

**REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE**



*Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la recherche Scientifique*

**UNIVERSITE DE BLIDA 1**

*Faculté de Technologie*

*Département de Génie Civil*

**MEMOIRE DE MASTER EN GENIE CIVIL**

Spécialité : Géotechnique

**Tentative d'explication de quelques courbes irrégulières de compactage étendues sur la partie de faibles teneurs en eau**

***Soutenu par :***

***GACEM BENAÏSSA***

***MAHMOUD HOUSSEM EDDINE***

***Composition de jury:***

***Mr. A. Bouzid (Président)***

***Mr. H. Kerfouf (Promoteur)***

***Mme. Sebai (Examineur)***

Blida, Novembre 2019

## **Remerciements**

Nous remercions Dieu qui nous a donné la force pour réaliser ce modeste travail.

Nous remercions nos chers parents pour leurs efforts le long de nos études.

Nous voudrions particulièrement remercier notre promoteur

Mr H. KERFOUF pour sa disponibilité et ses efforts.

Nos remerciements, vont également aux techniciens du laboratoire de Géotechnique au sein du LCTP, (Alger), pour leurs aides le long de notre stage pratique.

Nos vifs remerciements, vont au membre de jury, d'avoir accepté d'examiner, d'évaluer et d'enrichir ce travail.

Enfin merci à tous d'avoir contribué à ce modeste travail.

## **Dédicaces**

Je dédie ce modeste travail

A mes parents, et toute ma famille

A mes amis et mes camarades de la promotion 2019.

**BENAISSA**

## Dédicace

Je dédie ce modeste travail à ma famille et mes amis, merci à eux.

HOUSSEM

## Résumé

L'Algérie est un pays semi-aride. La construction des chaussées et des remblais dans les zones désertiques est compliquée à cause de la rareté de l'eau. L'expérience a montré que, le coût de l'eau nécessaire au compactage des matériaux peut arriver jusqu'au tiers du coût d'une infrastructure routière (Paige-green, 2009). Dans ces conditions il est clair que le compactage à sec des matériaux routiers peut représenter un potentiel socio-économique certain.

Ce travail participe aux efforts de recherche qui visent la mise en œuvre pratique de cette technique. L'analyse expérimentale de la technique du compactage à faible teneurs en eau au laboratoire tente de cerner les conditions de sa faisabilité dans la pratique. Pour cela on a interprété des résultats de compactage et de succions d'un sol choisi, effectué sous différentes configurations, et on a étudié l'expression des différentes conditions testées sur le rendement du compactage.

Sur la base des résultats obtenus, consolidés par des données de la littérature, on peut suggérer que le compactage à faibles teneurs en eau est faisable dans des conditions particulières portant sur le type de sol et le mode de compactage. Les résultats de cette étude doivent être confirmés par des travaux sur d'autres sols sur le terrain.

**Mots-Clefs :** Compactage des sols, Courbes Proctor, Zones arides, Compactage à sec.

## Abstract

Algeria is a semi-arid country. The construction of roads and embankments in desert areas is complicated because of the scarcity of water. Experience has shown that the cost of water required for compaction of materials can be up to one third of the cost of road infrastructure (Paige-green, 2009). Under these conditions, it is clear that the dry compaction of road materials can represent a certain socio-economic potential.

This work contributes to research efforts aimed at the practical implementation of this technique. Experimental analysis of the low water compaction technique in the laboratory attempts to determine the conditions of its feasibility in practice. For that, we have interpreted results of compacting and sucking of a chosen soil, carried out under different configurations, and the expression of the different conditions tested on the compaction yield has been studied.

On the basis of the results obtained, consolidated by data from the literature, it can be suggested that compaction at low water contents is feasible under specific conditions relating to the type of soil and the method of compaction. The results of this study must be confirmed by work on other soils in the field.

**Key Words:** Soil Compaction, Proctor Curves, Arid Zones, Dry Compaction.

## الملخص

الجزائر بلد شبه قاحل. مما جعل من انجاز الطرق عملية معقدة بسبب ندرة المياه. و قد أثبتت التجربة أن تكلفة المياه المخصصة لتقنية رص المواد المستعملة في انجاز الطرق قد تصل لثلث تكلفة المشروع الاجمالي. في ظل هذه الظروف أصبح من الواضح أن رص المواد المستعملة في بناء الطرق بنسبة مياه منخفضة سيعود بفوائد اجتماعية و اقتصادية مؤكدة.

هذا العمل عبارة عن مشاركة في الجهود البحثية الهادفة للتنفيذ العملي لهذه التقنية و وضعها محل التطبيق الميداني. التحليل التجريبي في المخبر لتقنية الرص بمستويات مياه منخفضة هو محاولة لتحديد الظروف الملائمة لإمكانية تطبيقها ميدانيا. لهذا نقوم بدراسة نتائج تجارب رص و امتصاص على تربة مختارة. و تحت ظروف معينة لدراسة تأثيرها على مردود الرص.

مستعينون بملاحظة تغير كثافة التربة المتراسة بدلالة نسبة المياه. استنادا الى نتائج الدراسات العلمية السابقة و هذه الدراسة فان امكانية الرص بنسبة مياه منخفضة مرتبط بتوفر شروط تخص الاختيار الأمثل لنوعية التربة و طريقة الرص. و يبقى أن تؤكد نتائج هذه الدراسة على نوعيات تربة مختلفة في الميدان العملي.

**كلمات مفتاحية :** رص التربة، منحنيات بروكتور، المناطق القاحلة، رص التربة بمستويات ركوبة منخفضة.

## SOMMAIRE

Remerciements .....	II
Dédicaces.....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
Dédicace .....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
Résumé.....	V
Abstract .....	VI
الملخص .....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
SOMMAIRE .....	8
LISTE DES FIGURES.....	11
LISTE DES TABLEAUX .....	13
LISTE DES ABREVIATIONS .....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
<u>INTRODUCTION GENERALE</u> .....	I
<u>I. Chapitre I : GÉNÉRALITÉS SUR LE COMPACTAGE DES SOLS</u> .....	18
<u>I. 1. Introduction</u> .....	18
<u>I. 2. Définitions</u> .....	18
<u>I. 3. Condition de compactage</u> .....	18
<u>I. 4. Théorie de compactage (Proctor, 1933)</u> .....	18
<u>I. 4. 1. Influence de la teneur en eau</u> .....	19
<u>I. 4. 2. Influence de l'énergie de compactage</u> .....	19
<u>I. 4. 3. Influence de la granulométrie</u> .....	20
<u>I. 4. 4. Influence de type de sol</u> .....	21
<u>I. 4. 5. Influence de la méthode de compactage</u> .....	21
<u>I. 5. Essais de compactage au laboratoire</u> .....	21
<u>I. 5. 1. Compactage dynamique (Proctor, 1933)</u> .....	22
<u>I. 5. 2. Compactage statique</u> .....	23
<u>I. 5. 3. Compactage par pétrissage</u> .....	23
<u>I. 5. 4. Compactage par vibration</u> .....	23
<u>I. 6. Conclusion</u> .....	24
<u>II. Chapitre II : LE COMPACTAGE A SEC</u> .....	25

II.	<u>1. Introduction</u> .....	25
II.	<u>2. Histoire et expériences antérieures (Ellis, Cl., 1980)</u> .....	25
II.	<u>2. 1. L'expérience Australienne (Morris, 1975)</u> .....	25
II.	<u>2. 2. L'expérience Européenne</u> .....	25
II.	<u>2. 3. Le compactage à sec en Afrique ((Cissé, A. 1972)</u> .....	26
II.	<u>2. 4. L'histoire du compactage à sec en Algérie (LCTP, 1977)</u> .....	27
II.	<u>3. L'expérience marocaine en compactage à sec</u> .....	27
II.	<u>4. Aspects Spécifiques du compactage à sec (GMTR, 2001)</u> .....	28
II.	<u>4. 1. Variation de la densité sèche en fonction de la teneur en eau</u> .....	28
II.	<u>4. 2. Variation de la densité sèche en fonction de la profondeur de couche</u> .....	29
II.	<u>5. Résultats du compactage à sec des matériaux rencontrés au Maroc</u> .....	29
II.	<u>6. Résultats des essais spécifiques après mise en remblais</u> .....	30
II.	<u>7. Recommandations de La nature des matériaux donnant les meilleurs résultats au compactage à sec (GMTR, 2001)</u> .....	30
II.	<u>8. Conclusion</u> .....	31
III.	<u>Chapitre III : LE CONTROLE DE COMPACTAGE</u> .....	32
I.	<u>1. Introduction</u> .....	32
III.	<u>2. Prescriptions et paramètres de compactage</u> .....	32
III.	<u>2. 1. Notion de planche d'essai</u> .....	34
III.	<u>2. 2. Données relatives aux matériaux</u> .....	34
III.	<u>2. 3. Données relatives aux compacteurs</u> .....	35
III.	<u>2. 4. Influence de la vitesse de l'engin</u> .....	36
III.	<u>2. 5. Influence du nombre de passes</u> .....	37
III.	<u>3. Méthode de contrôle en continue</u> .....	37
III.	<u>3. 1. Principe de la méthode</u> .....	37
III.	<u>3. 2. Le calcul des paramètres (S), (Q), et (Q/S)</u> .....	38
III.	<u>3. 3. L'application en pratique</u> .....	38
III.	<u>4. Le contrôle de compactage à sec (GMTR, 2001)</u> .....	39
III.	<u>4. 1. Les moyens de contrôle de compactage</u> .....	39
III.	<u>4. 2. Spécification de (GMTR, 2001)</u> .....	39
III.	<u>5. Conclusion</u> .....	39
IV.	<u>Chapitre IV : Stage pratique d'immersion</u> .....	40

IV.	<u>1. Introduction</u> .....	40
IV.	<u>2. Les essais d'identification du sol</u> .....	40
IV.	<u>2. 1. Limites d'Atterberg (NF.P.94-051)</u> .....	40
IV.	<u>2. 2. Analyse Granulométrique (NF.P.18-560)</u> .....	43
IV.	<u>2. 3. Sédimentométrie (NA.52-51)</u> .....	44
IV.	<u>2. 4 Equivalent de sable (NF.P.18-598)</u> .....	45
IV.	<u>2. 5. Essai au bleu de méthylène (NA.19-48)</u> .....	47
IV.	<u>3. Essai Proctor (NF.P.94-093)</u> .....	48
IV.	<u>4. Détermination de la teneur en eau (NFP-94.050)</u> .....	49
IV.	<u>5. Essai IPI (CBR), (NFP-94-078)</u> .....	50
IV.	<u>5. Conclusion</u> .....	52
V.	<u>Chapitre V : Résultats et interprétation</u> .....	53
V.	<u>1. Introduction</u> .....	53
V.	<u>2. Identification des sols étudiés</u> .....	53
V.	<u>2. 1. Identification du matériau 1</u> .....	53
V.	<u>2. 2. Identification du matériau 2</u> .....	55
V.	<u>2. 3. Identification du matériau 3</u> .....	57
V.	<u>2. 4. Synthèse des résultats des trois matériaux</u> .....	58
V.	<u>3. Méthode suivie au laboratoire pour la mesure de la succion</u> .....	59
V.	<u>4. Courbes de Proctor normal et modifié</u> .....	63
V.	<u>5. Calage des courbes de succion avec celle de Proctor</u> .....	68
V.	<u>6. Conclusion</u> .....	71
	Conclusion générale .....	57
	Références bibliographiques .....	59





## LISTE DES TABLEAUX

<i>Tableau I-1 : Conditions des essais Proctor normal et modifié.</i> .....	22
<i>Tableau II-1 : Résultats des essais de charge à la plaque sur les remblais du projet autoroute Marrakech-Skhour Rhamna.</i> .....	30
<i>Tableau III-1 : Classification des matériaux selon leur nature (GTR).</i> .....	35
<i>Tableau III-2 : Application de différents équipements de compactage sur différents types de sol (d'après Caterpillar Co., 1977 ; cite par (Holtz.R.D, 1999).</i> .....	36
<i>Tableau IV-1 : Classification proposée par Dakshanamurthy et Raman (1973), cité par (AZZOUZ F-Z, 2006).</i> .....	42
<i>Tableau IV-2 : Classement des matériaux suivant leur diamètre (LNTPB), cité par (Randrianandrasana.A-P, 2005).</i> .....	44
<i>Tableau IV-3 : La qualité du sable en fonction de son ES (NF.EN.933-8).</i> .....	46
<i>Tableau V-1 : Synthèse des différents résultats d'identification (matériau1).</i> .....	54
<i>Tableau V-2 : Synthèse des différents résultats d'identification, (matériau 2).</i> .....	56
<i>Tableau V-3 : Synthèse des différents résultats d'identification, (matériau 3).</i> .....	58
<i>Tableau V-4 : Classification des trois matériaux selon le (GTR).</i> .....	58
<i>Tableau V-5 : Résultats de mesure de succion et la teneur en eau du le papier filtre (matériau 2).</i> .....	60
<i>Tableau V-6 : Résultats de mesure de succion et la teneur en eau du le papier filtre (matériau 3).</i> .....	62
<i>Tableau V-7 : Synthèse des résultats de succion.</i> .....	63
<i>Tableau V-8 : Résultats de Proctor normal, (matériau 1).</i> .....	64
<i>Tableau V-9 : Résultats de Proctor modifié, (matériau 1).</i> .....	64
<i>Tableau V-10 : Résultats de Proctor normal, (matériau 2).</i> .....	65
<i>Tableau V-11 : Résultats de Proctor modifié (matériau 2).</i> .....	66
<i>Tableau V-12 : Résultats de Proctor normal (matériau 3).</i> .....	67
<i>Tableau V-13 : Résultats de Proctor modifié (matériau 3).</i> 67	

## LISTE DES ABREVIATIONS

<b>CBR</b>	Indice de Portance Californien (California Bearing Ratio).
<b>C<sub>u</sub></b>	Coefficient d'uniformité.
<b>C<sub>c</sub></b>	Coefficient de courbure.
<b>D</b>	Diamètre.
<b>D<sub>max</sub></b>	Diamètre maximale des particules.
<b>D<sub>10</sub></b>	Diamètre des particules à 10% de passants.
<b>D<sub>30</sub></b>	Diamètre des particules à 30% de passants.
<b>D<sub>60</sub></b>	Diamètre des particules à 60% de passants.
<b>e</b>	Epaisseur de la couche.
<b>E</b>	Module d'Young.
<b>EV1</b>	Module de déformation statique de la plaque pour le 1 <sup>e</sup> cycle de chargement.
<b>EV2</b>	Module de déformation statique de la plaque pour le 2 <sup>e</sup> cycle de chargement.
<b>I<sub>p</sub></b>	Indice de plasticité.
<b>n</b>	Nombre de passe.
<b>N</b>	Nombre d'application de la charge.
<b>OPN</b>	Optimum Proctor Normal.
<b>OPM</b>	Optimum Proctor Modifié.
<b>ω<sub>c</sub></b>	Teneur en eau critique.
<b>ω<sub>n</sub></b>	Teneur en eau naturelle.
<b>ω<sub>OPM</sub></b>	Teneur en eau à l'Optimum Proctor Modifié.
<b>ω<sub>OPN</sub></b>	Teneur en eau à l'Optimum Proctor Normal.

- $W_L$**  Limite de liquidité.
- $W_P$**  Limite de plasticité.
- $\gamma_d$**  Densité sèche.
- $\gamma_{d\text{ OPN}}$**  Densité sèche à l'Optimum Proctor Normal.
- $\gamma_{d\text{ OPM}}$**  Densité sèche à l'Optimum Proctor Modifié.
- $\gamma_{dc}$**  Densité sèche critique.
- $\Psi$**  Succion d'un sol.
- $\Theta$**  Teneur en eau volumique.
- $Q$**  Volume de matériau compacté.
- $Q/S$**  Ratio entre le volume de matériau compacté pendant un temps donné et la surface balayée par le compacteur sur ce volume pendant le même temps.
- VBS** Valeur du bleu au sol.
- ES** Equivalant de sable.
- ISTED** Institut des Sciences et des Techniques de l'Équipement et de l'Environnement pour le Développement.
- GTR** Guide des Terrassements Routier.
- GMTR** Guide marocain des Terrassements Routier.
- TRRL** Transport and Road Research Laboratory.
- LPEE** Laboratoire public d'essais et d'études.
- LCTP** Laboratoire centrale des travaux publics.

## INTRODUCTION GENERALE

Les régions arides en Algérie représentent près de 80% de la superficie du pays. Ces zones nécessitent un développement d'une infrastructure routière moderne qui facilite le trafic d'humains et surtout des ressources naturels (Gaz, Pétrole...etc). Cependant, la réalisation des remblais et des chaussées dans le désert est handicapé par la rareté de l'eau nécessaire pour le compactage des matériaux. L'indisponibilité de l'eau rend le compactage dans ces régions très coûteux et difficile à réaliser. Les points d'extraction de l'eau sont loin, les opérations de compactage (le forage de puits, le pompage de l'eau, l'épandage, le malaxage), demandent une organisation de chantier parfois contraignante, notamment pour limiter l'évaporation rapide de l'eau dans l'atmosphère. L'expérience a montré que, le coût de l'eau nécessaire au compactage des matériaux peut représenter jusqu'au tiers du prix d'un projet routier.

L'intérêt de compactage à sec a démarré en Algérie dans les années soixante-dix à l'occasion du projet de la route transsaharienne.

Dans le cadre du développement durable, les chercheurs commençaient à redéfinir des méthodes de compactage plus efficaces qui assure la préservation de l'environnement d'un côté et de permettre de réaliser des économies d'un autre. Très peu de travaux de recherche ont mis en avant la possibilité de compacter les sols des zones désertiques à leur état naturel où la teneur en eau des matériaux locaux est beaucoup plus faible que l'optimum Proctor. Parmi ses travaux on cite l'expérience marocaine qui est devenue aujourd'hui une référence mondiale en compactage à sec en construisant le plus d'autoroute au monde en utilisant cette technique. Ces travaux ne sont malheureusement pas suffisants pour avoir une idée bien détaillée sur la faisabilité de compactage à sec sur tous les types de sols qui existent dans les zones arides.

A l'appui de quelques rares résultats limités, tirés de la littérature du sujet, on tente par l'interprétation des résultats expérimentaux récoltés par l'encadreur, de démontrer qu'il est possible de compacter des sols à des teneurs en eau faibles, voir nulle, et d'obtenir tout de même des densités sèches aussi importantes que celle qui correspondent à l'optimum Proctor, ou au pire des densités intéressantes. L'objectif principal de ce travail consiste à analyser les courbes Proctor complète et essayer de comprendre la participation des effets physico-chimiques pour le compactage à faible teneur en eau des remblais et couche de formes. Pour cela on interprète des résultats de trois différents matériaux, ces derniers sont tout d'abord caractérisés et classifiés selon le (**GTR**) en se basant sur des paramètres d'identification et de caractérisation géotechniques (courbe granulométrique, limites d'atterberg, Equivalent de sable, Valeur de bleu de méthylène, Courbe Proctor complète, et les résultats de succion des sols).

Le travail du mémoire est présenté en cinq chapitres :

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

Le deuxième chapitre est consacré pour présenté les expériences antérieures concernant le compactage à faible teneur en eau.

Le troisième chapitre est destiné à la présentation de déférentes méthodes pour contrôler le compactage sur chantier à fin d'arriver à des densités optimales.

Le quatrième chapitre est consacré pour présenter les méthodes et les procédures d'essais employés et les normes suivies qu'on a vues lors de notre stage d'immersion au niveau de laboratoire, (*LCTP, Alger*).

Le cinquième chapitre est réservé à la présentation des résultats et leurs interprétations.

## I. Chapitre I : GÉNÉRALITÉS SUR LE COMPACTAGE DES SOLS

### I. 1. Introduction

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

### I. 2. Définitions

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 ;
- 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.

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

### I. 3. Condition de compactage

Pour compacter un sol, on fait agir sur lui un engin qui développe, en tout point du sol, des contraintes qui dépendent de la nature de l'engin, de ses caractéristiques, la profondeur du point considéré.

### I. 4. Théorie de compactage (Proctor, 1933)

**R. Proctor (1933)** a montré que le compactage est influencé principalement par cinq paramètres :

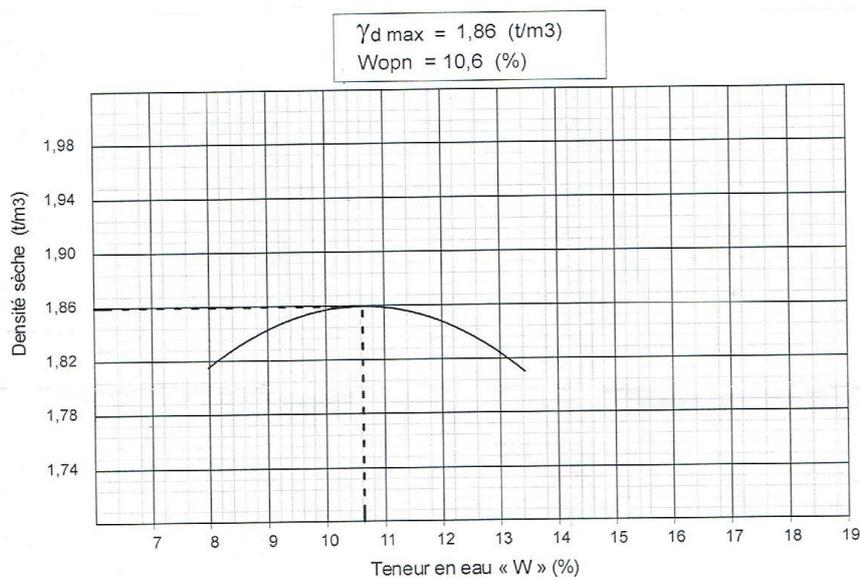
- La teneur en eau du matériau ;
- L'énergie de compactage ;
- La granulométrie ;
- Le type du sol ;
- La méthode de compactage.

#### I. 4. 1. Influence de la teneur en eau

La teneur en eau joue un rôle important dans la conduite du compactage et suivant sa valeur, expérimentalement la densité sèche ( $\gamma_d$ ) augmente avec la teneur en eau (**Figure. I.1**).

