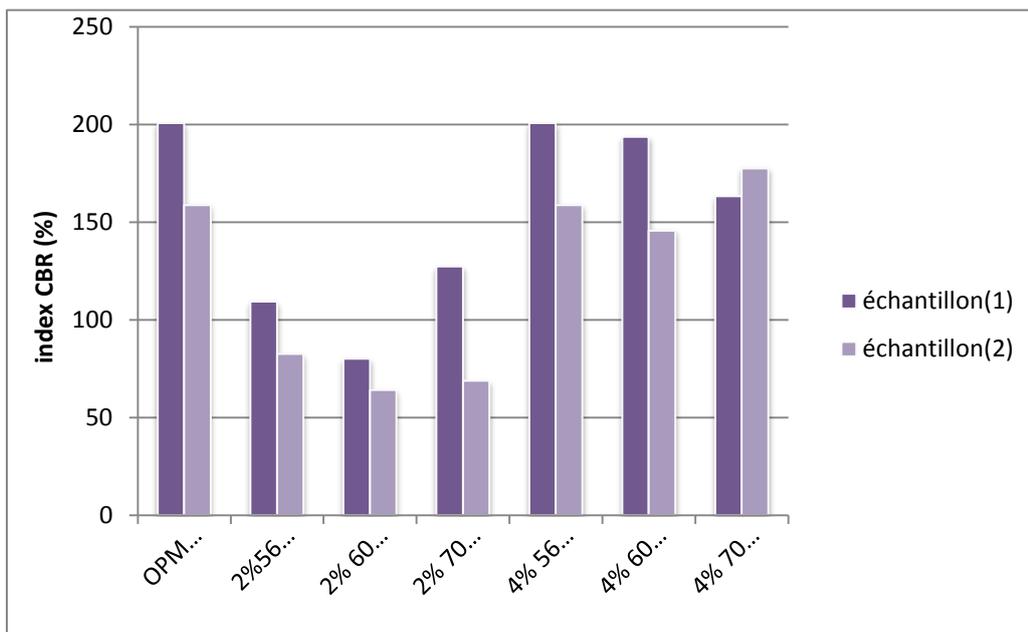
W(%)	Index CBR			% /CBR (OPM)		
	Proctor (56coups)	60 coups	70 coups	56 coups	60 coups	70 coups
1%		14,70	16,72		19	22
	-	15,96	12,66	-	15	41
2%	89,1	31,01	43,35	117	40	57
	58,13	52,81	65,37	55	50	62
4%	159,99	139,34	155,81	210	183	205
	158,55	131,60	191,20	151	125	182
6%	31,52	-	-			
	77,15			-	-	-
8%	10,07	-	-			
	5,56			-	-	-
10%	1,69	-	-			
	3,64			-	-	-
I	75,84					
CBR(OPM)	104,98					