La variation de ( $\gamma_d$ ) en fonction de la teneur en eau ( $\omega$ ), on obtient une courbe en cloche. (**Drnevich.V, 2007**) a indiqué que :

- Lorsque la teneur en eau est faible, le sol est 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, le sol 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 (l'énergie de compactage est absorbée par l'eau).



**Figure I.1 : Courbe Proctor (LCTP, Alger).**

#### I. 4. 2. Influence de l'énergie de compactage

**Carter et al (1991)**, ont effectué plusieurs essais de compactage sur un même échantillon, avec des énergies de compactage différentes de manière croissante 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 résultats montrent clairement que, pour le même type de sol, l'augmentation de l'énergie de compactage engendre un accroissement de la densité sèche maximale du sol et parallèlement une diminution de la teneur en eau optimale (**Figure. I.2**).

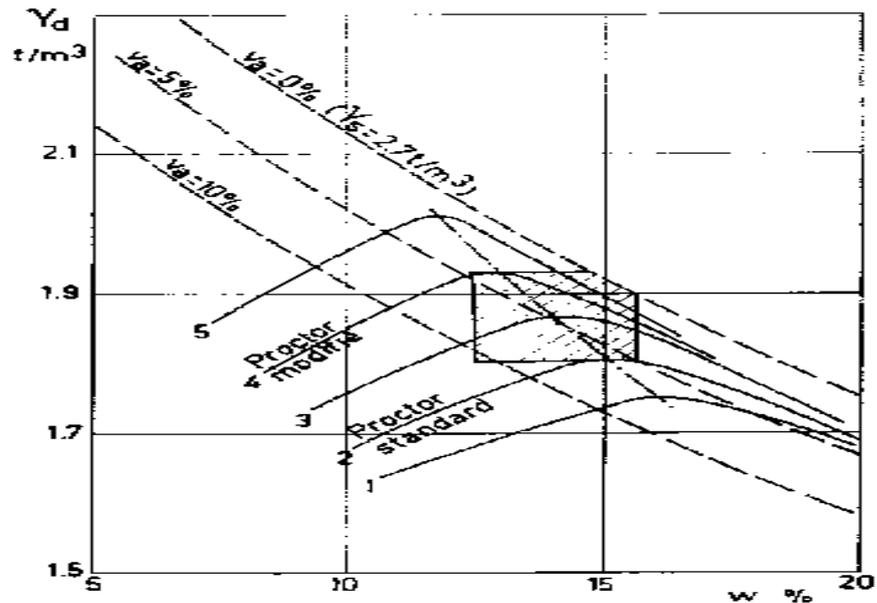


Figure 1.2 : L'influence de l'énergie de compactage (Carter et Bentley., 1991) ; cité par (Sarsby, 2013).

#### I. 4. 3. Influence de la granulométrie

(Parsons, 1992), cité par (Sarsby, 2013) ont étudié le compactage des cinq sols suivant l'essai Proctor Normal. Les allures (Figure. 1.3) 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, 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.

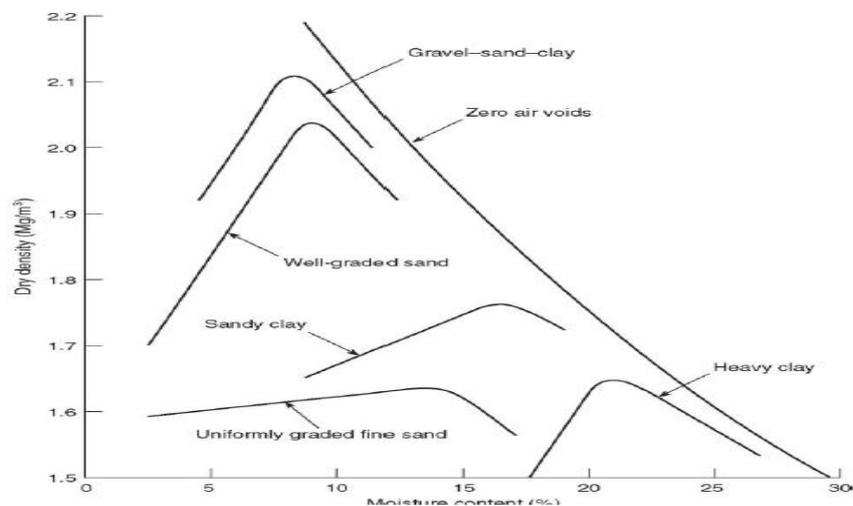
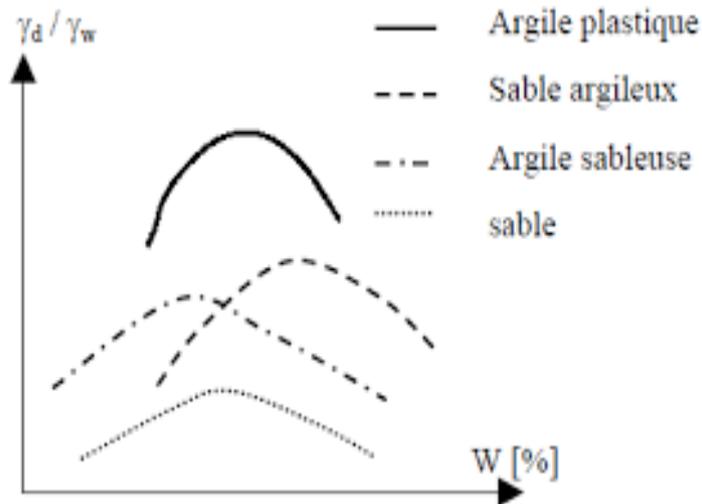


Figure 1.3 : Influence de la granulométrie du sol sur le compactage (Parsons, 1992) cité par (Sarsby, 2013).

#### I. 4. 4. Influence de type de sol

Les courbes de compactage varient avec la nature du sol (**Figure. I.4**). Un sol dont le compactage sera fortement influencé par la teneur en eau présentera une courbe de compactage avec un maximum très marqué. A l'inverse, un sol dont la teneur en eau influence peu le compactage sera caractérisé par une courbe de compactage très plate. Les sols de ce type font généralement les meilleurs remblais.



**Figure I.4 : Influence du type de sol (A. Bekkouche, 2018).**

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.

#### I. 4. 5. Influence de la méthode de compactage

Les variations de comportement hydraulique et mécanique d'un même sol compacté selon différentes méthodes sont dues au fait que ces méthodes induisent des déformations de cisaillement d'amplitudes très différentes. Au niveau du laboratoire, on distingue deux types de compactage qui sont souvent utilisés :

- **Le compactage dynamique** : L'énergie de ce mode de compactage est transmise depuis la surface du matériau compacté par propagation d'ondes de compression et de cisaillement.
- **Le compactage statique** : c'est une charge statique (le poids) et une charge 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).

#### I. 5. Essais de compactage au laboratoire

Le principe des essais au laboratoire est de compacter un échantillon de sol, avec une teneur en eau connue, dans un moule, aux dimensions normalisées, par l'action de la chute d'une dame. Le poids et la hauteur de chute de cette dernière sont également normalisés. La

teneur en eau du sol testé est maîtrisée en étuvant l'échantillon, puis par adjonction de quantités précises d'eau. Une série d'essais est réalisée pour différentes teneurs en eau, le résultat de chacun produisant un couple de valeurs ( $\omega$ ,  $\gamma_d$ ), donc un point de la courbe de compactage. Des processus de compactage dans un laboratoire peuvent être classifiés au-dessous de quatre catégories (**Luxford., 1975**), cité par (**Drnevich.V, 2007**), à savoir :

- Compactage par impact ;
- Compactage statique ;
- Compactage par pétrissage ;
- Compactage vibrant ;

### I. 5. 1. Compactage dynamique (**Proctor, 1933**)

Le compactage dynamique est une des techniques de compactage les plus applicables aujourd'hui. L'essai Proctor (**NF.P.94-093**) implique fondamentalement de laisser tomber une dame d'un poids connu sur l'échantillon (**Figure.I.5**). L'essai est relativement facile et pratique pour exécuter, sauf que quelques inconvénients existent, il est impossible de l'appliquer sur les matériaux non-cohérents, car le matériau se déplace sous la dame, et par conséquent les valeurs de densité obtenues seront faibles.



**Figure I.5 : Essai Proctor (LCTP, Alger).**

**Tableau I-1 : Conditions des essais Proctor normal et modifié.**

Essai Proctor	Masse de la dame (Kg)	Hauteur de chute (cm)	Nombre de coups par couche	Nombre de couches	Energie de compactage Kj/ dm <sup>3</sup>
<b>Normal</b>	2,490	30,50	25 (moule Proctor)	3	0,59
			55 (moule CBR)	3	0,53
<b>Modifié</b>	4,540	45,70	25 (moule Proctor)	5	2,71
			55 (moule CBR)	5	2,41

### I. 5. 2. Compactage statique

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

### I. 5. 3. Compactage par pétrissage

Inspiré par l'action de malaxage produite par le *rouleau à pieds de mouton* dans le compactage in-situ, 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 ont été réalisées aux teneurs en eau très basses par le *compactage vibratoire*.

### I. 5. 4. Compactage par vibration

Le compactage des sols et des agrégats granulaires est souvent confondu par le manque d'une méthode appropriée à cet essai. D'autres méthodes de compactage telles que le compactage d'impact ont été considérées inappropriées pour rendre ces types de sols compacts dus à leur nature non-cohérente.

Ainsi, de nouvelles méthodes telles que le compactage vibrant ont été développées afin d'essayer d'améliorer le contrat entre ces types de sols. Les résultats par des moyens vibratoires peuvent être réalisés de deux manières on note :

- *Compactage à marteau vibrant* : la méthode du marteau vibrant (**Figure. I.7**) utilise un marteau vibrant qui est placé sur l'échantillon contenu dans le moule et applique des forces vibratoires pendant un temps spécifique. Cette méthode est considérée meilleure, étant donné qu'elle simule les résultats in-situ (**SHAHIN, 2010**).
- *Compactage à table vibrante* : la méthode de la table vibrante (**Figure. I.6**) place une charge statique sur l'échantillon contenu dans un moule et applique des vibrations verticales continues à partir du fond.



Figure I.6 : Table vibrante (Proviteq).

Figure I.7 : Marteau vibrant, (Thekamat Equipment).

Le premier qui a effectué une enquête et une recherche complètes sur l'utilisation de l'essai vibrant de compactage de marteau était (**Parsons, 1964**). En se basant sur cinq facteurs différents affectant l'essai :

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

## **I. 6. Conclusion**

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

## II. Chapitre II : LE COMPACTAGE A SEC

### II. 1. Introduction

Dans la pratique courante et traditionnelle, le compactage des sols se fait à *l'optimum Proctor*, c'est-à-dire que l'essai Proctor réalisé au laboratoire fournit la teneur en eau optimale à laquelle il faut compacter le sol pour obtenir la densité sèche maximale. Seulement, la nature n'offre pas toujours la bonne teneur en eau particulièrement en région désertiques et arides où l'obtention de la teneur en eau optimale Proctor nécessite un apport de quantités considérables en eau. Cet apport est doublement injustifié : d'abord économiquement, puisqu'il nécessite des dépenses supplémentaires tel que le forage, le pompage, le transport, en plus d'une difficile organisation de chantier surtout quand il faut éviter l'évaporation de l'eau entre l'incorporation et la fin du compactage. En suite, le contexte environnemental ne permet pas un usage irrationnel de l'eau, particulièrement dans les zones où le climat est aride, et où il est préférable des préserver les ressources hydriques au profit des citoyens. Cependant, le compactage à sec, ou à faible teneur en eau, peut présenter une solution écologique et économique évidente au niveau des zones arides et en milieu désertique. Ce type de compactage est possible pour certains sols et avec certains engins, notamment les compacteurs vibrants.

### II. 2. Histoire et expériences antérieures (Ellis, Cl., 1980)

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

#### II. 2. 1. L'expérience Australienne (Morris, 1975)

En Australie, des travaux s'étalant entre 1962-1973 ont été résumés par the *Australian Road Research Board* dans un rapport (*Morris, 1975*). Des précautions climatiques et de temps ont été pris pour réaliser ce mode de compactage ainsi que l'utilisation des engins lourds de compactage a été favorisée. Des sols supports dans les zones arides ont été compactés à sec mais les matériaux de chaussées ont été à *l'optimum Proctor* au rouleau. Dans les régions à argiles expansives, des essais ont été effectués pour compacter à la teneur en eau d'équilibre finale estimée afin de minimiser la variation de volume et les fissures.

#### II. 2. 2. L'expérience Européenne

En Europe, dans le passé, on note très peu de travaux sur le compactage à sec. En Angleterre et en France. Des recherches s'intéressent plus à des techniques de construction dans les zones arides. Dans ce contexte, des sables ont été compactés à sec en Angleterre (*Grace et Cocksedge., 1978*). En France, des travaux sur des sables quartzueux compactés à sec se sont révélés particulièrement intéressants (*Chaigne et Blivet., 1971*). La plus grande

densité sèche a été obtenue à une teneur en eau nulle et de bons résultats ont été obtenus par une large gamme de rouleaux vibrants.

**The Norwegian Road Research Laboratory** a étudié le compactage à sec d'un gravier du Kenya et a conclu que le meilleur résultat du compactage est obtenu quand la teneur en eau utilisée est proche du zéro (**Mtango., 1979**).

## II. 2. 3. Le compactage à sec en Afrique (Cissé, A. 1972)

En Afrique du sud, **l'Université de Pretoria** a accompli une étude en trois parties sur le compactage des sols en zones arides (**Van Rooyen and Wesseles 1967, a, b, c**). Les travaux ont consacré une large partie sur l'étude des additifs pour améliorer le compactage. Cette étude a été suivie par un rapport sur l'utilisation de ces additifs (**Todres., 1970**). Des additifs qui sont des agents actifs de surface qui réduisent la tension de surface de l'eau et l'amènent à mouiller plus efficacement la surface des grains à compacter. Une panoplie de ces produits ont été développés et proposés sur le marché. Le rouleau à impacts a été développé en Afrique du sud à l'origine pour compacter les sols mous mais il s'est avéré très efficace pour le compactage à des profondeurs de 2 à 4 mètres des sables uniformes à de très faibles teneurs en eau (**Clifford., 1976**).

En Afrique du Nord, aussi des essais sur des graviers naturels bien gradués utilisés comme matériaux de remblai ont été effectués au Maroc (**Kabbaj., 1979**) avec un succès relatif.

Au Soudan, un essai de compactage à grande échelle a été entrepris par la **T.R.R.L** avec la collaboration de **the Sudanese Roads and Bridges Public Corporation**. Le site expérimental est situé à 27 Km à l'ouest de Sennar. Ce site construit en juin 1978 sur le projet routier de Wad Madani-Sennar-Kosti a été conçu pour étudier le compactage à sec d'une argile silteuse noire qui sera utilisée dans la construction de remblai de chaussées et les sols supports (**Ellis., 1980**).

Au sud du Mali, des essais de compactage à sec ont été réalisés sur des routes en gravier et ont donné de résultats particulièrement satisfaisants. La technique est depuis très utilisée dans les autres régions, elle est menée par **U.N.D.P Sahelian Feeder Road Project (International Road Federation., 1978)**.

Au Niger, une autre expérience aussi de compactage à sec a été conduite dans le cadre des travaux de réalisation de la route Tahoua-arlit, afin d'évaluer l'intérêt de l'emploi, à leur teneur en eau naturelle : d'un sable fin 0/1 mm présentant un équivalent de sable de l'ordre de 50 pour constituer le remblai ; d'un tout-venant de reg qui est une grave bien graduée 0/100 mm ayant 5 à 20 % de fines pour réaliser la couche de base de la chaussée (**Cissé, A. 1972**). Après une étude de compactage en laboratoire à la dame Proctor et à différentes énergies, des essais de compactage en vraie grandeur de compactage au moyen de rouleaux vibrants et d'un **compacteur à pneus** utilisé en atelier après le rouleau vibrant ont été effectués. Les résultats (densités moyennes) ont permis de montrer que le compactage à faible teneur en eau du sable pouvait être utilisé sous réserve de prévoir un traitement de la partie supérieure du remblai (couche de forme) par arrosage ou apport

d'une grave en couche mince. La dispersion des résultats obtenus sur le tout-venant de reg n'a pas permis de dégager une méthode de compactage à sec de ce matériau.

## II. 2. 4. L'histoire du compactage à sec en Algérie (LCTP, 1977)

En *Algérie*, un programme d'essais a été tracé dans les *années 1970*, pour appuyer et suivre les projets de construction des routes dans le sud du pays. A cet effet une planche expérimentale a été réalisée à *Tamanrasset*. Les laboratoires Nationaux des Travaux Publics ont réalisé les essais et interprété les résultats. Ils ont retrouvé trois rapports sur le compactage à sec de *Tamanrasset*, la première date de décembre 1975, un autre en *août 1976*, et un dernier du 13 avril 1977. Le rapport trouvé sur l'étude 1977 au (**LCTP**) est incomplet. Il cite cinq planches expérimentales, les matériaux utilisés dans ces planches sont des matériaux locaux, les arènes granitiques et le tout venant des plateaux (*TVP*). Si l'on se base sur le rapport, l'étude n'était pas vraiment concluante. Ces planches d'essais ont confirmé l'excellence du comportement des (*TVP*) à tout point de vue et mis à jour une différenciation au niveau des arènes. Une différence de granulométrie relativement minime amène des gains non négligeables sur les densités et les essais de portance. Ces planches ont aussi mis en évidence l'importance des matériaux choisis, plus que l'importance du rouleau, bien que ces derniers soient quand même différenciés. Le rouleau léger a l'avantage sur les deux rouleaux lourds à peu près équivalents.

## II. 3. L'expérience marocaine en compactage à sec

Le compactage à sec peut représenter une solution écologique et économique dans la mesure où il favorise la réutilisation des matériaux résultants des déblais, présents dans leur état hydrique sec ou très sec. L'opportunité s'est présentée au *Maroc* lors des projets autoroutiers **Settat- Marrakech et Marrakech-Agadir**. Pendant la réalisation de ces deux chantiers, la *Société Marocaine des Autoroutes du Maroc (ADM)* a été confrontée à des matériaux schisteux présents sur le site à l'état sec voir très sec. Conventionnellement, le réemploi de ces matériaux en l'état est exclu. Par ailleurs, le changement de l'état hydrique par humidification n'était pas envisageable, à cause de l'aridité du site et des ressources en eau que (**ADM**) a souhaité préserver au maximum. Le souci majeur a été de préserver l'environnement, donc (**ADM**) a opté pour la réutilisation maximale de ces matériaux évitant ainsi la multiplication des dépôts et des emprunts. Et surtout préserver les ressources en eau. Pour ce faire, (**ADM**) a engagé des études en vrai grandeurs avec différents matériaux pour étudier la possibilité de les réutiliser à l'état très sec qui ont abouti à l'optimisation de la réutilisation et à l'emploi de ces matériaux dans leur état très sec. Cette expérience a été concluante et a permis l'édification des remblais jusqu'à 12m de hauteur. A noter que le Maroc est le seul pays au monde à avoir construit le plus d'autoroutes en utilisant cette technique, qui a permis la préservation d'environ 4 milliards de litres d'eau et éviter la multiplication des dépôts et des emprunts qui tachent souvent l'environnement proche de l'autoroute.

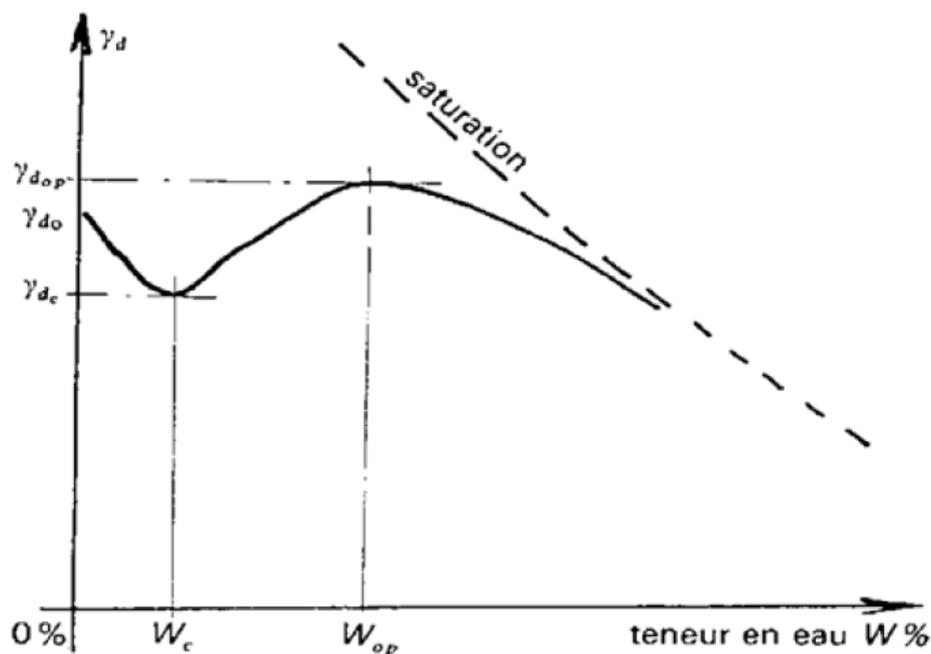
## II. 4. Aspects Spécifiques du compactage à sec (GMTR, 2001)

D'après le *Guide marocain des terrassements routiers (GMTR, 2001)* Le compactage à sec ou à faible teneur en eau présente des aspects spécifiques concernant :

- La variation de la densité sèche ( $\gamma_d$ ) en fonction de la teneur en eau ( $\omega$ ) ;
- La variation de la densité sèche ( $\gamma_d$ ) en fonction de la profondeur de couche.

### II. 4. 1. Variation de la densité sèche en fonction de la teneur en eau

Les études réalisées au laboratoire montrent que lors de la réalisation de la détermination, pour une énergie de compactage donnée, de la courbe représentative ( $\gamma_d$ ) =  $f(\omega)$  depuis une teneur en eau quasi nulle jusqu'à la saturation, (**Figure. II. 1**).



**Figure II.1 : Courbe Proctor complète (LCPC, 1987).**

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

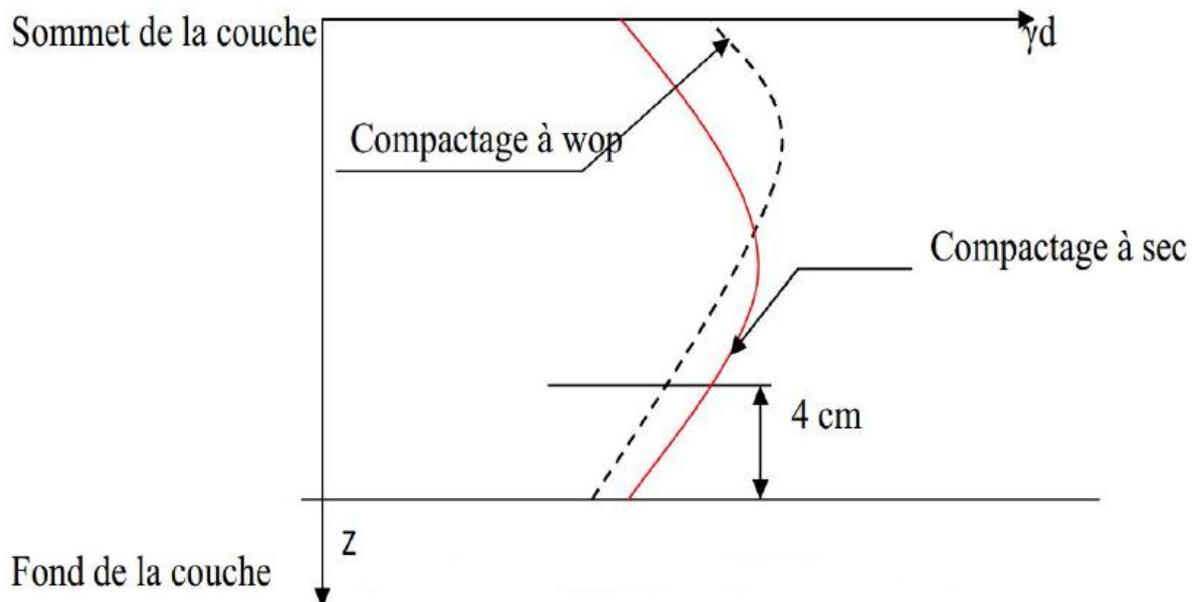
- **Teneur en eau optimale** ( $\omega_{opt}$ ), classique conduisant à la densité sèche maximale ( $\gamma_{d\ opt}$ ) de l'essai Proctor.
- **Teneur en eau critique** ( $\omega_c$ ), pour laquelle la densité sèche passe par un minimum  $\gamma_{dc}$  et celle-là est la teneur en eau à partir de laquelle ( $\gamma_d$ ) croît nettement avec ( $\omega$ ). Entre une teneur en eau nulle et ( $\omega_c$ ), la densité décroît en général.

Sur la courbe de la (**Figure. II.1**), certaines valeurs de densités sèches peuvent être obtenues avec trois teneurs en eau différentes à la même énergie de compactage. Il est donc nécessaire de comprendre la faisabilité de ce compactage à sec dans la pratique et quels sont les matériaux qui présentent cette forme de courbe. Il faut noter également que la valeur de la densité sèche ( $\gamma_d$ ) du matériau compacté représente le paramètre le plus

important dans l'évaluation du compactage, néanmoins il est important de considérer d'autres facteurs qui sont les hautes teneurs en air (vides), la succion des sols et la faible cohésion des sols secs. Ces paramètres peuvent causer des difficultés pendant et après la construction des remblais réalisés dans ces conditions de faibles teneurs en eau.

## II. 4. 2. Variation de la densité sèche en fonction de la profondeur de couche

La courbe de variation de la densité en fonction de la profondeur de couche  $\gamma_d = f(z)$  présente une allure semblable à celle obtenue par un compactage classique. (**Figure. II.2**).



**Figure II.2 :** Variation de la densité en fonction de la profondeur (LCPC, 1987).

Cependant les deux courbes présentent les différences suivantes :

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

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

## II. 5. Résultats du compactage à sec des matériaux rencontrés au Maroc

Des investigations supplémentaires ont été réalisées sur les matériaux fins des déblais, les plus sensibles à l'eau : ce sont des essais de chargement in-situ qui consistaient à appliquer une contrainte connue sur le remblai à l'aide d'une plaque ( Ø75 cm), puis à saturer et déduire les désordres résultants. Les résultats sont résumés ci-dessous :

- Les remblais en schistes indures dont le pourcentage des passants à 2mm est inférieurs à 30% et  $D_{max} < 250mm$ , réalisés jusqu'à 7m de hauteur, les déformations résultantes sont très faibles et les remblais réalisés ne présentent aucun problème ;

- Les remblais en micaschistes dont le pourcentage des passants à 2mm est environ 50% et les Matériaux fins et colluvions limoneux dont le pourcentage des passants à 2mm est plus de 30%, les gonflements apparaissent à partir de 3m au niveau de la partie supérieures des remblais et des talus, vu la faible plasticité donc risque d'érosion des talus ;
- Les matériaux tufeux dénoncent des tassements à faibles hauteurs.

## II. 6. Résultats des essais spécifiques après mise en remblais

Des essais spéciaux ont été réalisés sur les matériaux compactés à sec, après montée des remblais, afin de cerner au mieux leur comportement en cas de venue d'eau. Ces essais sont deux Essais de charge à la plaque sous saturation : les essais ont consisté à creuser des puits en différents endroits d'un remblai monté et à réaliser des essais de chargement à la plaque avec mise en eau retardée, laquelle n'intervient qu'après stabilisation des déformations sous la charge appliquée. Les valeurs obtenues sont récapitulées dans le tableau (II. 1).

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

Matériaux/charge (kPa)	$\Delta H/H$ en %		
	106	212	318
Micaschiste	0.4	1.13	0.5
Grave calcaire	0.55	0.77	1.2

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

## II. 7. Recommandations de La nature des matériaux donnant les meilleurs résultats au compactage à sec (GMTR, 2001)

Les sols qui donnent les meilleurs résultats au compactage à faible teneur en eau sont donnés ci-après, en milieu désertique ces sols sont aussi utilisables en couche de forme **(GMTR, 2001)**.

- Les sols fins peu plastiques **A1** et **A2** : les sols **A1** peuvent poser des problèmes de traficabilité pour les engins de compactage. Ces sols nécessitent aussi de procéder à une trituration préalable (surtout pour A2).
- Les graves et sables propres : **D1, D2, C1, D1, B1** et **B3** ;
- Les graves et sables peu argileux : **B2** et **B4** ;
- Les graves et sables très silteux : **B5** ;

- Les graves et sables argileux : **B6** avec ( $I_p < 25$ ) ;
- Les tufs **Tc** et **Tf** ;
- Les sols **C1**.

## II. 8. Conclusion

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

### III. Chapitre III : LE CONTROLE DE COMPACTAGE

#### I. 1. Introduction

Le but des contrôles de compactage est d'évaluer la compacité du remblai en comparant les courbes de compactage de chaque couche avec des courbes de référence spécifiques à chaque matériau. **(LPEE, 2007)**.

Le contrôle du compactage, qui constitue la phase essentielle de la surveillance des chantiers de terrassements, peut s'effectuer de deux façons différentes :

- Par une méthode traditionnelle permettant de mesurer les densités obtenues en place ;
- Par une **méthode de contrôle en continu**, dite **(Q/S)**.

Si, pour les sols fins, l'une ou l'autre des deux méthodes peut être choisie, pour la grande majorité des sols, **la référence Proctor** est très délicate à utiliser pour évaluer le taux de compactage obtenu.

En effet la référence Proctor perd son sens dans les cas de sols grenus car elle n'est utilisable que pour les sols dont moins de 25% des éléments ont une taille supérieure à 20mm. Pour cette raison, la méthode du contrôle en continu présente un net avantage, en plus d'apporter une réponse rapide, peu coûteuse et qui ne gêne pas les ateliers de production des terrassements.

Les tableaux de compactage et les indications mentionnées par le **(GTR)** donnent les conditions qui assurent la cohérence entre les facteurs définissant le cas de compactage, à savoir :

- Le matériau tel que défini par la classification ;
- Le matériel de compactage utilisé (type d'engin et paramètres de construction et de fonctionnement, mode d'emploi) ;
- L'épaisseur compactée ;
- L'objectif de compactage.

Cette approche est en accord avec la procédure de contrôle "en continu".

#### III. 2. Prescriptions et paramètres de compactage

Les prescriptions et les paramètres de compactage sont fixées par le **(GTR)** selon la nature des ouvrages, afin de :

- Limiter les tassements des corps de remblai et assurer leur stabilité ;
- Obtenir des caractéristiques suffisantes de raideur et de résistance pour les couches de forme.

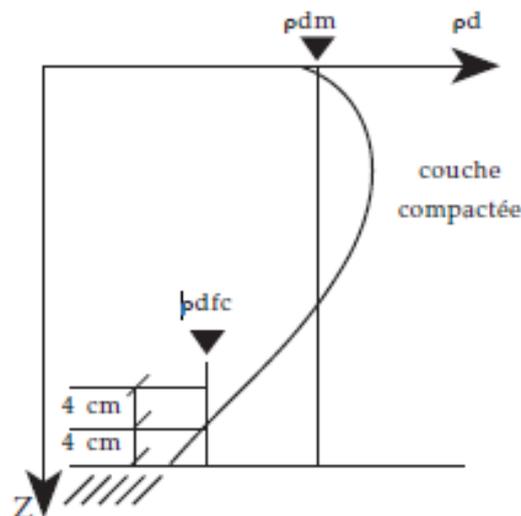
Deux objectifs de densification, désignés symboliquement par **q3** et **q4** sont définis par le **(GTR)** :

- q3 objectif ordinairement requis pour les couches de forme ;
- q4 objectif ordinairement requis pour les remblais.

Ces prescriptions ont été fixées à partir de nombreuses planches expérimentales accompagnées de mesures précises et répétées de la masse volumique en place, de l'observation du comportement d'ouvrages et d'un modèle mathématique calé sur ces données.

Ce travail de rationalisation entrepris depuis la recommandation de 1976 a amené à réviser certaines exigences suite en particulier à des constatations répétées d'insuffisances marquées de compactage en fond de couche.

Avec la mise en œuvre par couche et les matériels actuels, on observe en effet une variation de la masse volumique sèche sur la hauteur de la couche compactée (**Figure. III.1**).



**Figure III.1** : Variation de la densité sèche en fonction de la profondeur **(GTR)**.

Pour s'assurer d'un compactage correct, ceci conduit à considérer deux indicateurs :

- $\rho_{dm}$  : masse volumique sèche moyenne sur toute l'épaisseur de la couche compactée.
- $\rho_{dfc}$  : masse volumique sèche en fond de couche ; c'est-à-dire la valeur moyenne sur une tranche de 8 cm d'épaisseur située à la partie inférieure de la couche compactée.

Les prescriptions moyennes des tableaux **(GTR)** ont été établies pour atteindre les valeurs moyennes minimales suivantes de  $\rho_{dm}$  et  $\rho_{dfc}$  par nature d'ouvrage .Pour **q3** Objectif de densification pour le compactage des couches de forme :

- $\rho_{dm} \geq 98,5 \% \rho_d \text{ OPN}$  ;
- $\rho_{dfc} \geq 96 \% \rho_d \text{ OPN}$ .

Pour **q4** Objectif de densification pour le compactage des remblais :

- $\rho_{dm} \geq 95 \% \rho_{d\text{ OPN}}$  ;
- $\rho_{dfc} \geq 92 \% \rho_{d\text{ OPN}}$ .

Ces valeurs sont à considérer comme des repères mais ne doivent pas être retenues comme prescriptions de compactage (non pertinence de la **référence Proctor** pour de nombreux matériaux, impossibilité factuelle d'assurer un contrôle véritable et précis de l'ensemble des travaux par mesure de masse volumique, notamment pour ce qui concerne le fond de couche).

### III. 2. 1. Notion de planche d'essai

La planche d'essai permet avant l'ouverture d'un chantier de terrassement, de fixer les paramètres de compactage lié à l'engin utilisé, au sol considéré au moment des travaux (teneur en eau, vitesse des engins, nombre de passe, ...), etc., en vue d'obtenir la compacité à atteindre (compacité prescrite). 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 une capacité que l'on croit connaître, mais dont on n'est pas absolument certain, **planche de référence** lorsqu'il s'agit de définir la qualité que l'on obtient normalement en appliquant strictement un compactage déterminé pour qu'en cours de réalisation du chantier, on puisse comparer facilement la qualité obtenue à celle souhaitée. (**MOREL.G, 1988**).

La dimension de la planche d'essai est celle qui permet une mise en œuvre satisfaisante, (**A.Emmanuel., 2002**), cité par (**Hafidi.F.Z, 2013**), soit 20 mètres en longueur et 4 à 5 mètres en largeur. Sachant que les 2x50 cm en bords ne sont pas pris en compte et en prévoyant 5m supplémentaires aux deux extrémités pour la manœuvre des engins.

### III. 2. 2. Données relatives aux matériaux

Les matériaux sont identifiés en familles, classes et sous-classes d'états selon la classification (**NF P 11 300**) définie par le (**GRT**) en se basant sur les paramètres suivantes :

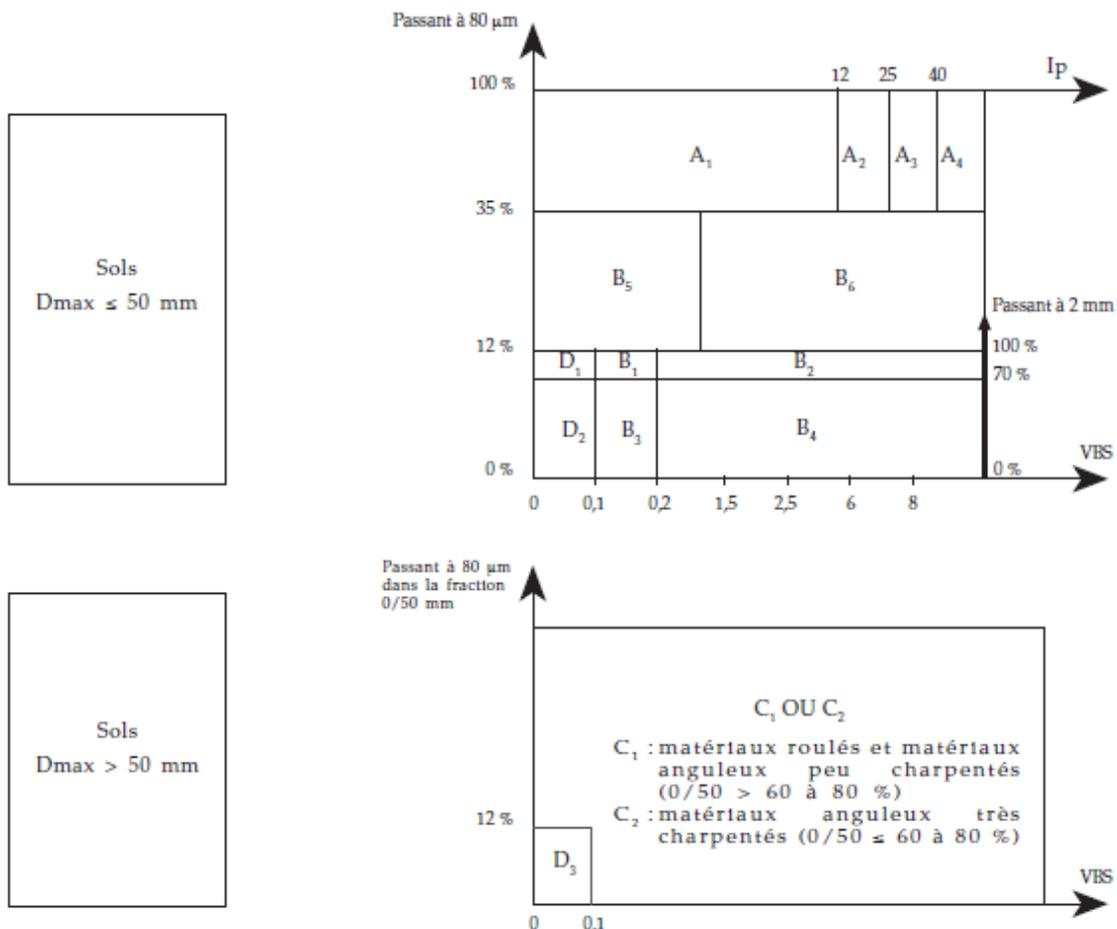
- **Paramètres de nature** : Ils se rapportent à des caractéristiques intrinsèques, c'est-à-dire qui ne varient pas ou peu, ni dans le temps ni au cours des différentes manipulations que subit le sol au cours de sa mise en œuvre. Les paramètres retenus concernent la granularité et l'**argilosité**.
- **Paramètres de comportement mécanique** : Ces paramètres ne sont pris en considération que pour juger de l'utilisation possible des sols en couche de forme. Ils distinguent les matériaux dont la fraction granulaire est susceptible de résister au trafic et qui de ce fait peuvent être utilisés tels quels dans la construction des couches de forme, de ceux qui risquent de se fragmenter pour se transformer en un sol constitué en majorité d'éléments fins, inutilisable dans son état naturel sans dispositions particulières (traitement...).

- **Paramètres d'état** : Il s'agit des paramètres qui ne sont pas propres au sol mais fonction de l'environnement dans lequel il se trouve. Pour les sols meubles sensibles à l'eau, le seul paramètre d'état considéré dans la présente classification est **l'état hydrique** : son importance est capitale vis-à-vis de tous les problèmes de remblai et de couche de forme.

Ces paramètres sont déterminés par des essais de laboratoire normalisés afin de pouvoir classer le matériau dans les classes suivantes (**Tableau. III.1**) :

- Classe A : sols fins ;
- Classe B : sols sableux et graveleux avec fines ;
- Classe C : sols comportant des fines et des gros éléments ;
- Classe D : sols insensibles à l'eau ;
- Classe R : Sols rocheux ;
- Classe F : Sols organique.

**Tableau III-1** : Classification des matériaux selon leur nature (GTR).



### III. 2. 3. Données relatives aux compacteurs

Les définitions et classifications données ci-après font l'objet de normes (**P.98-736**).

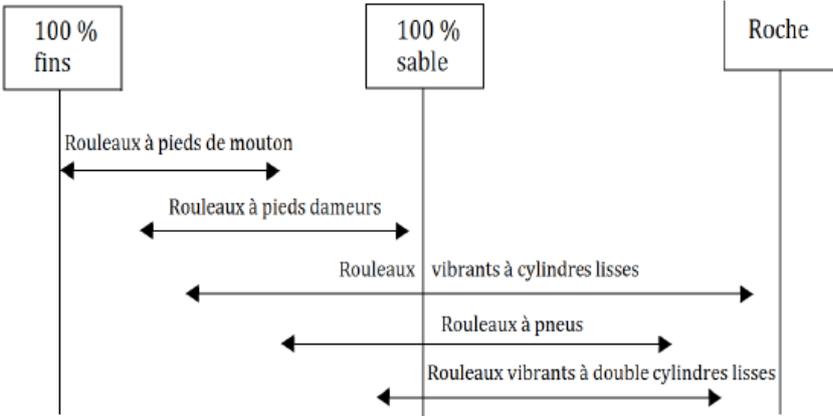
Les différentes familles d'engins considérées dans le (**GTR**) sont :

- Les compacteurs à pneus : **Pi** ;
- Les compacteurs vibrants à cylindres lisses : **Vi** ;
- Les compacteurs vibrants à pieds dameurs : **VPI** ;
- Les compacteurs statiques à pieds dameurs : **SpI** ;
- Les plaques vibrantes : **PQi** ;
- Les compacteurs mixtes : **VXi – Pj**.

Le signe « i » est le n° de la classe ; il croît avec l'efficacité du compacteur à l'intérieur de chaque famille.

Pour assurer un compactage de qualité optimale il est important de choisir le compacteur le plus approprié aux matériaux donnés, (**Tableau. III.2**).

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



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

### III. 2. 4. Influence de la vitesse de l'engin

Pour un engin donné et des exigences de qualité fixées, il existe une vitesse optimale, en fonction de l'épaisseur de la couche et de la nature du matériau permettant d'obtenir une

compacité maximale. Plus les exigences de qualité sont sévères, plus la vitesse de translation optimale a une valeur réduite. Il est recommandé de limiter la vitesse de la plus part des compacteurs à  $8\text{km/h}$ . Dans le cas des compacteurs vibrants, la vitesse optimale se situe autour de  $5\text{km/h}$  pour que les vibrations puissent agir efficacement sur toute l'épaisseur de la couche.

### III. 2. 5. Influence du nombre de passes

Pour un engin donné et des paramètres de qualité fixés, il existe un nombre de passes optimales en fonction de la vitesse de l'engin, de l'épaisseur de la couche et de la nature du matériau permettant d'obtenir une compacité maximale. Plus les exigences de qualité sont sévères, plus le nombre de passe optimale est élevé. De façon générale il faut 3 à 8 passes pour compacter une couche de sol de 30 cm d'épaisseur, mais ce nombre peut facilement atteindre 12 en fonction du type de sol, de la teneur en eau et de la masse du compacteur. Si la compacité voulue n'est pas atteinte après 12 passes dans les conditions optimales d'humidité, on conclut que les opérations de compactage n'ont pas atteint leur but et que le compacteur utilisé n'est probablement pas adéquat. En pratique la teneur en eau fixée à la valeur optimale de l'essai Proctor est obtenue par étalonnage de la citerne à eau. Pour chaque vitesse de l'engin considéré on détermine le nombre de passes permettant d'obtenir les spécifications prescrites. On peut ainsi représenter la courbe (Vitesse de l'engin, Nombre de passes) et déterminer son optimum qui donne les paramètres liés à l'engin.

### III. 3. Méthode de contrôle en continue

#### III. 3. 1. Principe de la méthode

La méthode de contrôle en continu se base principalement sur la mesure du  $(Q/S)$  qui exprime le rapport entre le volume  $(Q)$  d'un sol compacté pendant un temps donné et la surface  $(S)$  balayée par le compacteur dans le même temps exprimé en  $(\text{m}^3/\text{m}^2)$ .