Pour le tableau 21 on remarque On remarque que

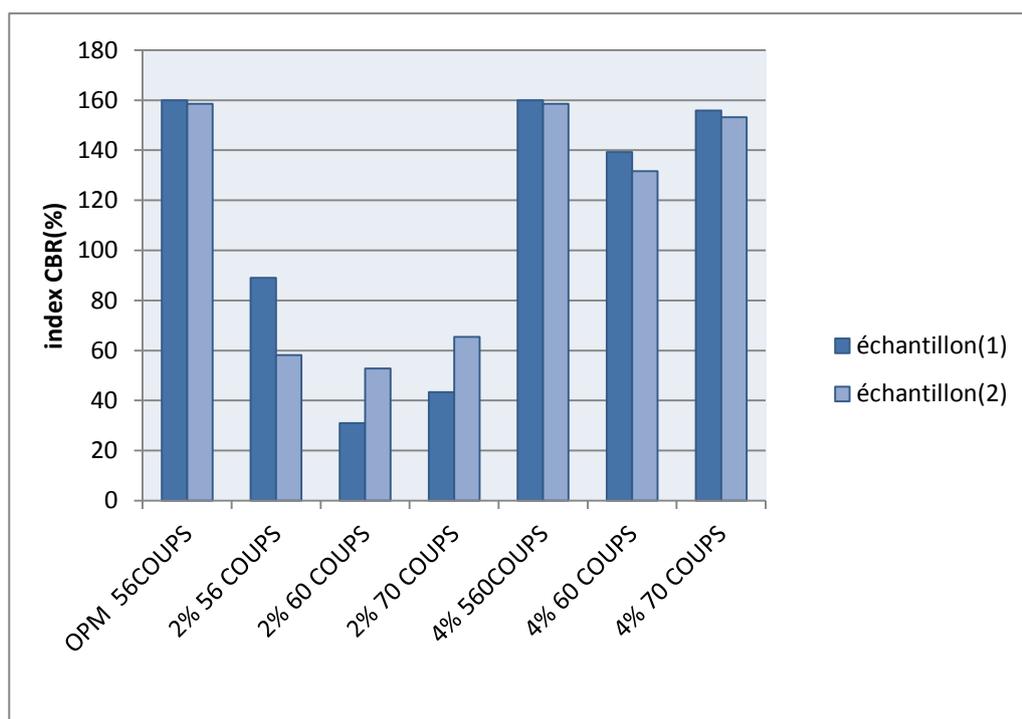
- On peut atteindre 67%,85%de la densité séchés maximale avec une teneur en eau faible (2%) lorsqu'a augmenté l'énergie de compactage à 60coups /coche
- On peut atteindre 72% et 153%de la densité séchés maximale avec une teneur en eau faible (2%) lorsqu'a augmenté l'énergie de compactage à 70coups /coche

Pour le tableau 22 on remarque On remarque que

- On peut atteindre 40%,50%de la densité séchés maximale avec une teneur en eau faible (2%) lorsqu'a augmenté l'énergie de compactage à 60coups /coche
- On peut atteindre 57% et 62%de la densité séchés maximale avec une teneur en eau faible (2%) lorsqu'a augmenté l'énergie de compactage à 70coups /coche



Figur V.21: index CBR pour Mat (1)



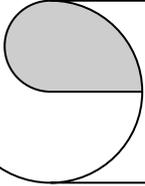
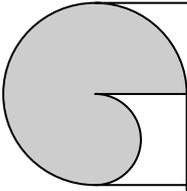
Figur V.22: index CBR pour Mat (2)

V.4 .Conclusion :

On remarque ce qui suit :

- On peut atteindre des densités supérieures à 90% de la densité sèche maximale pour des faibles teneurs en eau si on augmente l'énergie de compactage de 7%
- On peut atteindre de 93% jusque 96% de densité sèche maximale pour des faibles teneur en eau (1% et 2%) si on augmente l'énergie de compactage de 25%.
- On compactant à faibles teneurs en eau on peut atteindre des indices portants supérieurs à 56% de celle obtenu en compactant à l'optimum Proctor lorsque l'énergie de compactage est augmentée de 7%.
- On compactant faibles teneur en eau on peut atteindre des indices portants supérieurs à 62% de celle obtenu en compactant à l'optimum Proctor lorsque l'énergie de compactage est augmentée de 25%.

En conclusion on peut dire qu'on peut atteindre des bonnes performances en compactant à faibles teneurs en eau si on améliore les conditions de compactage (augmentation de l'énergie).



Conclusion générale

CONCLUSION GÉNÉRALE

L'objectif principal de ce mémoire était l'étude de compactage des matériaux à faibles teneurs en eau.

L'étude bibliographique nous a permis de découvrir les différentes techniques de compactage, les caractéristiques du sol améliorées par le compactage ainsi que les facteurs qui peuvent influencer le compactage des sols, nous avons aussi présenté les méthodes d'étude et de contrôle de compactage au laboratoire et in situ.

L'étude expérimentale a été faite au laboratoire, elle a consisté à la détermination de certaines caractéristiques physiques et mécaniques des matériaux compactés à différentes teneurs en eau et à différentes énergies, les résultats obtenus ont permis de comparer les caractéristiques obtenues à différentes teneurs en eau et à différentes énergies de compactage ; Les caractéristiques mesurées dans la présente étude sont : la densité sèche γ et l'indice portant I_{CBR} .

Deux matériaux ramenés de la région d'Ilizi au sud du pays ont fait l'objet des essais au laboratoire.