La comparaison de la valeur obtenue sur le chantier avec la valeur théorique donnée par le  $(GTR)$  permet de qualifier le compactage d'un temps donné (une journée ou une heure) contrôlée et de définir s'il y a anomalie ou non dans la réalisation de l'ouvrage en terre.

Les références théoriques et les consignes indiqués dans le  $(GTR)$  pour assurer un objectif de compactage sont basés sur :

- La classification des sols à compacter et leur état hydrique selon la norme **(NF.P11-300)** ;
- Le type de compacteur utilisé et sa classe selon le **(GTR)** ;
- La vitesse moyenne du compacteur en  $(\text{km/h})$  ;
- L'épaisseur **(e)** de la couche après compactage en (m) et donc indirectement le volume de matériau mis en œuvre ;
- Le nombre de passes.

### III. 3. 2. Le calcul des paramètres (S), (Q), et (Q/S)

Le Volume (**Q**) représente le rythme de production de l'atelier de terrassement. Sur le chantier il peut être soit déterminé par des métrés après compactage, soit évalué à partir des coefficients de foisonnement et contre foisonnement, et de la durée du cycle constatée pour les engins de transport. Au stade de l'étude, (**Q**) est estimé par l'entreprise de réalisation en tenant compte des données du projet et des contraintes d'exécution.

La surface (**S**) représente le rythme d'utilisation d'un compacteur. C'est le produit, pendant le temps choisi pour l'évaluation de (**Q**), de la distance (**D**) parcourue "en compactage", par la largeur de compactage (**L**). Il est pondéré par le facteur morphologique du compacteur. La distance (**D**) peut être déterminée sur chantier au moyen d'un compteur kilométrique monté sur le compacteur.

### III. 3. 3. L'application en pratique

D'un point de vue pratique, la valeur du paramètre (**Q/S**) représente l'épaisseur d'un matériau donné que peut compacter un compacteur donné en une application de charge pour obtenir la compacité recherchée ; à ce titre, elle pourrait être dénommée : "épaisseur unitaire de compactage". Enfin il découle de cette présentation de la valeur du (**Q/S**) que le nombre de passes théorique moyen (**n**) qui doit être appliqué sur une couche de matériau d'épaisseur donnée, s'obtient directement par le rapport entre l'épaisseur de la couche (**e**) et la valeur du (**Q/S**) correspondant à la classe du compacteur et à celle du matériau considérées.

Dans les tableaux de (**GTR**), on observe que les valeurs de (**Q/S**) diminuent lorsque l'intensité de compactage exigée est plus grande; cela est cohérent avec l'interprétation précédemment donnée. Lorsque les valeurs de (**Q/S**) sont utilisées en tant que spécifications, elles doivent être interprétées de la manière suivante :

- Dans le cas d'énergies de compactage **intense (code 1)** et **moyenne (code 2)**, la valeur de (**Q/S**) indiquée est une valeur maximale : le (**Q/S**) réel doit être inférieur ou égal au (**Q/S**) indiqué dans le tableau. Surtout dans le cas de compactage intense, il n'y a pas d'inconvénient à ce qu'il soit très inférieur. Les cas d'insuffisances de compactage se rencontrent en effet plus fréquemment là où la difficulté de compactage requiert une énergie intense (sols secs en particulier).
- Dans le cas d'énergie de compactage **faible (code 3)**, le (**Q/S**) réel doit être proche du (**Q/S**) indiqué dans les tableaux ; la valeur moyenne doit évidemment être centrée sur la valeur indiquée. Elle ne doit être ni beaucoup plus élevée, ni beaucoup plus faible ; l'intervalle normalement acceptable à l'échelle de l'heure de travail est d'environ  $\pm 20 \%$  par rapport à la valeur indiquée. Sur les sols humides pour lesquels le compactage s'accompagne d'un phénomène de **matelassage**, il n'est pas bénéfique d'employer une énergie de compactage plus forte que celle prévue ; elle conduirait à diminuer encore davantage la portance.

### III. 4. Le contrôle de compactage à sec (GMTR, 2001)

#### III. 4. 1. Les moyens de contrôle de compactage

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

- Le contrôle du compactage par mesure de la densité moyenne couche par couche, tel qu'il est habituellement pratiqué, n'est pas utilisable.
- Le contrôle par essai de plaque **EV2** et **EV1** à partir de la surface d'une couche, n'est pas utilisable lui aussi.

Cependant, dans le cas où le recours au contrôle de compactage par mesure de densité est nécessaire, il est conseillé par le (**ISTED-LCPC, 1987**) de décaper les *10 cm* de la couche avant la réalisation de la mesure. Le recours aux mesures de densité par **gamma densimètres** à profondeur variable est possible avec les sols autres que **C1**. Dans ce cas, deux mesures sont réalisées au niveau de chaque point (à *10 cm* et à *22,5 cm* de la surface). La densité de la couche compactée doit être comprise entre la côte (*- 10 et - 22,5 cm*). elle est déterminée par la formule :

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

#### III. 4. 2. Spécification de (GMTR, 2001)

En cas de compactage d'un remblai le (**GMTR**) exige les valeurs suivantes :

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

Au niveau de la couche de forme ou des *40 cm* supérieurs situés sous la chaussée le (**GMTR, 2001**) exige les valeurs suivantes :

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

### III. 5. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons pu constater que le contrôle du compactage est la phase essentielle pour assurer un bon déroulement de l'opération de compactage ainsi de réaliser les objectifs optimaux sur chantier. Ce contrôle se fait par plusieurs méthodes différentes en se basant sur des différents paramètres spécifiques pour chaque méthode.

## IV. Chapitre IV : Essais et méthodes de mesure au laboratoire

### IV. 1. Introduction

Après avoir passé en revue des généralités sur les sols compactés dans les précédents chapitres, et afin de caractériser l'effet du compactage sur les caractéristiques mécaniques et hydriques des trois sols d'étudié, un stage d'immersion a été fait au niveau du laboratoire **LCTP** (Laboratoire centrale des travaux publics). Ce chapitre est consacré à la présentation des différentes méthodes expérimentales utilisées au laboratoire, pour l'identification physico chimique des matériaux, ainsi que les essais de compactage.

### IV. 2. Les essais d'identification du sol

#### IV. 2. 1. Limites d'Atterberg (NF.P.94-051)

C'est l'un des essais d'identification les plus importants. Les limites d'Atterberg sont réalisées selon les recommandations de la norme (**NF.P.94-051**). L'essai s'effectue en deux phases :

##### IV. 2. 1. 1. La limite de liquidité

*Préparation de la pâte :* Après échantillonnage, une masse (m) du sol est mise imbibé dans un récipient d'eau à la température ambiante, pendant au moins 24h. Une fois imbibé, le matériau est tamisé par voie humide au tamis de 0,400mm. L'eau de lavage et tamisât sont recueillis dans un bac. Apres une durée de décantation d'au moins 2h, l'eau claire du bac est siphonnée sans entraîné de particules solides. L'eau excédentaire est évaporée à une température ne dépassant pas 50°C. Une quantité du 70g de tamisât a été malaxée afin d'obtenir une pâte presque liquide. Avec une spatule, on mit la pâte dans une coupelle propre et sèche, cette pate est étalée en plusieurs couche afin d'éviter d'emprisonner des bulles d'air. (**Figure. IV.1**)



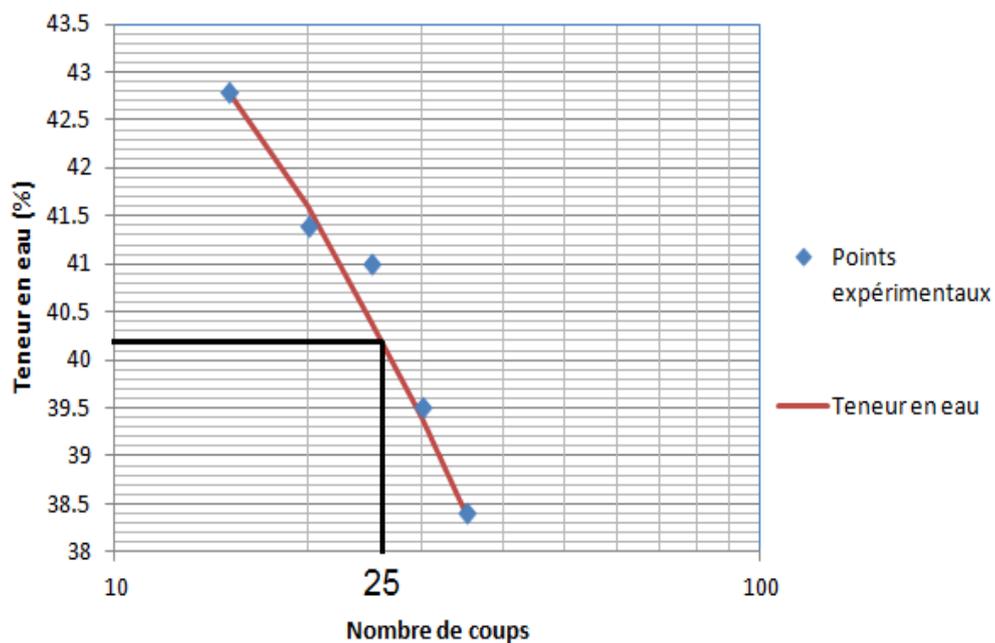
**Figure IV.1 : Préparation de l'échantillon, (LCTP, Alger).**

*Réalisation de l'essai* : On place une pâte de sol (une épaisseur de 15 à 20 mm) dans la coupelle de **l'appareil de Casagrande**. La pâte de sol est séparée en deux par une rainure axiale au moyen d'un outil spécial et on applique à la coupelle une série de coups jusqu'à ce que les lèvres de la rainure se rejoignent sur à peu près 1cm. (**Figure. IV.2**). On note le nombre de chocs nécessaires et on détermine la teneur en eau à l'étuve du sol. Les essais sont effectués avec des teneurs en eau croissantes ou décroissantes.



**Figure IV.2** : Réalisation de la rainure dans la pâte de sol au moyen d'un outil spécial.

La limite de liquidité est la teneur en eau pour laquelle on observe une fermeture des lèvres de la rainure après 25 chocs. Elle peut se déterminer graphiquement grâce à 3 ou 4 essais successifs.



**Figure IV.3** : Limite de liquidité d'un sol argileux (LCTP).

**Tableau IV-1 : Classification proposée par Dakshanamurthy et Raman (1973), cité par (AZZOUZ F-Z, 2006).**

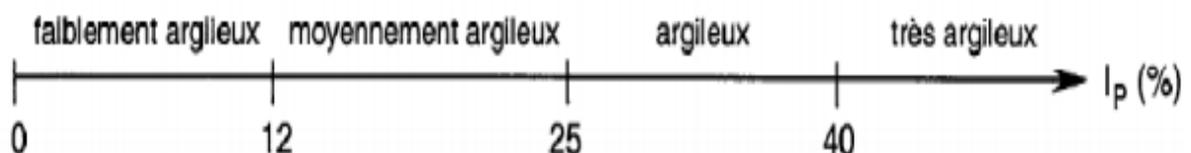
Limite de liquidité WL	Classification
0-20	Non gonflant
20-35	Gonflement faible
35-50	Gonflement moyen
50-70	Gonflement élevé
70-90	Gonflement très élevé
90	Gonflement critique

**IV. 2. 1. 2. Détermination de limite de plasticité (NF.P.94-051)**

Cette limite a une importance fondamentale en géotechnique car elle indique la sensibilité d'un sol aux modifications de sa teneur en eau. L'essai est effectué conformément aux recommandations de la norme (NF.P.94-051). On forme une boulette à partir de la pâte préparée, on roule la boulette sur une plaque lisse à la main de façon à obtenir un rouleau de 3mm de diamètre et 10 à 15 cm de long La limite de plasticité est la teneur en eau pour laquelle le rouleau se brise lorsqu'on atteint le diamètre de  $3 \pm 0,5$  mm.

A partir de ces limites, et par définition, on peut déterminer l'indice de plasticité noté **Ip**. L'indice de plasticité est couramment utilisé pour mesurer **l'argilosité**. Il représente la plage de teneurs en eau d'un sol donné correspondant à un comportement plastique de ce sol. Ainsi, si l'indice de plasticité du sol est élevé, le sol est dit argileux et ses variations de volume peuvent être importantes en fonction de la modification de la teneur en eau du sol. La relation entre la teneur en eau à l'état naturel et les limites de liquidité et de plasticité traduit le comportement d'un sol.

L'indice de plasticité a une grande importance dans tous les problèmes de géotechnique Le GTR92 (Guide Technique pour la Réalisation des remblais et des couches de forme septembre 1992) retient pour Ip les seuils d'argilosité suivant :



**Figure IV.4 : Ordre de grandeur (Type de sol en fonction de la valeur Ip), (GTR92).**

#### IV. 2. 2. Analyse Granulométrique (NF.P.18-560)

L'essai a pour but de déterminer en poids, la distribution des particules des sols suivant leurs dimensions. L'analyse granulométrique des matériaux étudiés est effectuée par Le tamisage sous l'eau (voie humide), selon la norme (NF.P.18-560).

Le principe de cette méthode est de séparer par lavage les grains agglomérés d'un échantillon de masse connue du matériau, puis les fractionner, au moyen d'une série de tamis ; et enfin peser successivement après séchage la quantité du matériau retenue sur chaque tamis (refus sur un tamis). Le lavage du matériau se fait manuellement.

Afin de connaître l'étalement granulométrique de la fraction étudiée et pouvoir la classer Tableau (V.2), deux paramètres sont utilisés (R.D Holtz et W.D Kovacs, 1991; F.Schlosser, 1997); Le paramètre de forme de la courbe, appelé coefficient d'uniformité (Cu), dit **coefficient de Hazen**, donné par la relation:

$$C_U = \frac{D_{60}}{D_{10}}$$

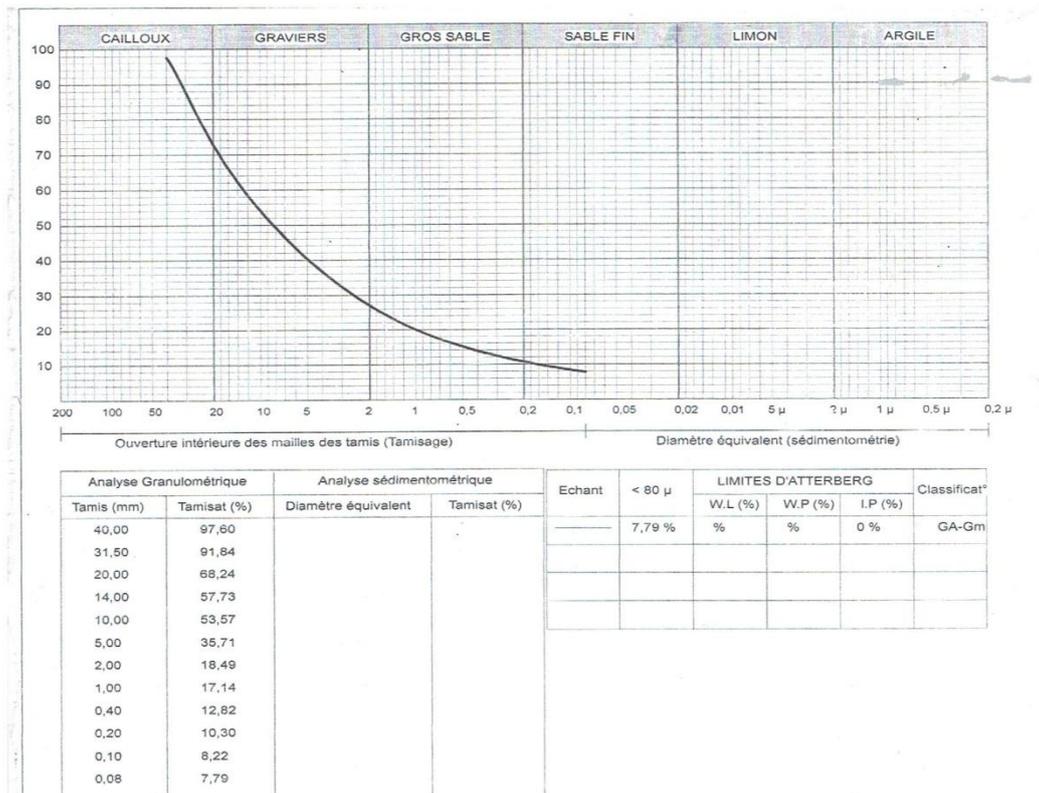
Le paramètre de courbure, appelé coefficient de courbure (Cc), donné par la relation:

$$C_C = \frac{D_{30}^2}{D_{10} \times D_{60}}$$

D<sub>10</sub>, D<sub>30</sub> et D<sub>60</sub> représentent les diamètres correspondant respectivement à 10, 30 et 60% du tamisât cumulé. Par définition, un sol est dit à granulométrie étalée, lorsque celui-ci est constitué de particules dont les diamètres forment une gamme étendue et présente une courbe régulière et légèrement concave vers le haut. Contrairement, un sol peu étalé est celui qui affiche un excès ou un déficit de particules d'un diamètre donné (R.D Holtz et W.D Kovacs, 1999). Les coefficients Cu et Cc ont été évalués par application des relations.



**Figure IV.5 :** Séries de tamis de l'analyse granulométrique (LCTP, Alger).



**Figure IV.6 : Courbe granulométrique, (LCTP, Alger).**

**Tableau IV-2 : Classement des matériaux suivant leur diamètre, (Randrianandrasana.A-P, 2005).**

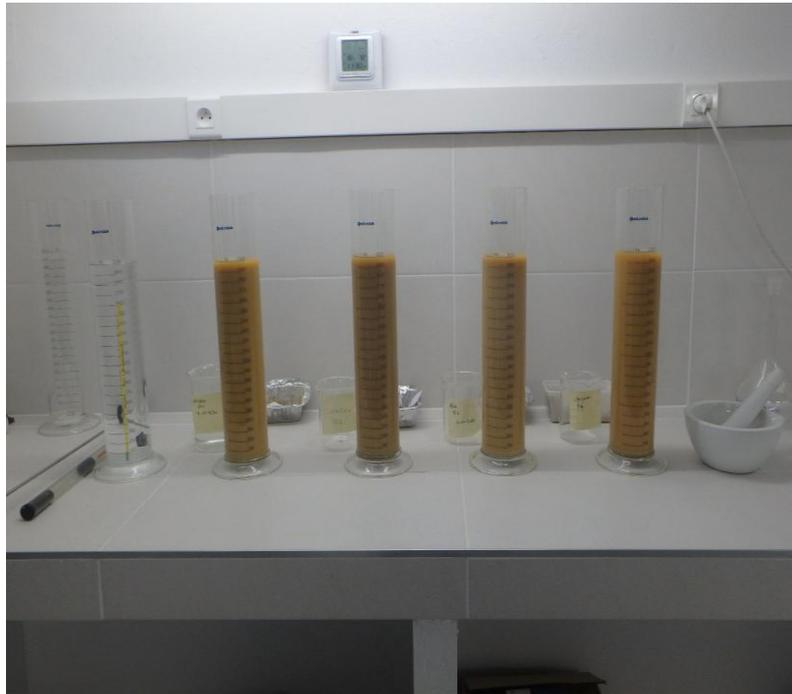
Matériau	Bloc rocheux	cailloux	Graviers	sables	limon	argiles
Diamètre	>200mm	20mm à 200mm	2mm à 20mm	0,02mm à 2mm	2μ à 0,02mm	< 2μ

#### IV. 2. 3. Sédimentométrie (NA.52-51)

Cette analyse permet de déterminer le pourcentage des particules argileuses dans un matériau. Dans l'étude des sols, on désigne par argile la fraction de matériau comprenant des éléments de diamètres inférieurs à 2μm. Le principe de la sédimentométrie est basé sur la loi de Stokes qui mesure la vitesse de décantation des particules sphériques dans un milieu visqueux sous l'influence de la force de gravitation et de la résistance du milieu.

On prend 20g de matériau sec sont pesés et introduits dans une éprouvette A. Par la suite, 30 cm<sup>3</sup> de solution d'hexamétophosphate de sodium à 5% et 200 cm<sup>3</sup> d'eau déminéralisée sont ajoutés, puis le tout est agité manuellement. Après un repos de 24 h, on agite à nouveau pendant 10 minutes et le volume de la solution de l'éprouvette A est complété à 1000 cm<sup>3</sup> avec l'eau déminéralisée. De la même manière, on prépare une autre solution dans l'éprouvette B, 30 cm<sup>3</sup> de solution d'hexamétophosphate de sodium à 5%, complétée à 1000 cm<sup>3</sup> avec l'eau déminéralisée. Les éprouvettes A et B sont placées dans un

bain d'eau froide afin d'uniformiser la température. Le densimètre est d'abord introduit dans l'éprouvette B, et, concomitamment on agite vigoureusement la solution de l'éprouvette A. Aux différents instants, après avoir effectué la lecture de B, le densimètre est enlevé et introduit doucement dans l'éprouvette A et la lecture est à nouveau effectuée. A chaque lecture du densimètre, la température est aussi mesurée dans le bain d'eau froide.



**Figure IV.7 :** Analyse granulométrique par sédimentométrie, (Gia ingénierie, Marseille).

#### **IV. 2. 4 Equivalent de sable (NF.P.18-598)**

L'essai consiste à déterminer l'importance des fines  $\leq 63\mu\text{m}$  flocculables continues dans les sols indique le degré de pollution des éléments fins dans les sols. On passe au tamis de 5mm le matériau à étudier. Prélèvement une fraction à l'aide d'un godet H=45mm et araser représente environ de 120 g.

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

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

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

Pour la mesure on a Laissé reposer chaque cylindre gradué sans dérangement ni vibration, pendant  $(0,00 \pm 0,25)$  min, à la fin de cette période et à l'aide du réglet, après mesurer la hauteur  $h_1$  du niveau supérieur du floculat par rapport au fond du cylindre gradué Abaisser soigneusement l'ensemble du piston dans le cylindre, jusqu'à ce que l'embase repose sur le sédiment.

Pour le Calcul et l'expression des résultats : On Calcule le rapport  $(h_2/ h_1) \times 100$  pour chaque cylindre avec un chiffre après la virgule. On Calcule l'équivalent de sable (**ES**) comme la moyenne des rapports  $(h_2/ h_1) \times 100$ . On obtient sur chaque cylindre et enregistrer au nombre entier le plus proche. Plus la valeur (**ES**) est proche du 100, plus le sable est propre, par contre plus elle se reproche du 0 plus le sable devient moins propre.

**Tableau IV-3 : La qualité du sable en fonction de son ES (NF.EN.933-8).**

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



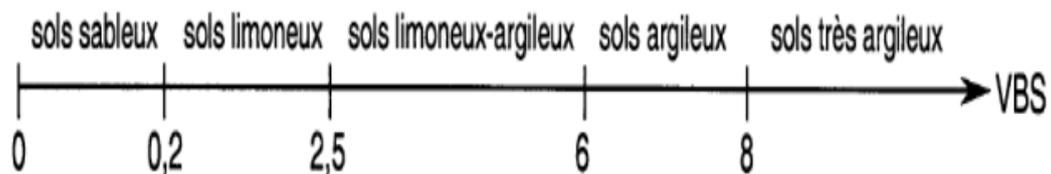
**Figure IV.8 : Equivalent de sable (LCTP, Alger).**

#### IV. 2. 5. Essai au bleu de méthylène (NA.19-48)

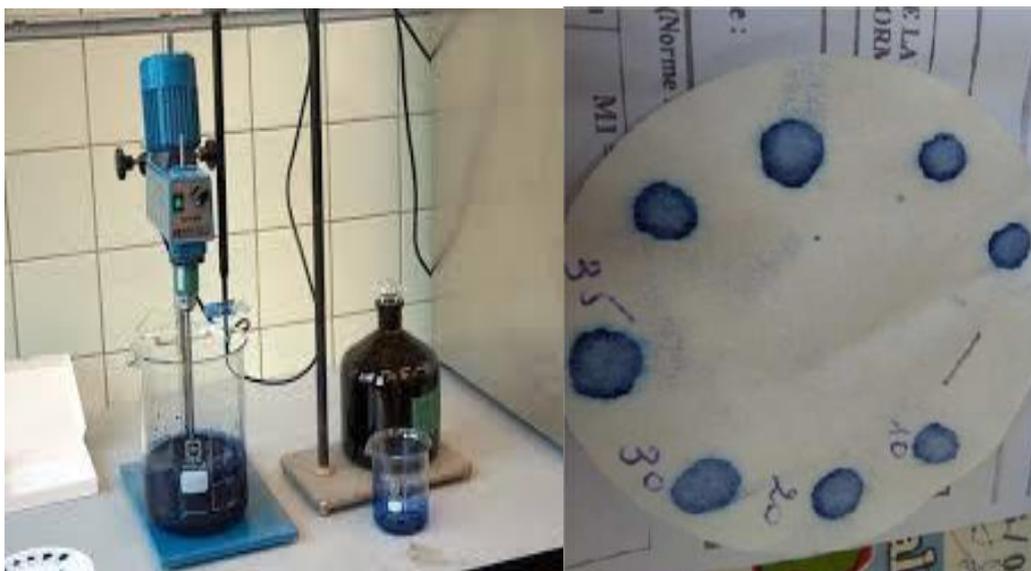
Il s'agit aussi d'un paramètre permettant de caractériser l'argilosité d'un sol. L'essai est effectué selon la norme (NA.19-48). Son application est récente. Ce paramètre noté **VBS** (valeur de bleu du sol), représente la quantité de bleu de méthylène pouvant s'adsorber sur les surfaces externes et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

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

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



**Figure IV.9 :** Ordre de grandeur (Type de sol en fonction de la valeur VBS) (Léreau 2005: INSA-Institut National Des Sciences Appliqués De Toulouse).



**Figure IV.10 :** manipulation de l'essai de bleu.

### IV. 3. Essai Proctor (NF.P.94-093)

L'essai consiste à damer un échantillon de sol de manière définie et répétitive en faisant varier sa teneur en eau. La mesure régulière de la teneur en eau et de la masse volumique sèche du matériau, une fois reportée sur un graphique, permet d'obtenir une courbe en cloche. L'optimum est alors déterminé par le point maximal de la courbe qui donne la teneur en eau optimale pour une masse volumique maximum.

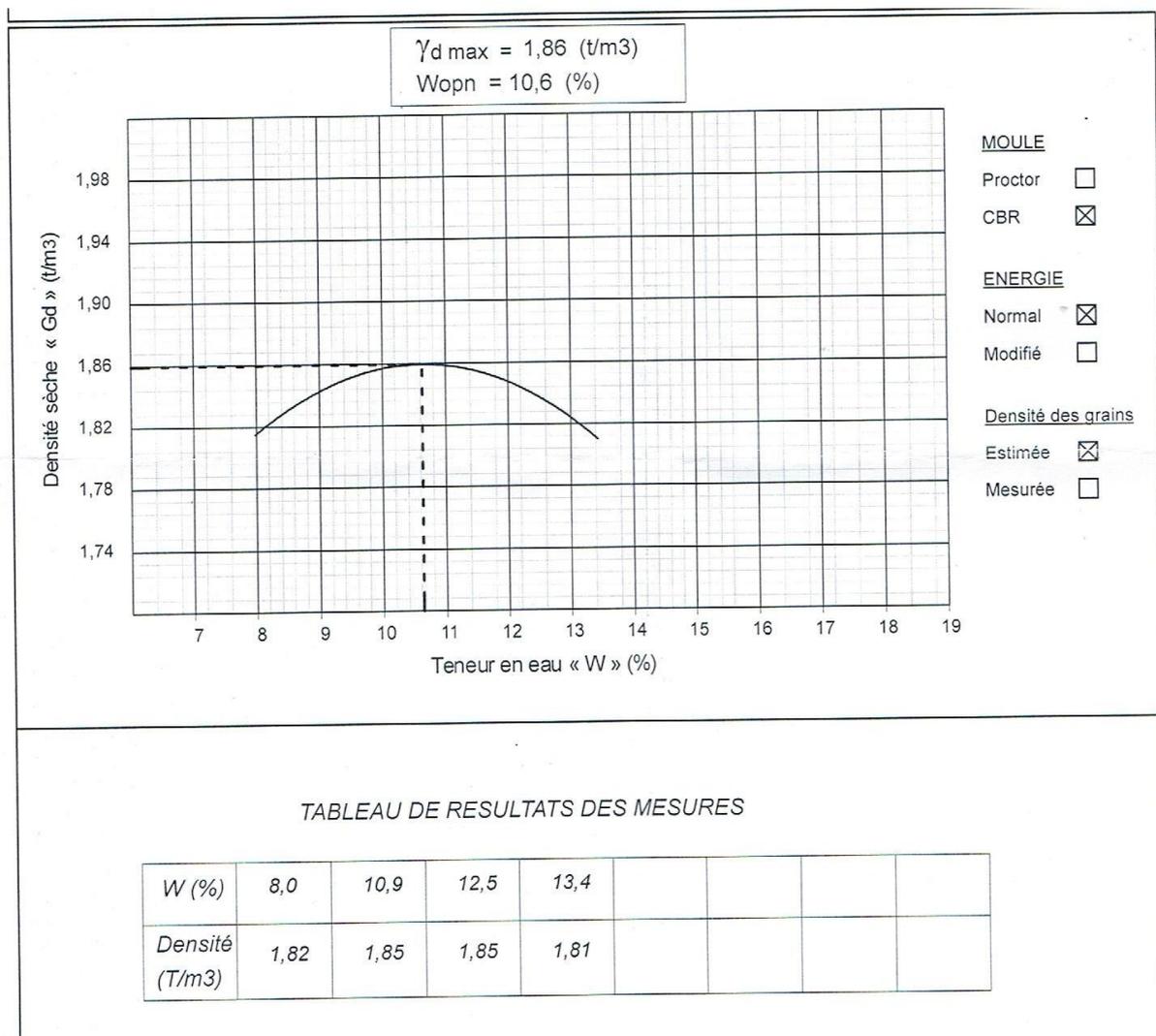
Les caractéristiques du creuset et de la dame utilisées pour l'essai sont explicitement définies par la norme (NF.P.94-0931), et correspondent aux conditions de compactage classique d'un engin de chantier pour les terrassements.

L'essai permet alors de mesurer l'optimum Proctor *normal* ( $W_{opn}$  et  $\gamma_{opn}$ ). L'énergie déployée lors de l'essai Proctor normal est équivalente à celles des compacteurs utilisés. La mise en œuvre en couches plus minces ou en déployant une énergie supplémentaire nécessite une adaptation des conditions de compactage de laboratoire. L'essai s'appelle alors essai Proctor *modifié* ( $W_{OPN}$  et  $\gamma_{OPN}$ ).



**Figure IV.11 : Essai Proctor (LCTP, Alger).**

La figure (IV. 12), présente la courbe Proctor d'un sol compacté au niveau du (LCTP, Alger).



**Figure IV.12 : Courbe Proctor, (LCTP, Alger).**

#### IV. 4. Détermination de la teneur en eau (NFP-94.050)

L'essai de teneur en eau permet de déterminer quel est le pourcentage massique ( $\omega\%$ ) d'eau dans le sol étudié, c'est-à-dire quelle est la masse d'eau présente par rapport à 100 grammes de sol sec. Cette information importante permettra de décider du traitement ou du compactage à apporter au sol et peut intervenir dans d'autres essais.

L'échantillon de matériau est pesé, puis placé dans une étuve. Une fois la dessiccation réalisée, l'échantillon est pesé à nouveau. Les deux pesées donnent par différence la masse d'eau évaporée. **(Figure. VI.10).**

La teneur en eau ( $\omega$ ) se calcule par la relation suivante :

$$\omega = [ (Ph - Ps) / Ps ] \times 100.$$



**Figure IV.13 : Détermination de la teneur en eau, (LCTP, Alger).**

L'essai permet de connaître la teneur en eau du matériau à mettre en œuvre, afin de la corriger au besoin en aérant le sol, ou en l'humidifiant. Le but de la correction d'une teneur en eau est de se rapprocher de la teneur en eau optimale qui permet d'obtenir un compactage maximum du matériau.

#### **IV. 5. Essai IPI (CBR), (NFP-94-078)**

L'essai permet de mesurer la portance d'un matériau compacté. Il consiste à comparer la résistance au poinçonnement d'un matériau à tester à celle d'un matériau de référence californien (grave naturelle). L'essai est réalisé en enfonçant à vitesse constante un poinçon cylindrique dans l'axe de l'éprouvette à la cadence normalisée de 1,27mm/min sur des éprouvettes de sol compactées à l'énergie Proctor dans des moules CBR. On mesure en continu la force appliquée en fonction de l'enfoncement du poinçon (généralement jusqu'à 10mm).

Après l'essai, on détermine l'effort de pénétration à appliquer au sol pour observer des enfoncements de 2,5 et 5mm (respectivement  $P_{2,5}$  et  $P_5$ ). L'indice **IPI** (exprimé en %) est défini comme étant la plus grande des deux valeurs suivantes:

$$IPI_{25} = \frac{100 \times F_{25}}{13,35} ; IPI_{50} = \frac{100 \times F_{50}}{19,93} ; IPI = \max (IPI_{25} ; IPI_{50}).$$

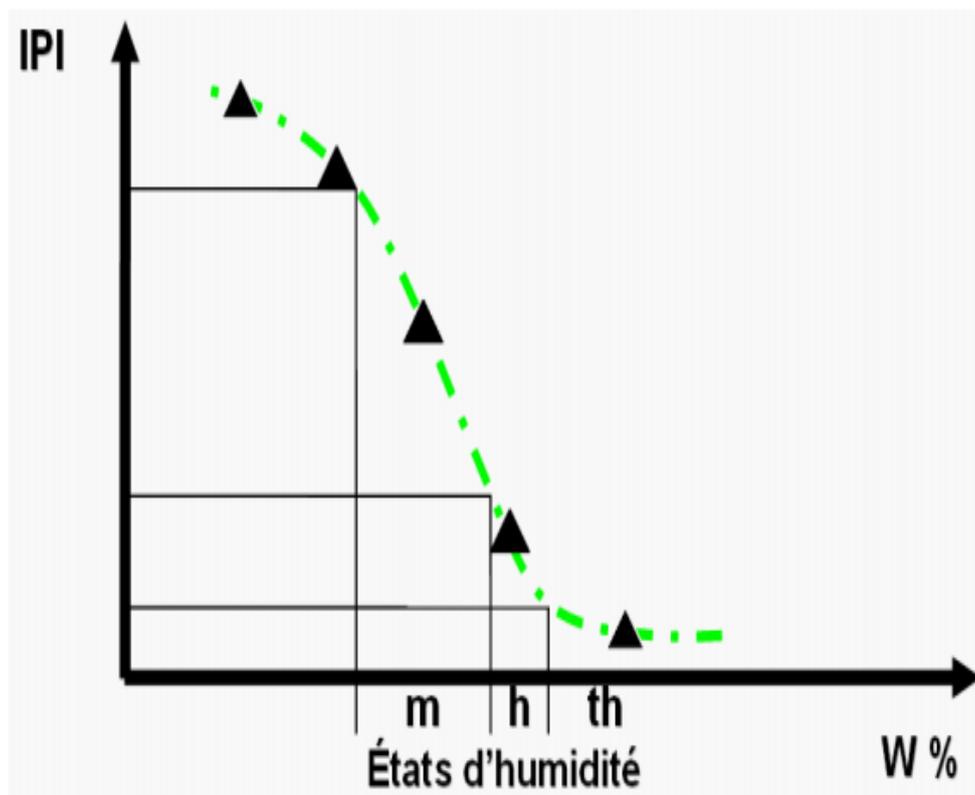
Avec:

- $F_{25}$  : Force (kN) à 2,5 mm d'enfoncement ;
- $F_{50}$  : Force (kN) à 5 mm d'enfoncement ;
- 13,35 : Force (kN) à 2,5 mm d'enfoncement pour le matériau type ;
- 19,93 : Force (kN) à 5 mm d'enfoncement pour le matériau type.



**Figure IV.14 : Essai CBR, (LCTP, Alger).**

Le poinçonnement est réalisé sur toutes les éprouvettes de l'essai Proctor, on peut ainsi établir un graphique CBR/teneur en eau au compactage qui donnera par la suite les états hydrique du sol. **(Figure. VI.11).**



**Figure IV.15 : Indice portant immédiat en fonction de la teneur en eau, (CETE).**

#### **IV. 5. Conclusion**

Dans ce chapitre on a présenté les techniques expérimentales que nous avons rencontrées au niveau de laboratoire (**LCTP, Alger**). Les essais présentés sont les essais d'identification nécessaires pour la classification des trois sols étudiés selon le (**GTR**), ainsi que l'essai Proctor et CBR. Certaines techniques sont courantes comme toutes celles utilisées pour l'identification physico chimique du matériau et les essais mécaniques. La mise en œuvre de ces techniques nous permettra de cerner les difficultés, les avantages et les inconvénients des différentes techniques utilisées au laboratoire.

## V. Chapitre V : Résultats et interprétation

### V. 1. Introduction

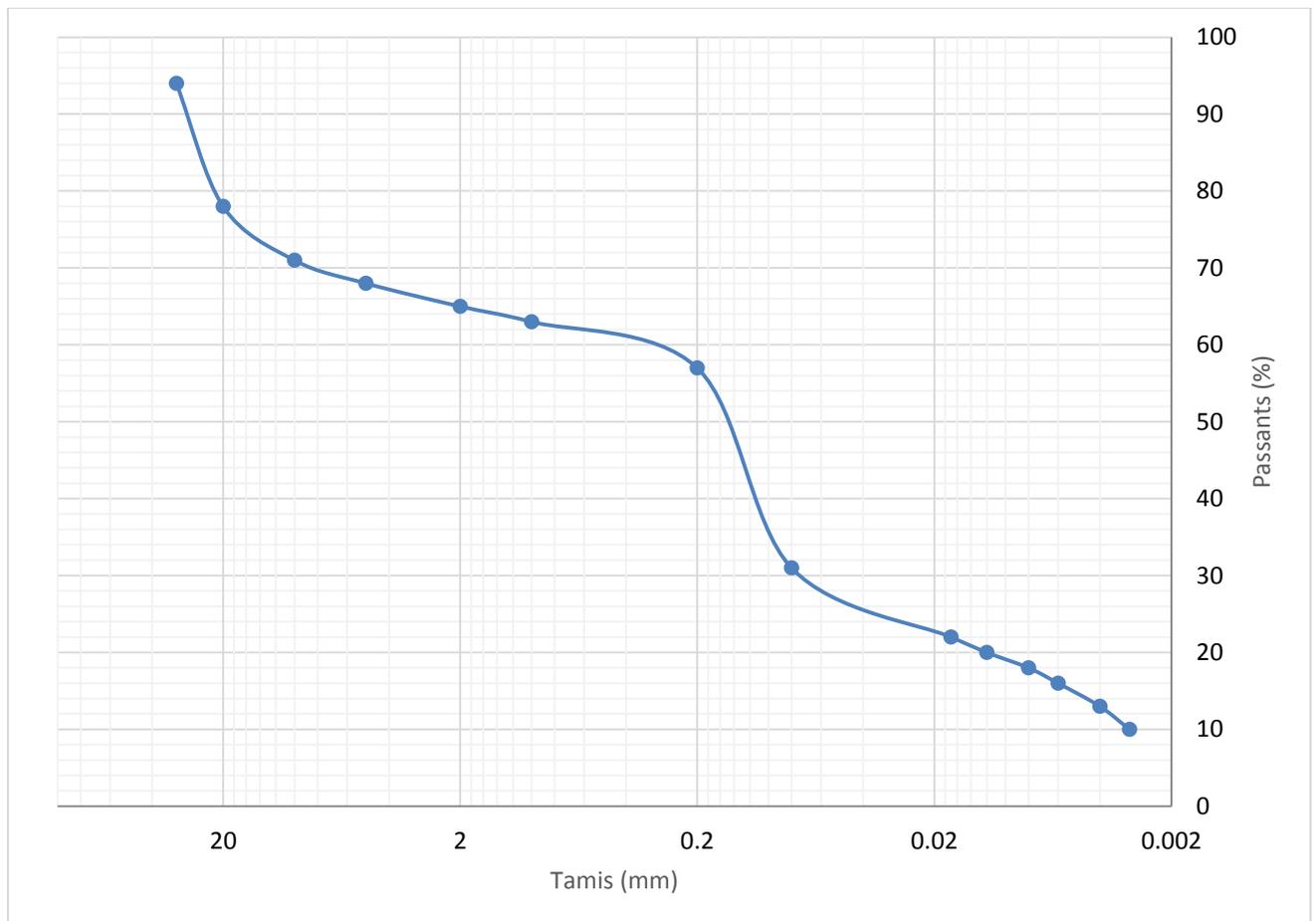
Dans ce chapitre nous présentons et nous interprétons des résultats expérimentaux récoltés par l'encadreur sur différents sols ; l'identification des trois matériaux, ainsi que les résultats des essais mécaniques et les résultats des essais de succion. Les prélèvements de trois matériaux viennent des remblais de la région de Chiffa-BLIDA .

### V. 2. Identification des sols étudiés

#### V. 2. 1. Identification du matériau 1

##### Courbe granulométrique

Les résultats de l'analyse granulométrique du matériau 1, donnent la courbe granulométrique suivante. (**Figure. V.1**).



**Figure V.1** : Courbe granulométrique (matériau 1).

La granulométrie d'un sol est caractérisée par un coefficient d'uniformité  $C_U$  :

- $D_{60} = 0,34\text{mm}$  ;
- $D_{10} = 0,003\text{mm}$ .

$$C_u = D_{60}/D_{10} = 0,34/0,003 = \mathbf{113,33} > 2.$$

Donc il s'agit d'une granulométrie étalée.

### La limite de liquidité

On a la teneur en eau qui correspond à 25 coups :  $W_L = 34 \%$ .

### La limite de plasticité

On a  $W_p = 21,58\%$ . On peut déduire l'indice de plasticité  $I_p = W_L - W_p = 12,42 \%$ .

$12\% \leq I_p = 12,42 \leq 25\% \rightarrow$  Sol moyennement argileux.

### La valeur au bleu de méthylène

Masse sèche de l'échantillon pris de la fraction 0/2mm :  $m=60g$  ;

Volume total de la solution colorante ajoutée :  $V=23ml$  ;

Masse de bleu introduite :  $B=V*0.01=0,23g$

Valeur de bleu de méthylène :  $VBS = (B/M)*100 = 0,38$ .

$0,2 \leq VBS = 0,38 \leq 2,5 \rightarrow$  Sol limoneux.

### L'Equivalent de sable

On a Notre  $ES = 22,70\%$ .

$ES = 22,70\% \leq 60\%$ .

$\rightarrow$  Notre sol est un sable argileux.

### Synthèse des résultats d'identification du Matériau 1

D'après les essais d'identification du matériau 1. Le sol présente les caractéristiques géotechniques et physiques présentés dans le tableau suivant, avec un  $D_{max}$  inférieur à 50mm.

**Tableau V-1 : Synthèse des différents résultats d'identification (matériau1).**

Désignations	Résultats
$W_p$ (%)	21,58
$W_L$ (%)	34,00
$I_p$ (%)	12,42
VBS	0,38
ES (%)	22,9

La classification de ce sol se fait selon le (**GTR**). Le diamètre maximum est de 31,5mm, ce qui est inférieur à 50mm. Ainsi que les Passants à 80µm sont à 31%, cela est nettement inférieur à 35%.donc, le matériau est un **Sol sableux ou graveleux avec fines de classe B**.