Les résultats obtenus ont montré que :

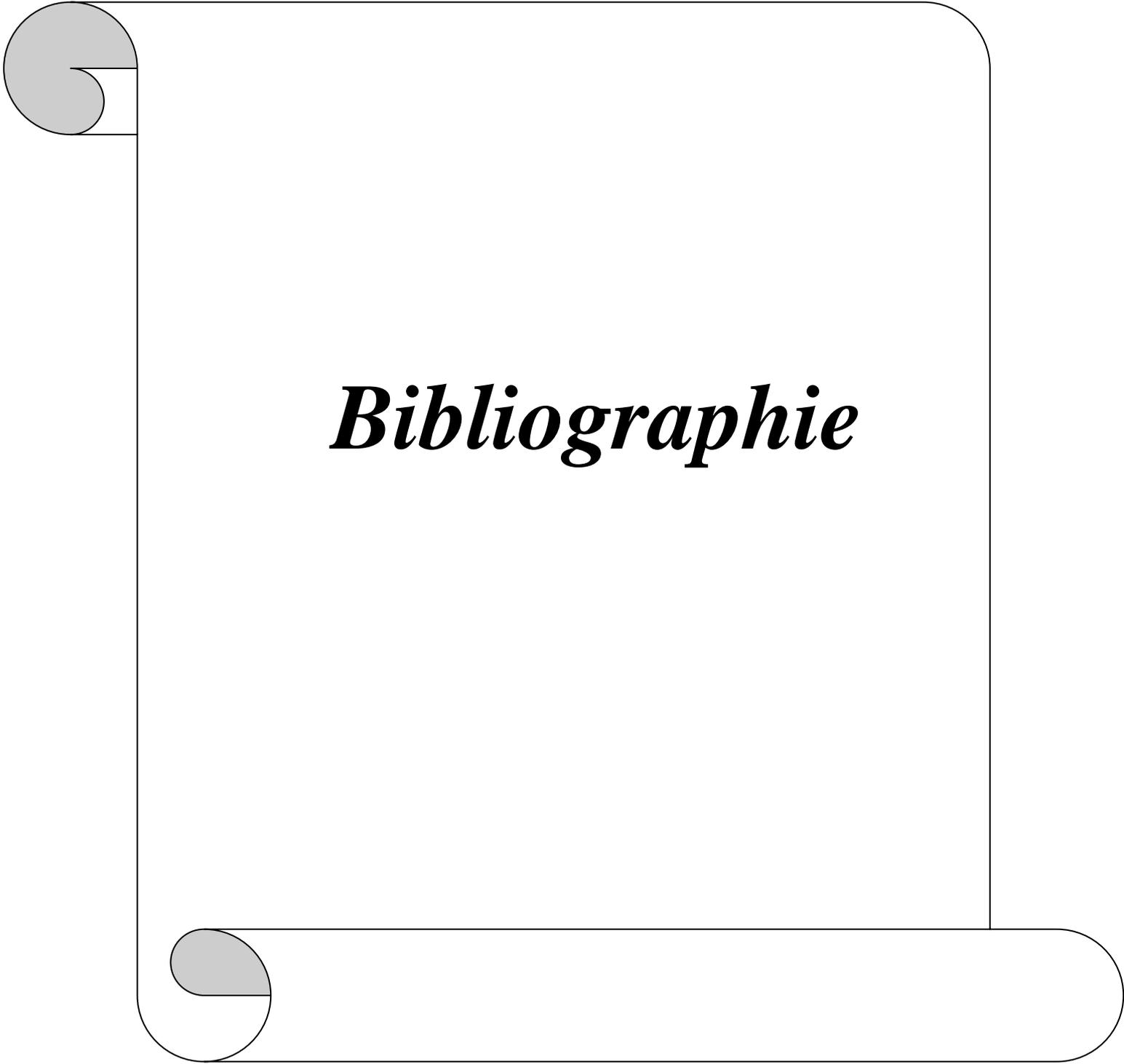
- On peut atteindre en compactant à faibles teneur en eau avec une légère augmentation de l'énergie de compactage, des densités qui dépassent 90% de la densité optimale ;
- On peut obtenir des densités supérieures à 93 % de la densité optimale, et cela à faibles teneurs en eau mais avec une augmentation de 25% de l'énergie de compactage.
- On peut obtenir des indices de portances acceptables (> 50) lorsqu'on compacte les matériaux à faibles teneurs en eau avec augmentation de l'énergie de compactage.

Ces résultats nous encouragent à dire qu'il est possible de compacter les sols sans utiliser l'eau ou à la rigueur compacter avec des faibles quantités d'eau, en assurant le respect strict des autres paramètres de compactage tels que l'énergie et le mode de mise en œuvre, d'autres facteurs liés à la nature du matériau peuvent faciliter l'opération de compactage à faibles teneur en eau.

Pour une meilleure valorisation de ces études de compactage, il est toujours utile de prévoir des planches d'essai et des projets pilotes qui permettent l'application de la technique adoptée dans les conditions du site, et de déterminer le comportement réel de la partie compactée.

En perspective nous proposons :

- L'étude de compactage des matériaux après modification de granulométrie ;
- L'étude de compactage des matériaux en changeant le mode de compactages ;
- L'étude de détermination des caractéristiques mécaniques des matériaux compactés à faibles teneur en eau tels que le résistance au cisaillement et la résistance à la compression ;
- L'étude de détermination des caractéristiques hydrauliques des matériaux compactés à faibles teneur en eau tels que la perméabilité.



Bibliographie

Bibliographie

- [1] **Dr. Guettouche Amar** Cour
- [2] **M.MOUSTAPHA .N'DIAY E** 1978
- [3] **Introduction à la Mécanique des sols** 3eme Année/S6, licence Géologie Appliquée Spécialité Géotechnique 2019/2020
- [4] **Belarbi Narimene** et **Nadji Asma** projet de fin d'étude master préparé par
Thème etude des paramètres influant sur la portance de sol non sature (indice C.B.R)
2016/2017
- [5] **Moussa DIA** doctorat délivré conjointement par mines Douai et l'université D'ARTOIS
Titre de la thèse Traitement et Valorisation de Sédiments de Dragage Phosphatés en
Technique Routière Soutenue le 28 mai 2013
- [6] **ÉDITION 2009** Guide technique sur la mise en place des enrobés bitumineux [ressource
électronique]
- [7] **MOREL.G, A. (1988)**. Le compactage. Eyrolles. L'indice recherché est par convention la
plus grande de ces deux valeurs.
- [8] **Djedid.A, B. (1998)**. Introduction à la mécanique des sol 1. Université de Tlemcen,
Algérie.
- [9] **Drnevich.V, E. (2007)**. A Study of Effective Soil Compaction Control of Granular Soils.
West Lafayette: Purdue University.
- [10] **Sarsby, R. W. (2013)**. Environmental Geotechnics (éd. 2).
- [11] **Zhong-Sen, L. (2015)**. Études des propriétés hydromécaniques des sols argileux non
saturés proches de la saturation. Tèse de doctorat, Paris.
- [12] **NAGARAJ, A. S. (2005)**. Plastic limit and compaction characteristics of fine grained
soils. (I.I. Science, Éd.) Department of Civil Engineering, Bangalore,India.
- [13] **Aquié. (1973)**. Théorie générale de l'influence de la teneur en eau sur les résultats du
Compactage. Bulletin, LCPC.
- [14] **Hafidi.F.Z, G. (2013)**. Compactage des barrages en remnlais. Université Abou bekr
belkaid, Tlemcen.
- [15] **Holtz.R.D, K. (1999)**. Introduction à la géotechnique. (E. P. Montérial).
- [16] **Hassaine, D. R. (1990)**. Contribution à l'étude du compactage au laboratoire. Tlemcen,
Algérie. Univerversité Abou bekr belkaid.
- [17] **SHAHIN, A. (2010)**. Investigation of the Variability in the Results of the NZ Vibrating
Hammer Compaction Test. University of Auckland

[18] **Lawton, E.C., (2004).** Non grouting techniques. In: Practical foundation engineering handbook, Mc Graw-Hill Companies, USA

[19] **AMOURA Fouad et MAAMERI Mohamed(2015)** Mémoire de Master *en Génie civil*
Thème Effet de la durée de cure sur la plasticité et sur les paramètres de cisaillement d'un sol fin argileux amélioré par la chaux. Chlef Algérie Université Hassiba Benbou Ali

[20] **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.