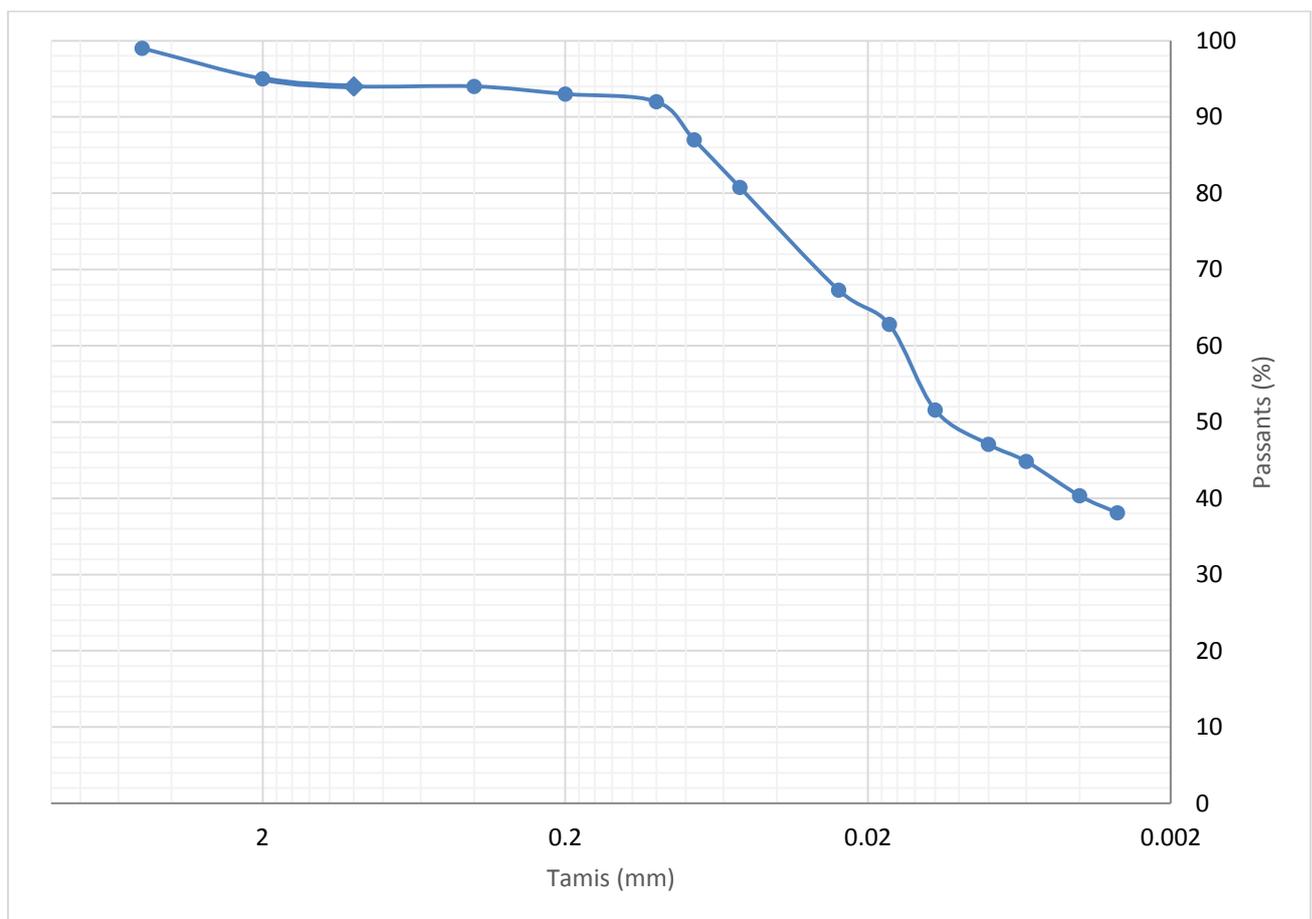
Le pourcentage des passants à 80µm, est inférieur a 35%, la Valeur au bleu de méthylène est à 0,38, et l'ES est à 22,9% (d'après le tableau de Synthèse des déférents résultats d'identification), le sol présente un indice de plasticité de 12%. Donc ce matériau, est à la sous **Classe B<sub>5</sub>, (Sables et graves très silteux)**.

## V. 2. 2. Identification du matériau 2

### Courbe granulométrique

Les résultats de l'analyse granulométrique du matériau 2, donnent la courbe granulométrique suivante. (**Figure. V.2**).

On remarque une discontinuité entre 0,2mm à 0,02mm, quand la granulométrie est discontinue avec prédominance d'une fraction le sol est dit **mal gradué**.



**Figure V.2 : Courbe granulométrique, (matériau 2).**

### La limite de liquidité

On a la teneur en eau qui correspond à 25 coups : **W<sub>L</sub> = 56,20 %**.

### La limite de plasticité

On a  $W_p = 24,48\%$ . On peut déduire l'indice de plasticité  $I_p = W_L - W_p = 31,36\%$ .

$25\% \leq I_p = 31,36\% \leq 40.$  → Sol argileux.

### La valeur au bleu de méthylène

Masse sèche de l'échantillon pris de la fraction  $\leq 0,125\text{mm}$  :  $m=30\text{g}$  ;

Volume total de la solution colorante ajoutée :  $V=80\text{ml}$  ;

Masse de bleu introduite :  $B=V*0.01=0,8\text{g}$

Valeur de bleu de méthylène :  $VBS= (B/M)*100= 2,66.$

$2,5 \leq VBS=2,66 \leq 6$  → Sol limoneux argileux.

### Synthèse des résultats d'identification du matériau 2

D'après les essais d'identification du matériau 2. Le sol présente les caractéristiques géotechniques et physiques présentés dans le tableau suivant, avec un  $D_{\text{max}}$  inférieur à 50mm.

**Tableau V-2 : Synthèse des différents résultats d'identification, (matériau 2).**

Désignations	Résultats
$W_p$ (%)	24,48
$W_L$ (%)	56,20
$I_p$ (%)	31,36
VBS	2,66

La classification de ce sol se fait selon le **GTR**. le diamètre maximum est de 5mm, ce qui est inférieur à 50mm. Ainsi que les Passants à 80 $\mu\text{m}$  sont à 92%, cela est nettement supérieur à 35%.donc, le matériau est un **Sol fin de classe A**.

La valeur de bleu de méthylène est de 2,66 ce qui est supérieur à 2,5 (d'après le tableau de Synthèse des différents résultats d'identification), le sol présente un indice de plasticité de 31,6%. Donc ce matériau, est à la sous **Classe A<sub>3</sub>, (Argile marneuse)**.

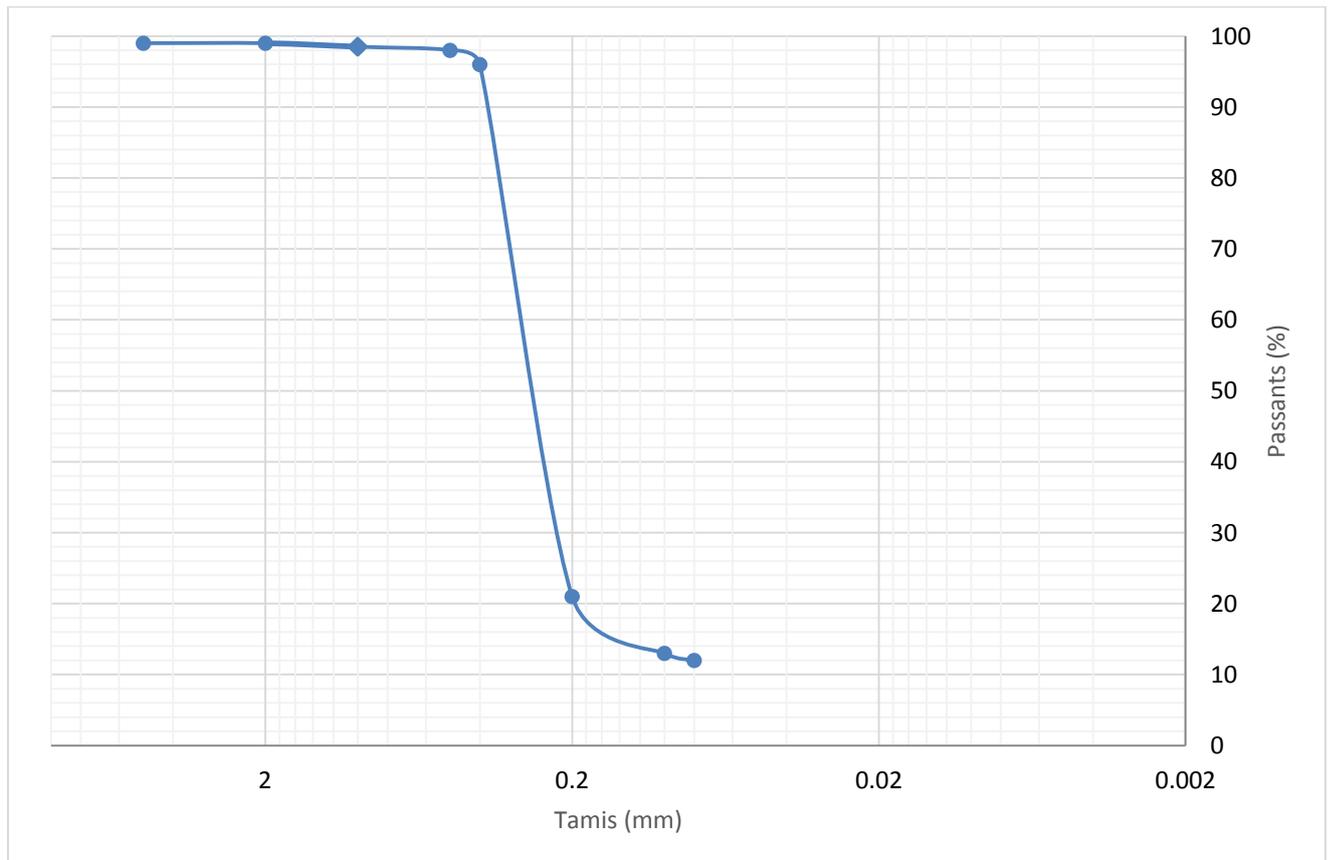
### V. 2. 3. Identification du matériau 3

#### Courbe granulométrique

Les résultats de l'analyse granulométrique du matériau 3, donnent la courbe granulométrique suivante. (**Figure. V.3**).

On remarque une discontinuité dans la partie de gros sable.

Quand la granulométrie est discontinue, avec prédominance d'une fraction particulière, il est dit **mal gradué**.



**Figure V.3** : Courbe granulométrique, (matériau 3).

#### L'Equivalent de sable

On a notre **ES= 47%**.

**ES= 47% ≤ 60% → notre sable est un sable argileux.**

#### La valeur au bleu de méthylène

Masse sèche de l'échantillon pris de la fraction 0/2mm :  $m=60g$  ;

Volume total de la solution colorante ajoutée :  $V=23ml$  ;

Masse de bleu introduite :  $B=V*0.01=0,23g$

Valeur de bleu de méthylène :  $VBS = (B/M) * 100 = 0,38$ .

**Synthèse des résultats d'identification du matériau 3**

D'après les essais d'identification du matériau 3. Le sol présente les caractéristiques géotechniques et physiques présentés dans le tableau suivant, avec un  $D_{max}$  inférieur à 50mm.

**Tableau V-3 : Synthèse des différents résultats d'identification, (matériau 3).**

Désignations	Résultats
Equivalent de sable (%)	47
Valeur au bleu de méthylène	0,38

La classification de ce sol se fait selon le **GTR**. Le diamètre maximum est de 5mm, ce qui est inférieur à 50mm.

Ainsi que les Passants à 80µm sont à 12%, cela est nettement inférieur à 35%.donc, le matériau est **un Sol sableux et graveleux avec des fines de classe B**.

Les tamisât à 2mm sont à 99% supérieur nettement à 70%, et la valeur de VBS et à 0,38.

Le ES est supérieur a 35 (d'après le tableau de Synthèse des déférents résultats d'identification), Donc ce matériau, est à la sous **Classe B2, (Sables peu argileux...)**.

**V. 2. 4. Synthèse des résultats des trois matériaux**

D'après les essais d'identification des trois sols nous avons pu les classer selon le **GTR**, la synthèse des résultats sont donner dans le tableau **(V. 4)**.

**Tableau V-4 : Classification des trois matériaux selon le (GTR).**

Matériau	Classification	Sols
matériau 1	B <sub>5</sub>	<i>Sables et graves très silteux</i>
matériau 2	A <sub>3</sub>	<i>Argile marneuse</i>
matériau 3	B <sub>2</sub>	<i>Sable peu argileux</i>

### V. 3. Méthode suivie au laboratoire pour la mesure de la succion

Pour déterminer l'influence possible de la succion et la participation de la rétention d'eau au compactage des sols, des mesures de succion doivent être réalisés au sein du sol compacté.

On veut déterminer en quelques sortes la courbe de rétention du sol compacté allant d'une teneur en eau nulle jusqu'à des teneurs en eau importantes.

On tentera de trouver une explication de la participation de l'eau à la compactibilité de sol.

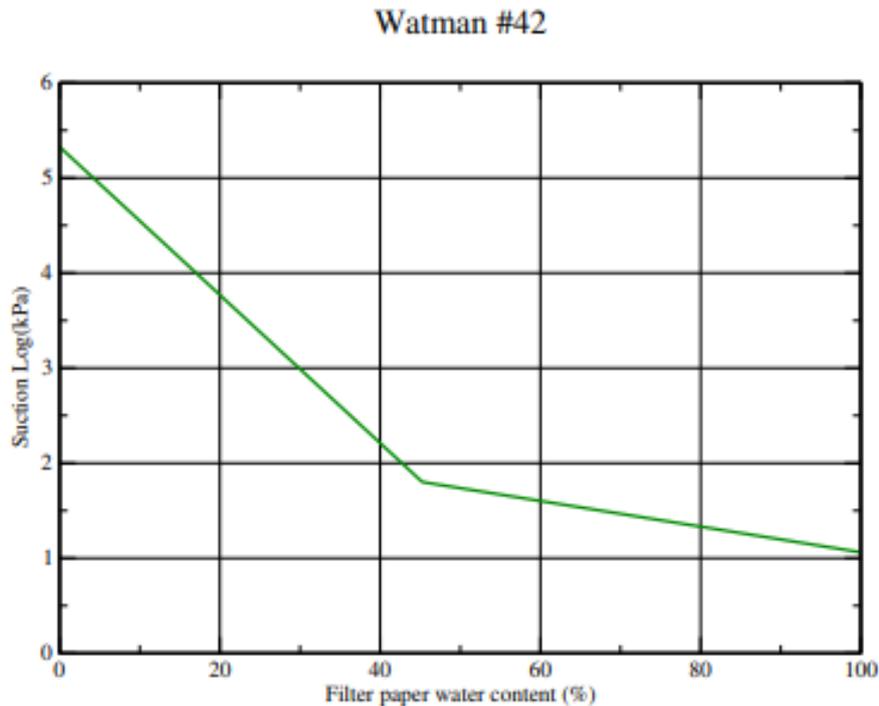
Pour mesurer la succion, il existe plusieurs méthodes. Notamment, la technique du papier filtre (**Whatman n° 42**), (**Figure. V.4**).



**Figure V.4 :** Papier filtre Whatman n° 42.

#### **Résultats de succion pour une Argile marneuse (matériau 2)**

Les différents résultats trouvés lors la mesure de la succion sont représentés dans le tableau (**V. 5**). Les valeurs de la succion sont déterminées en projetant les teneurs en eau du papier filtre sur la **Courbe d'étalonnage** du papier filtre utilisé (Wathman 42). (**Figure. V. 5**).



**Figure V.5** : Courbe d'étalonnage du papier filtre Wathman 42, (Fleureau et al, 2002).

**Tableau V-5** : Résultats de mesure de succion et la teneur en eau du le papier filtre (matériau 2).

$\omega_{\text{sol}}$ (%)	1,29	5,69	9,59	15,73	19,18	22,99	23,26
$\omega_{\text{papier filtre}}$ (%)	4,74	7,47	10,82	10,81	26,83	91,37	26,94
Log Succion $\Psi$ (Kpa)	4,8	4,65	4,35	4,34	3,30	1,40	3,25
Succion $\Psi$ (Kpa)	63095,73	44668,36	22387,21	21877,61	1995,26	25,12	1778,28
$\gamma_d$ (t/m <sup>3</sup> )	1,57	1,43	1,44	1,59	1,62	1,58	1,64
$\Theta$ (%)	2,02	8,12	13,81	25,01	31,07	36,31	38,15

Le nombre des points mesurés est insuffisant pour tracer la courbe de rétention complète, pour cela nous allons utiliser **les courbes types de succion (Figure. V.6)**, elles sont valables pour chaque sol (sol argileux, sol limoneux, sol sableux).

Les points expérimentaux, le type de sol et les courbes type de succion, vont permettre de déterminer l'allure de la courbe de succion, alors, nous allons tracer l'allure de succion du matériau 2 (Argile), comme suit en se basant sur les paramètres et les critères cités en avant.

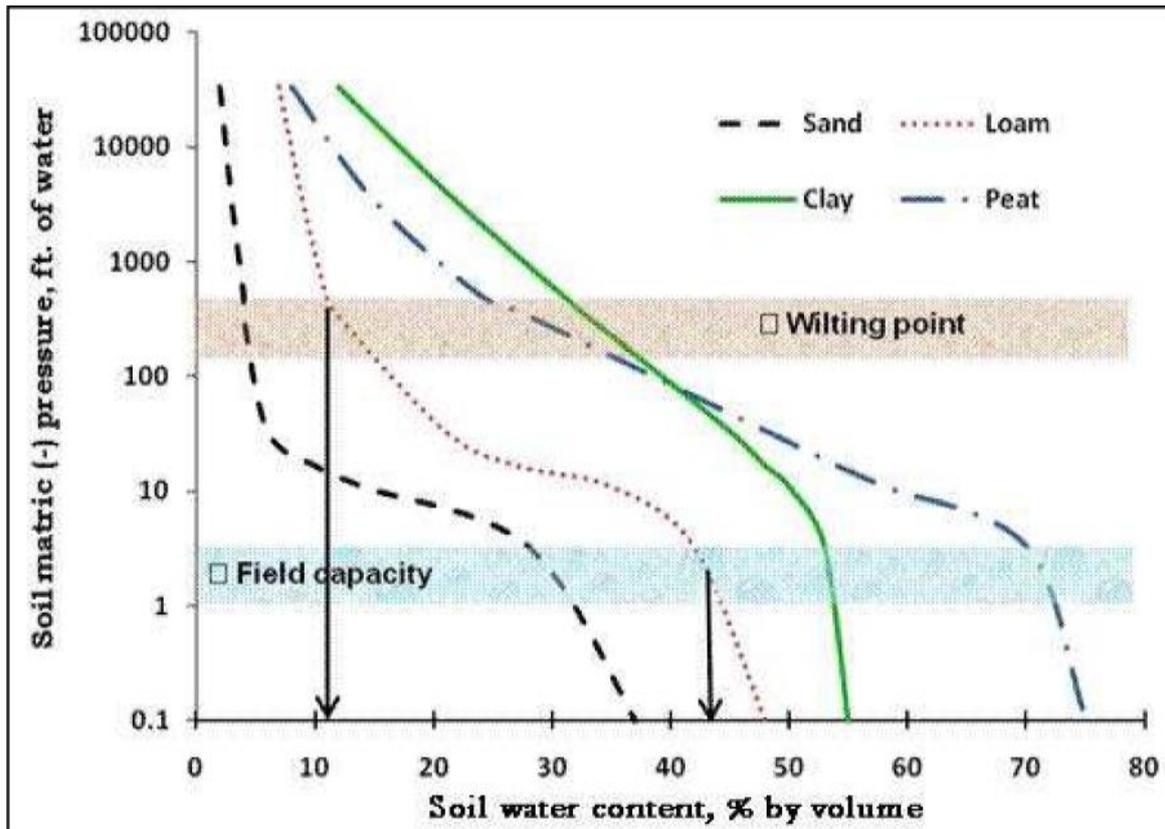


Figure V.6 : Les différentes courbes de rétention selon la nature de sol, (S. Salager, 2007).

Notre sol a une nature et comportement plus proche à l'argile. L'allure de cette argile est présentée dans la (Figure. V.7).

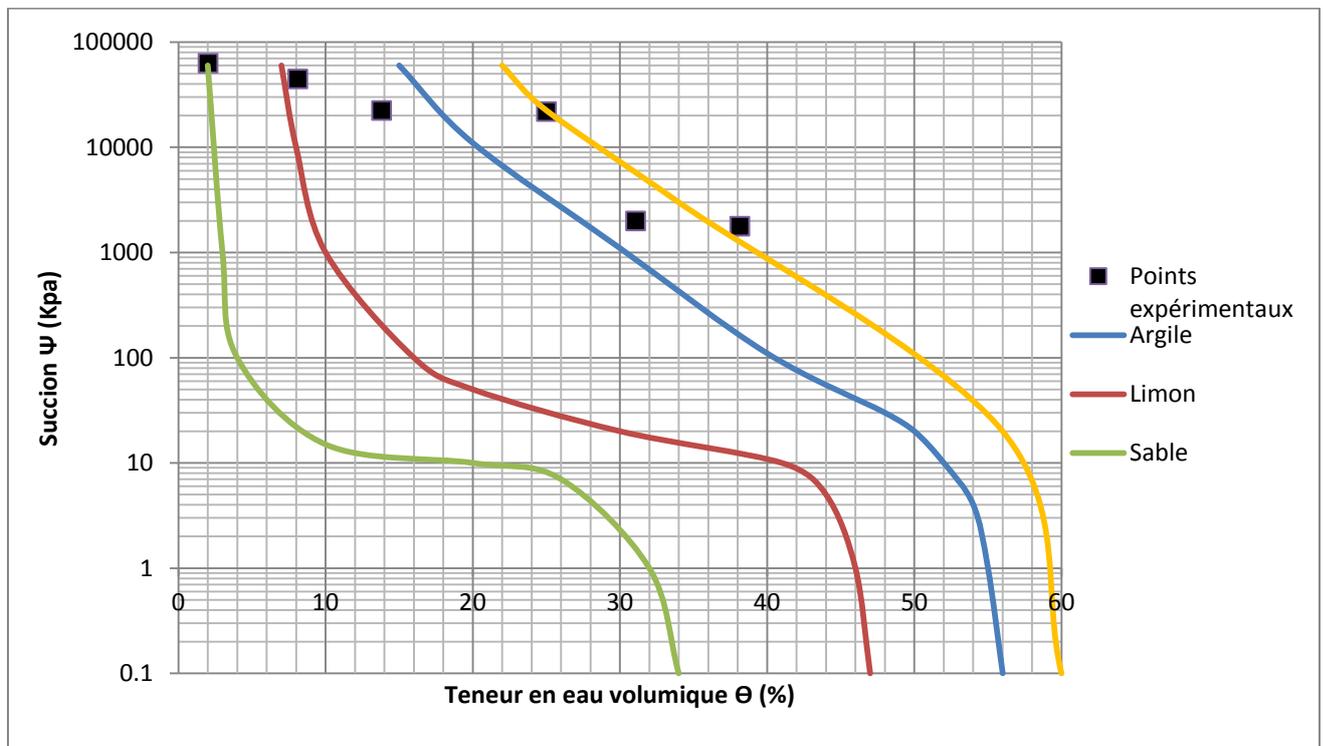


Figure V.7 : Position de la courbe de succion (matériau 2) par rapport aux autres types de sol.

Le sol étudié est un sol fin, on remarque que lorsque la teneur en eau volumique est supérieure à 57%, le sol commence à présenter une succion faible et inférieure à 10Kpa. Donc on peut considérer le point (56% ; 20Kpa), comme étant le point d'entrée d'air. Cette phase de petite perturbation s'arrête au point de saturation (60% ; 0,1Kpa). Dans la deuxième phase la succion présente une variation importante pour des teneurs en eau très faibles, la succion peut aller jusqu'à 60000Kpa (Figure. V.7).

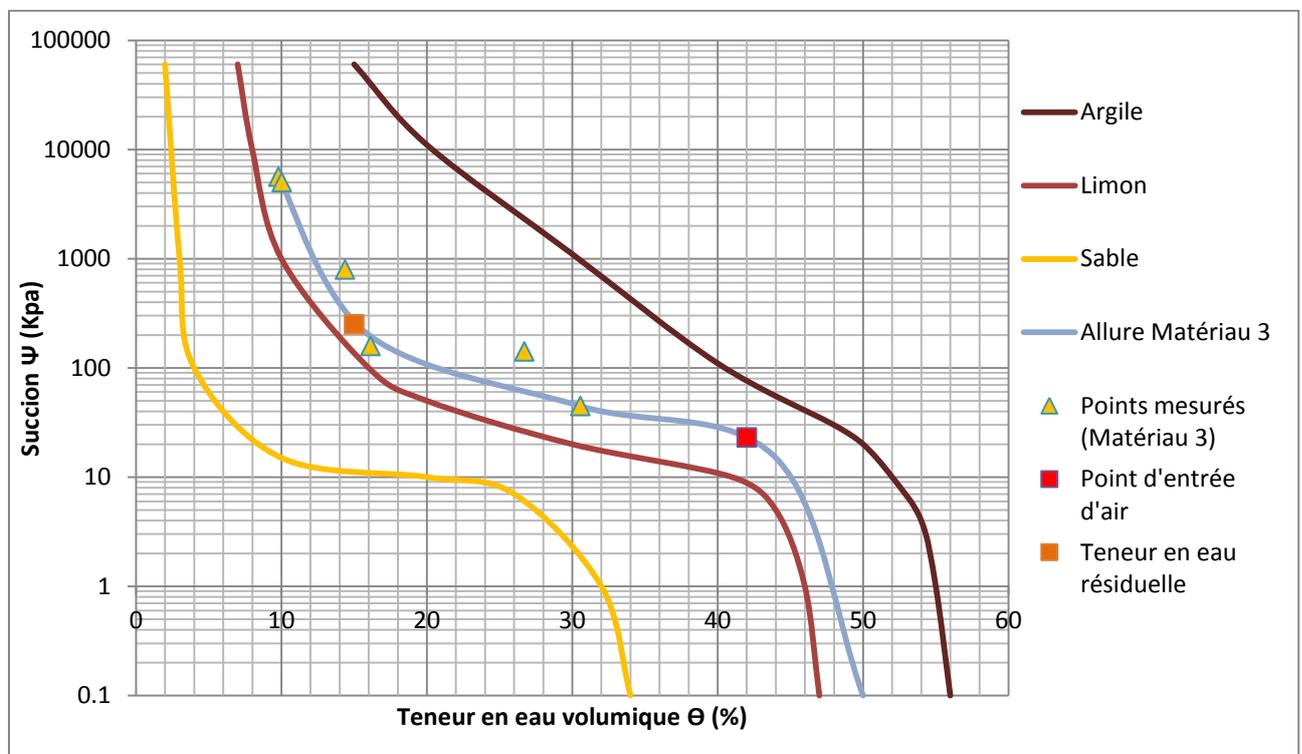
### **Résultats de succion pour un sable peu argileux (matériau 3)**

Par les mêmes étapes précédentes on représente les résultats de mesure de la succion pour le matériau 3 :

**Tableau V-6 : Résultats de mesure de succion et la teneur en eau du le papier filtre (matériau 3).**

$\omega_{\text{sol}} (\%)$	0,59	5,86	5,93	8,30	9,17	15,52	18,78
$\omega_{\text{papier filtre}} (\%)$	0,72	18,37	19,19	31,75	42,72	40,88	56,99
Log Succion $\Psi$ (Kpa)	4,8	4,65	4,35	4,34	3,30	1,40	3,25
Succion $\Psi$ (Kpa)	316227,76	5623,41	5011,57	794,33	158,48	141,25	44,69
$\gamma_d (t/m^3)$	5,5	3,75	3,70	2,90	2,20	2,15	1,65
$\Theta (\%)$	0,91	9,79	10,02	14,37	16,12	26,70	30,55

Notre courbe de succion est présentée dans la (Figure. V.8).



**Figure V.8 : Position de la courbe de succion (matériau 3) par rapport aux d'autre type de sol.**

On remarque que l'allure de ce sol, s'approche à la courbe de succion du limon. On explique cette convergence au comportement du limon, par ce que ce sol, est un sable silteux qui contient une fraction non négligeable de fines ; les éléments inférieurs à 0,08mm, sont autour de 12% d'après l'analyse granulométrique du ce sol.

Le sol étudié est un sol sableux qui contient des fines, on remarque que lorsque la teneur en eau volumique est supérieure à 42%, le sol commence à présenter une succion faible et inférieure à 20Kpa. Donc on peut considérer le point **(42% ; 20Kpa)**, comme étant **le point d'entrée d'air**. Cette phase de petite perturbation s'arrête au point de saturation **(50% ; 0,1Kpa)**.

Entre une teneur en eau volumique de 42%, jusqu'à 15%, l'allure devient pratiquement plate, elle commence d'une succion de 10Kpa, jusqu'au point d'inflexion pour une **teneur en eau résiduelle** de 15% et une succion de 150Kpa. Dans la dernière phase la succion présente une variation importante pour des teneurs en eau faibles voir très faibles, elle peut aller jusqu'à 60000Kpa, **(Figure. V.8)**.

#### **Synthèse des résultats de succion des deux matériaux**

Pour l'interprétation des mesures de la succion, nous allons regrouper les données principales dans le tableau **(V. 7)**.

**Tableau V-7 : Synthèse des résultats de succion.**

Désignations	Matériau 2 (Argile)	Matériau 3 (Sable)
Teneur en eau résiduelle (%)	/	(15% ; 150Kpa)
Point d'entrée d'air	(56% ; 20Kpa)	(42% ; 20Kpa)
Poin de saturation	(60% ; 0,1Kpa)	(50% ; 0,1Kpa)

La courbe de rétention d'eau varie avec le type de sol, plus le sol est fin, plus la pression d'entrée d'aire est grande, et plus les variations de succion sont importantes. Pour les argiles succion peut atteindre plusieurs (MPa). Ceci est lié d'une part à l'adsorption qui crée une succion osmotique, et d'autre part à la faible dimension des particules d'argile. Les pores sont alors plus petits. La teneur en eau résiduelle d'une argile est souvent plus grande que celle d'un sable (D'après le tableau de la synthèse des résultats de succion).

#### **V. 4. Courbes de Proctor normal et modifié**

A fin d'étudier la variation de  $\gamma_d = f(\omega)$  et de déterminer le  $\omega_{OPN}$  et  $\gamma_d$  correspondant, on trace les différentes courbes de Proctor normal et modifié sur trois matériaux différents, les résultats obtenus sont présentés ci-dessous sous forme de tableaux et de figures.

### Courbes Proctor d'un sable très silteux (matériau 1)

Pour le matériau 1, les résultats obtenus (densité sèche, teneur en eau), Proctor normal et modifié avec des teneurs en eau faibles jusqu'à des valeurs importantes, vont permettre de tracer les différentes courbes de Proctor.

**Tableau V-8 : Résultats de Proctor normal, (matériau 1).**

Eau ajoutée (%)	0	2	4	6	8	10	12	14	16
$\omega$ (%)	2,66	3,67	5,30	8,91	10,85	<b>12,73</b>	14,42	16,11	18,23
$\gamma_d$ (t/m <sup>3</sup> )	1,68	1,73	1,76	1,82	1,87	<b>1,90</b>	1,87	1,83	1,76

D'après le tableau (V. 8), la densité sèche maximale est de  $\gamma_d = 1,90$  (t/m<sup>3</sup>) pour une teneur en eau optimale de  $\omega_{OPT} = 12,73\%$ .

**Tableau V-9 : Résultats de Proctor modifié, (matériau 1).**

Eau ajoutée (%)	0	1	2	4	6	8	10	12	14	16
$\omega$ (%)	0,625	1,21	2,58	4,47	6,4	8,4	<b>10,21</b>	11,8	14,27	16,6
$\gamma_d$ (t/m <sup>3</sup> )	1,77	1,81	1,85	1,89	1,93	1,98	<b>2,00</b>	1,96	1,86	1,81

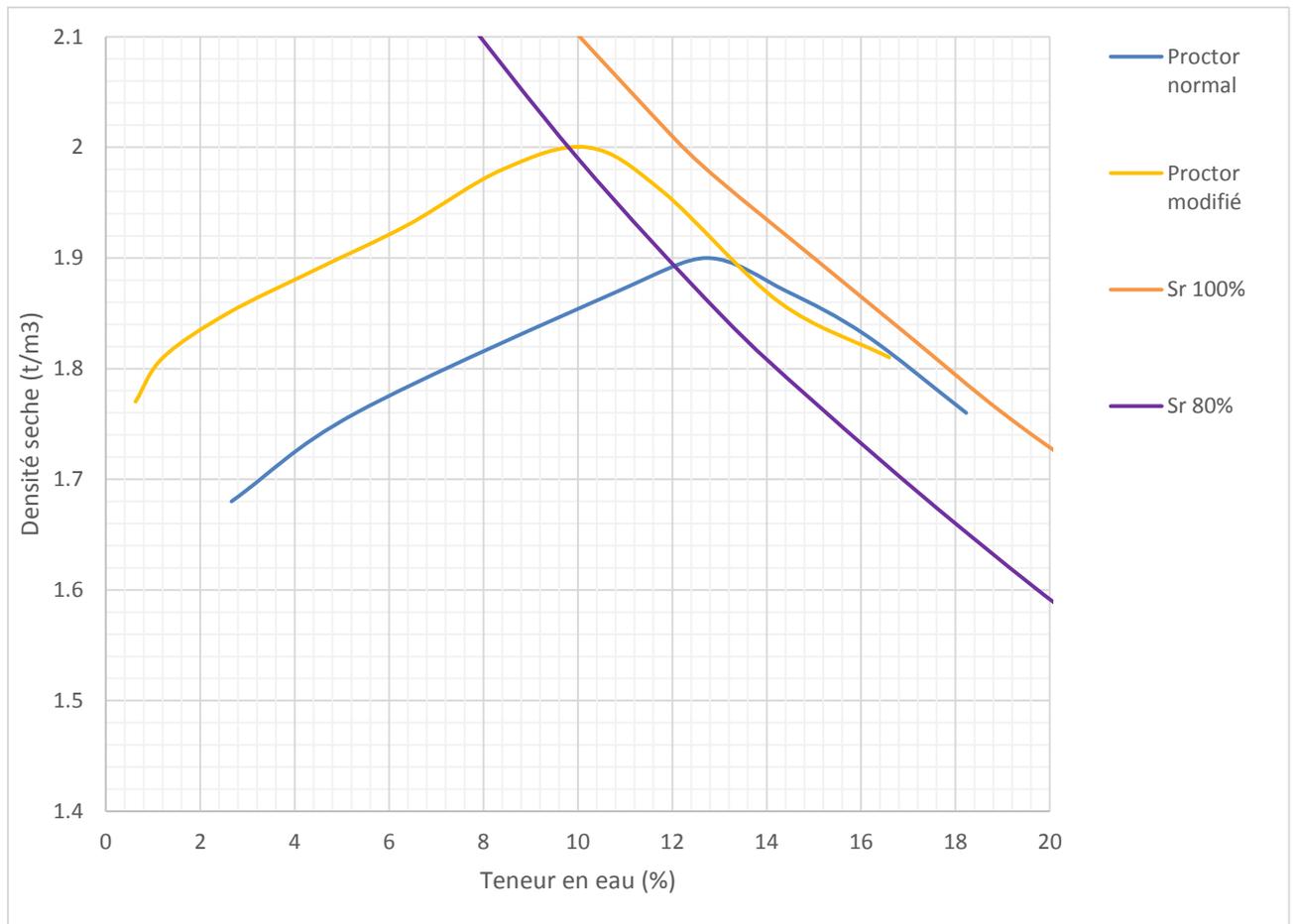
D'après le tableau (V. 9), la densité sèche maximale est de  $\gamma_d = 2,00$  (t/m<sup>3</sup>) pour une teneur en eau optimale de  $\omega_{OPT} = 10,73\%$ .

Les courbes Proctor normal et modifié sont présentés dans la (Figure. V.9). La courbe obtenue a une forme de cloche.

Dans un premier temps quand on fait augmenter la teneur en eau du matériau, sa densité sèche augmente, ça signifie qu'il devient plus compact et plus portant, avant d'arriver à un maximum de densité sèche obtenu pour une valeur précise de teneur en eau appelée l'optimum Proctor.

Pour cette valeur de teneur en eau, la densité sèche est maximale. Si on continue à faire augmenter la teneur en eau l'eau commence à absorber l'énergie du compactage et la densité sèche diminue.

En comparant les deux courbes de compactage normal et modifié, on remarque que l'énergie de compactage joue un rôle important pour arriver à des densités sèches optimales, c'est pour cela que le choix de type de l'engin est une étape à ne pas négliger



**Figure V.9 : Courbes Proctor (matériau 1).**

**Courbes Proctor d'une argile marneuse (matériau 2)**

Les résultats de Proctor normal et modifié sont présentés par les tableaux suivants.

**Tableau V-10 : Résultats de Proctor normal, (matériau 2).**

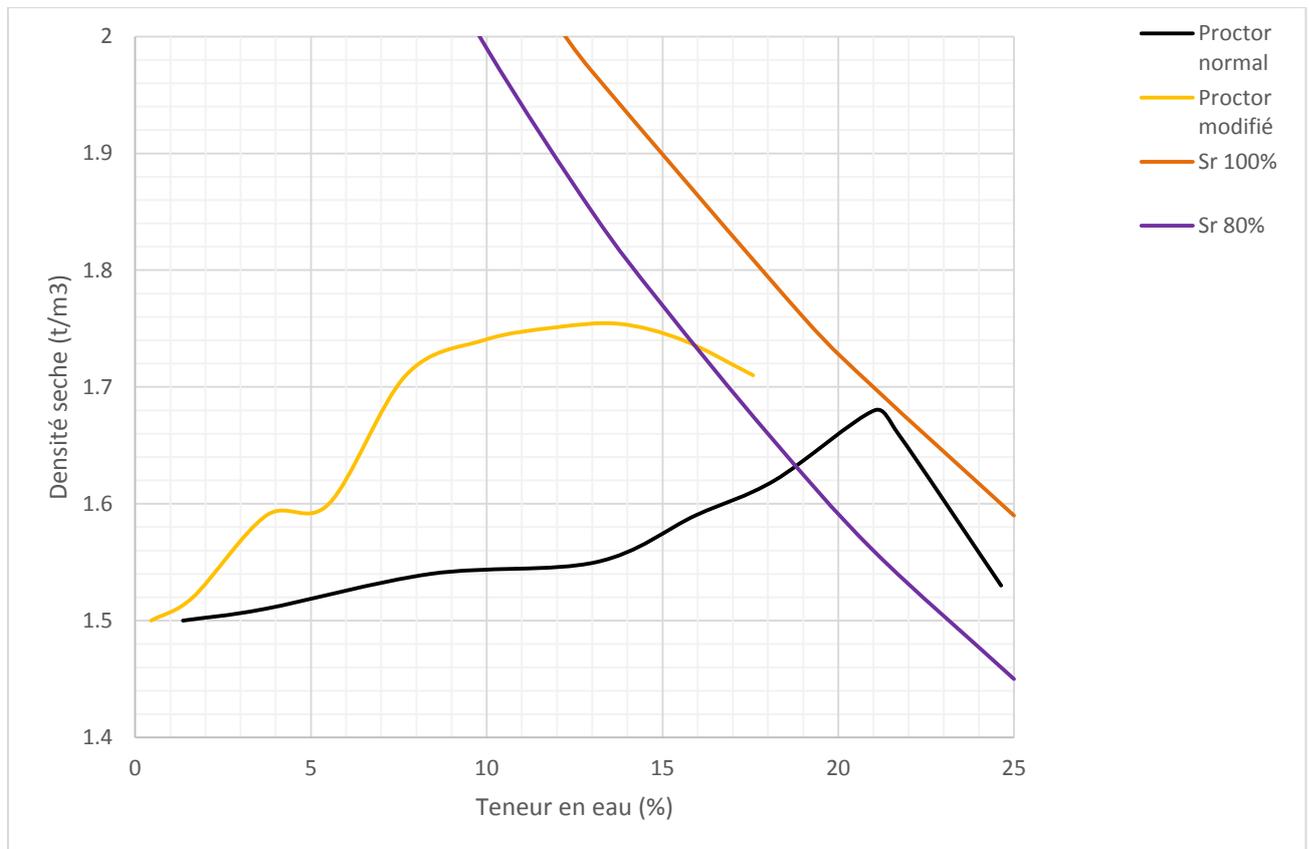
Eau ajoutée (%)	0	2	6	10	14	16	18	20	24
$\omega(\%)$	1,36	3,69	8,41	13,11	15,94	18,19	<b>21,04</b>	21,7	24,63
$\gamma_d$ (t/m <sup>3</sup> )	1,50	1,51	1,54	1,55	1,59	1,62	<b>1,68</b>	1,66	1,53

D'après le tableau (V. 10), la densité sèche maximale est de  $\gamma_d = 1,68$  (t/m<sup>3</sup>) pour une teneur en eau optimale de  $\omega_{OPT} = 21,04\%$ .

**Tableau V-11 : Résultats de Proctor modifié (matériau 2).**

Eau ajoutée (%)	0	2	4	6	8	10	12	14	16	18
$\omega(\%)$	0,45	1,46	3,73	5,51	7,70	9,91	11,96	<b>13,78</b>	15,59	17,58
$\gamma_d$ (t/m <sup>3</sup> )	1,50	1,52	1,59	1,66	1,71	1,74	1,751	<b>1,754</b>	1,74	1,71

D'après le tableau (V. 11), la densité sèche maximale est de  $\gamma_d = 1,754$  (t/m<sup>3</sup>) pour une teneur en eau optimale de  $\omega_{OPT} = 13,78\%$ .



**Figure V.10 : Courbes Proctor (Matériau 2).**

Le graphe représente deux courbes l'une est pour un Proctor normal et l'autre c'est pour un Proctor modifié. La courbe Proctor normal présente un pic et demi.

On remarque que l'optimum Proctor normal pour une teneur eau importante de  $\omega_{OPT} = 21\%$  le matériau à une densité sèche maximale de  $\gamma_d = 1,68$  t/m<sup>3</sup>, ainsi que la courbe de Proctor modifié donne une densité sèche maximale de  $\gamma_d = 1,76$  t/m<sup>3</sup> pour teneur en eau de  $\omega_{OPT} = 15\%$ , ce qui démontre encore une fois l'influence importante de l'énergie de compactage.

Les argiles à la teneur en eau optimale demandent des efforts de compactage importants, on remarque ça au niveau de laboratoire, il est toujours plus difficile de compacter les moules

ayant des teneurs en eau importantes ( $\geq 12\%$ ), c'est pour cela les compacteurs doivent exercer des forces de compression et de cisaillement relativement importantes sur le matériau.

Dans le cas des sols cohérents le compactage doit être réalisé en couche d'une épaisseur plus faible que dans le cas des sols pulvérulents.

L'eau joue un rôle de lubrifiant, elle facilite le déplacement et l'orientation des grains pour former une structure plus dense.

**Courbes Proctor d'un sable peu argileux (matériau 3)**

Pour le troisième matériau, les résultats obtenus (densité sèche, teneur en eau), après plusieurs essais de Proctor normal et modifié avec des teneurs en eau faibles jusqu'à des valeurs importantes, les résultats sont présentés en détail dans les tableaux suivant.

**Tableau V-12 : Résultats de Proctor normal (matériau 3).**

Eau ajoutée (%)	0	2	4	6	8	10	12	14	16
$\omega(\%)$	0,45	1,64	3,73	5,51	<b>7,70</b>	9,91	11,96	13,78	15,59
$\gamma_d$ (t/m <sup>3</sup> )	1,50	1,52	1,59	1,66	<b>1,78</b>	1,74	1,75	1,75	1,74

D'après le tableau (V. 12), la densité sèche maximale est de  $\gamma_d = 1,78$  (t/m<sup>3</sup>) pour une teneur en eau optimale de  $\omega_{OPT} = 7,70\%$ .

**Tableau V-13 : Résultats de Proctor modifié (matériau 3).**

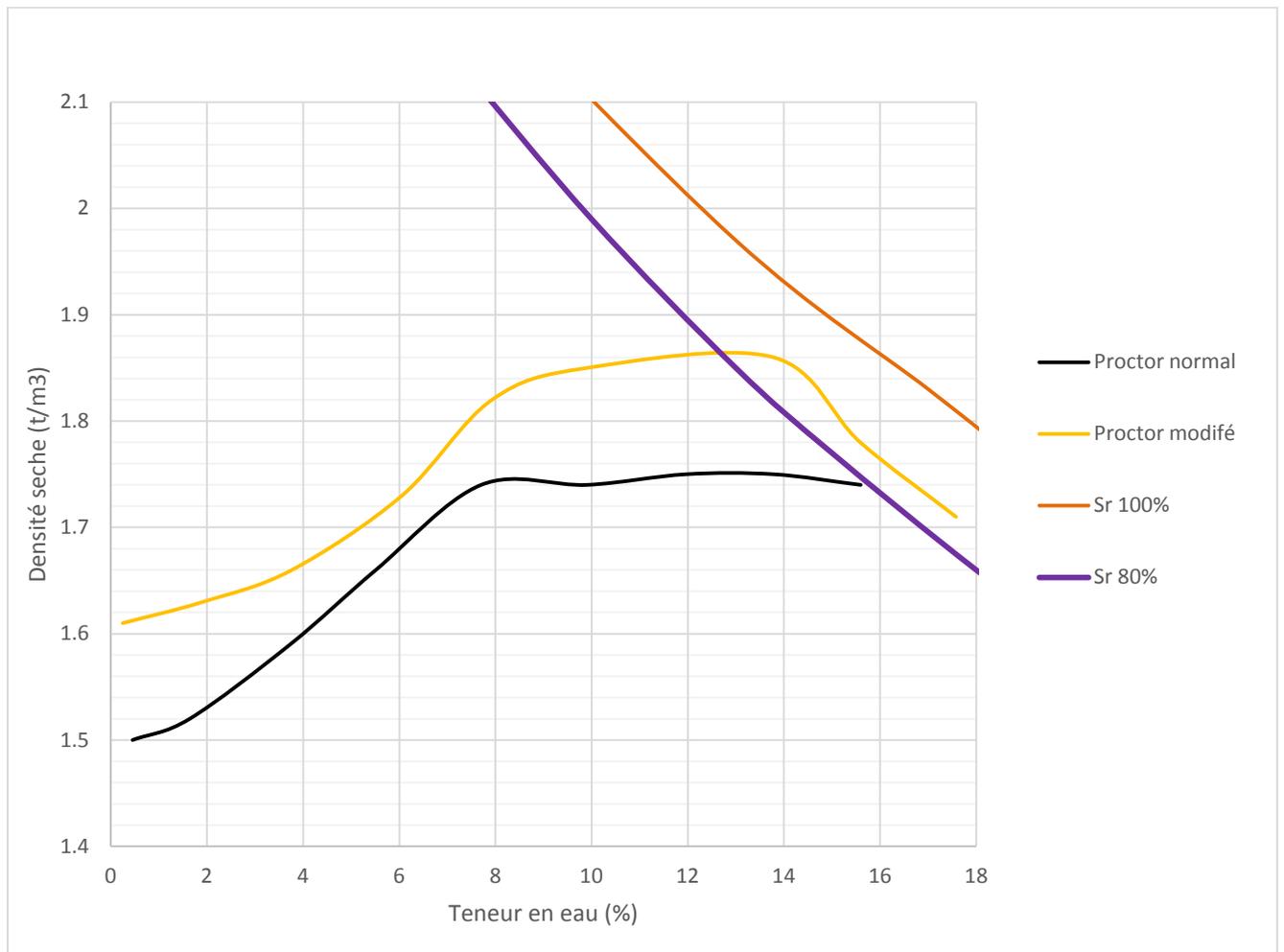
Eau ajoutée (%)	0	2	4	6	8	10	12	14	16
$\omega(\%)$	0,25	1,92	3,77	6,05	7,96	9,91	<b>13,78</b>	15,6	17,58
$\gamma_d$ (t/m <sup>3</sup> )	1,61	1,63	1,66	1,73	1,78	1,85	<b>1,86</b>	1,78	1,71

D'après le tableau (V. 13), la densité sèche maximale est de  $\gamma_d = 1,86$  (t/m<sup>3</sup>) pour une teneur en eau optimale de  $\omega_{OPT} = 13,78\%$ .

Le graphe présente deux courbe l'une d'un Proctor normal et l'autre d'un Proctor modifié d'un sable. (Figure. V.11).

On remarque que les courbes sont très aplaties, ça signifie que le compactage de ce matériau est peu influencé par la teneur en eau, ce genre des matériaux constituent donc les

meilleurs remblais, car il sont peu sensibles à l'eau, ce qui les rendent moins vulnérables face aux pluies diluviennes du sud algérien.



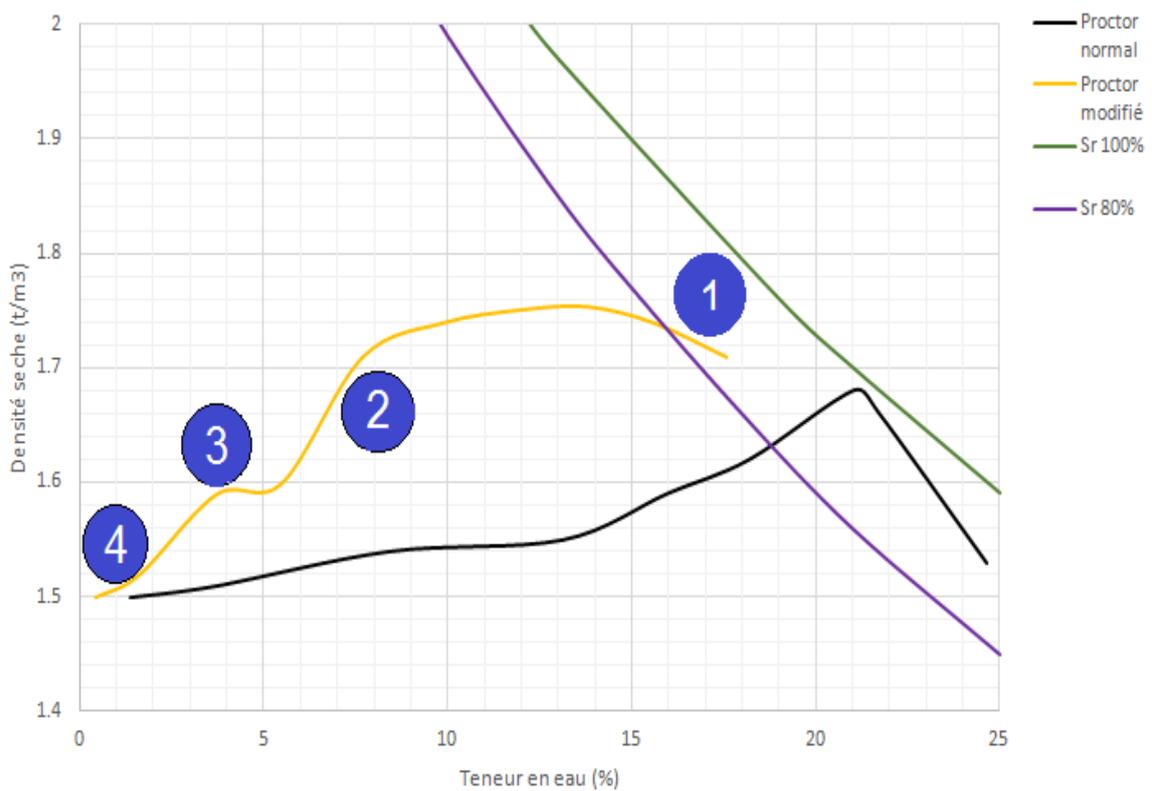
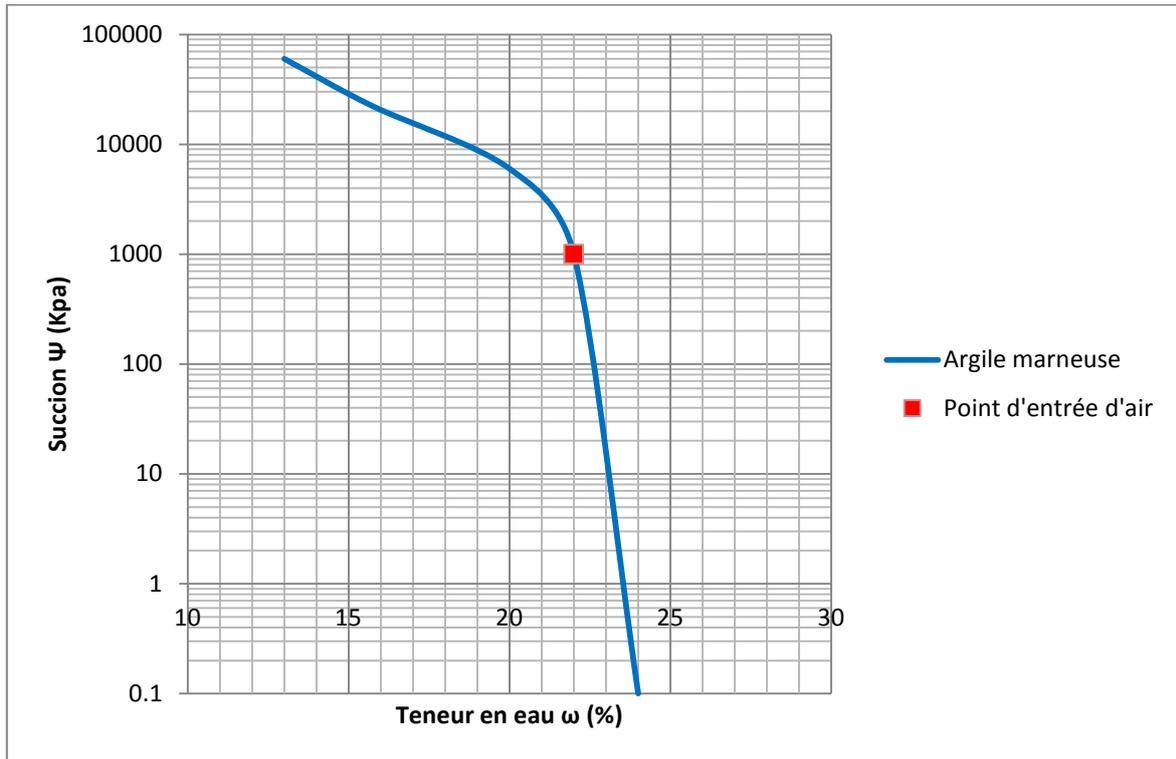
**Figure V.11 : Courbes Proctor (Matériau 3).**

Le graphe présente deux courbes l'une d'un Proctor normal et l'autre d'un Proctor modifié d'un sable. On remarque que les courbes sont très aplaties, ça signifie que le compactage de ce matériau est peu influencé par la teneur en eau, ce genre des matériaux constituent donc les meilleurs remblais, car il sont peu sensibles à l'eau, ce qui les rendent moins vulnérables face aux pluies diluviennes du sud algérien.

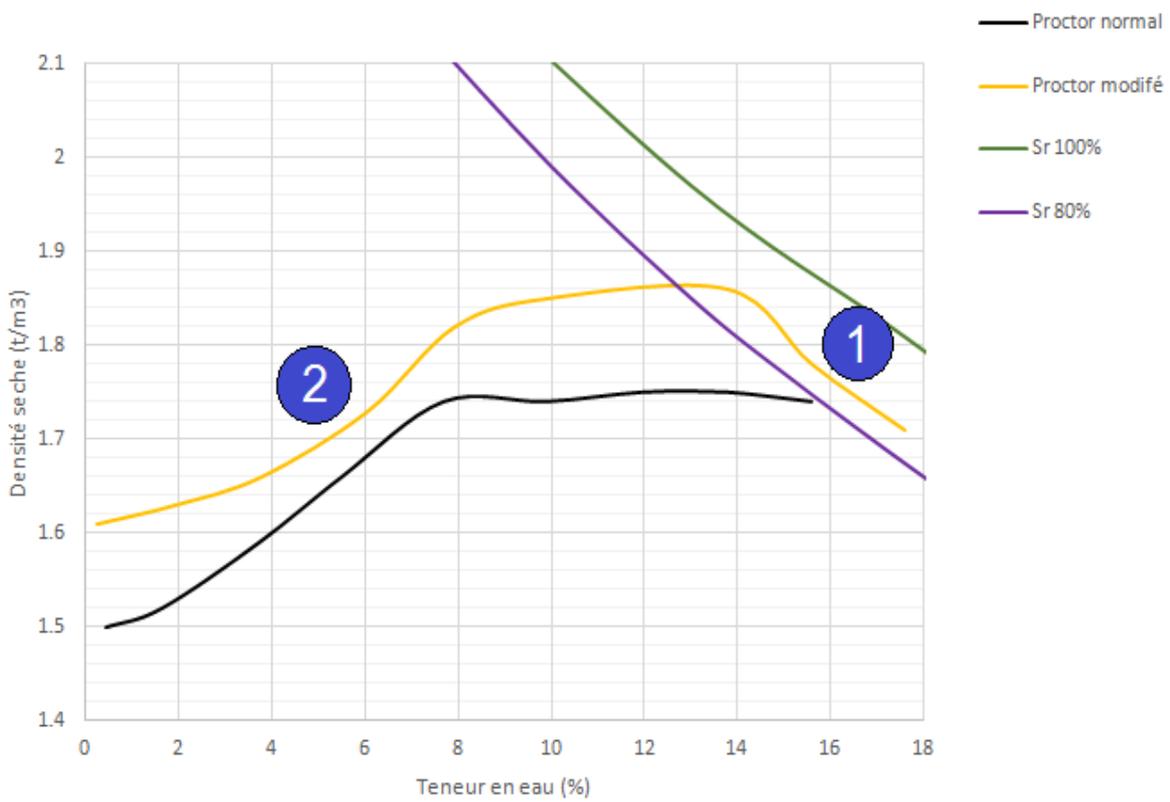
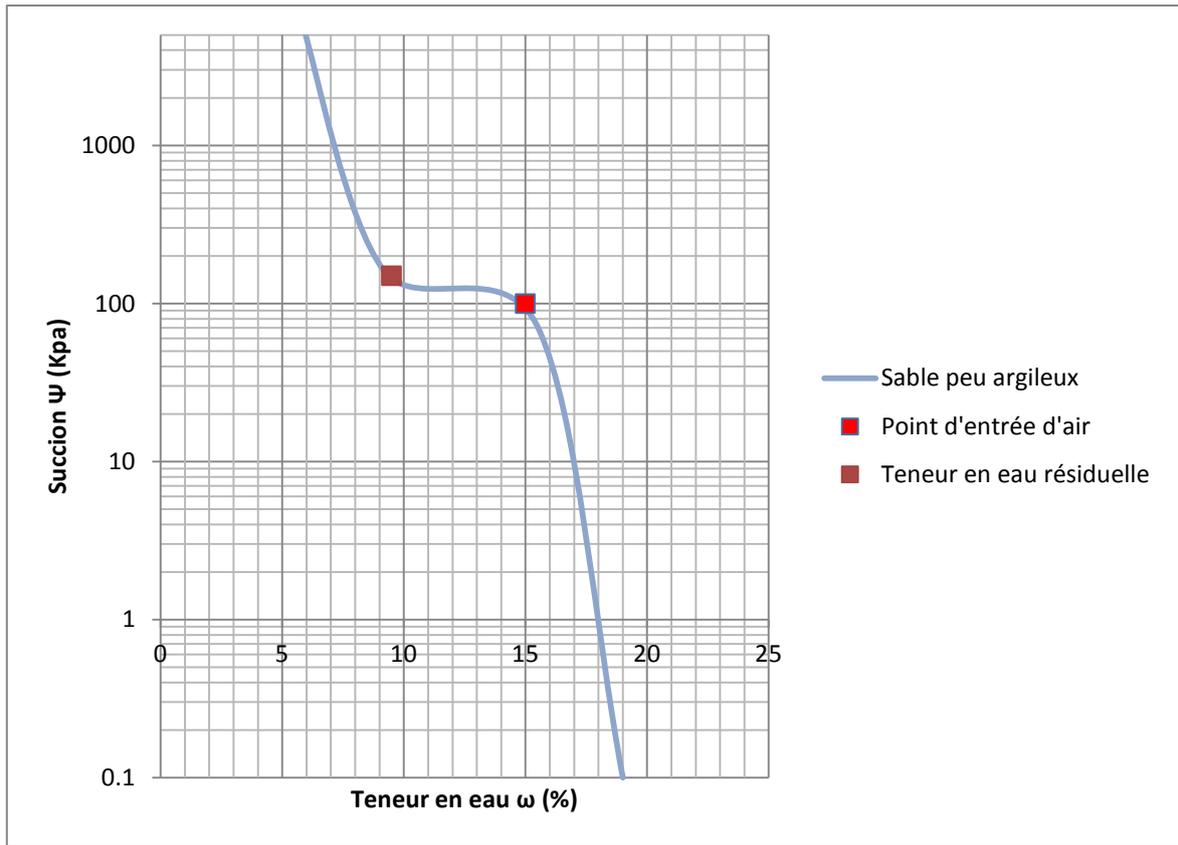
#### **V. 5. Calage des courbes de succion avec celle de Proctor**

Pour comprendre et justifier la participation d'effets physico-chimiques dans l'expression de la courbe Proctor complète de deux matériaux, (une argile marneuse et un sable peu argileux), on essaye de comparer les courbes Proctor de ces matériaux avec leurs courbes de rétention pour tenter de déduire une relation qui lie l'évolution de la densité sèche ( $\gamma_d$ ) en fonction de la teneur en eau ( $\omega$ ) d'un côté, et en fonction de la succion ( $\Psi$ ) d'un autre. Sur les figures suivantes, on présente en parallèle les succions et les courbes Proctor complète d'une argile marneuse et d'un sable peu argileux. Pour chaque branche, on souligne les éléments qui travaillent pour le compactage et les éléments qui jouent contre celui-ci, de

telle façon, de bien comprendre les phénomènes qui se produisent sur chaque partie de la courbe Proctor.



**Figure V.12 :** Comparaison de la courbe de succion avec la courbe Proctor complète, (Argile marneuse).



**Figure V.13** : Comparaison de la courbe de suction avec la courbe Proctor complète, (Sable peu argileux).

- Sur la branche (1), le sol contient beaucoup d'eau. L'énergie de compactage est absorbée par l'eau. Elle n'est pas encaissée par les grains, le sol ne produit pas de serrage. (l'eau travaille contre le compactage). Il semble se dégager une relation entre la teneur en eau optimale et le point d'entrée d'air.
- Sur la branche (2), l'eau est présentée de moindre quantité, elle commence à jouer un rôle de lubrifiant pour le sol, par la diminution des frottements.
- Sur la branche (3), il ya des teneurs en eau qui font apparaitre des petits effets de surface dans l'argile marneuse contrairement au sable, ces effets ne sont pas importants, jusqu'à la teneur en eau critique la succion devient plus importante, elle participe au serrage des grains et à la diminution des surfaces offertes au frottement.
- Dans la branche (4), de la courbe Proctor normal, l'eau est relativement disparue et la succion n'agit plus, car le sol devient pratiquement sec ce qui va produire des frottements importants entre les grains de sol, plus on serre plus la résistance au compactage augmente. Dans le cas de la courbe Proctor modifié on remarque l'absence du demi-pic, cela revient à la petite quantité d'eau qui reste un peu partout dans le sol, vu que l'énergie de compactage est importante, les grains sont très serrés.
- L'argile marque une grande amplitude de succion (elle arrive jusqu'à 60000Kpa), contrairement au sable, elle est pratiquement plus faible que celle de l'argile, cela explique l'absence de phénomène de surface dans les sols sableux.

## V. 6. Conclusion

Plusieurs conclusions peuvent être tirées de ce chapitre :

- Les mesures de la succion révèlent que plus l'échantillon est sec plus la succion est importante. Une petite variation de teneur en eau engendre une grande variation de succion.
- Les sols argileux ont des succions plus importantes que celles des sols sableux, cela revient aux phénomènes de surface qui se manifestent dans les sols fins à leur état sec.
- Les courbes Proctor complètes montrent que ces dernières peuvent avoir des formes irrégulières.
- L'énergie de compactage joue un rôle important pour obtenir des densités sèches plus élevés.

## Conclusion générale

Les expériences antérieures menées dans quelques pays arides notamment le Maroc ont montré la possibilité de compacter les matériaux à des teneurs en eau faibles voire nulle pour la réalisation des remblais et des couches de forme. Il est clair que cette technique de compactage à sec représente un énorme avantage économique et environnemental. Les expériences qui ont menées dans le sud algérien n'ont pas été poursuivies pour trancher la question de la faisabilité pratique de cette technique dans notre pays. On rappelle que le travail présenté dans ce mémoire s'inscrit dans la contribution aux efforts de recherche qui visent les objectifs suivants :

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

Pour réaliser ces objectifs un programme expérimental a été dimensionné et réalisé dans au laboratoire. Ce programme expérimental a consisté en une série de compactage de trois matériaux à l'aide de l'essai Proctor Normal et Modifié, ainsi que des essais de succion pour un sable et une argile. A l'issue de ce travail, nous pouvons tirer les principales conclusions, qui sont en accord avec des observations déjà établies par d'autres auteurs.

- La connaissance des propriétés mécaniques des matériaux utilisés pour la réalisation des remblais et des couches de forme est essentielle pour comprendre les paramètres influençant leur compactage ainsi que les phénomènes géotechniques qui puissent se produire lors et après la mise en place des remblais.
- L'indentification géotechnique de ces matériaux s'appuie essentiellement sur des données relatives à la granulométrie, aux limites d'atterberg, l'équivalent de sable, la valeur de bleu de Méthylène et les essais chimiques et leurs propriétés.
- Les résultats des mesures réalisées par Wathman 42, montrent que la succion augmente quand la teneur en eau diminue.
- d'après les essais de la succion mesurée dans cette étude, on constate que la succion dans le sol argileux moyennement plastique, diminue lorsque sa teneur en eau augmente. Cette augmentation est liée au phénomène de surface ; c'est-à-dire que lorsque la teneur en eau diminue les force dues au phénomène de surface augmente et par conséquent le potentiel de sol augmente et la quantité d'eau absorbé par papier filtre diminue.
- Quand le sol contient beaucoup d'eau, l'énergie de compactage est absorbé par la compression élastique de l'eau, elle n'est pas encaissé par les grains du sol, dans ce cas l'eau travaille contre le compactage, on peut déduire une relation entre la teneur

en eau optimale et le point d'entrée d'air. Par contre quand l'eau est présente en moindre quantité elle joue le rôle de lubrifiant ce qui diminue les forces de frottement entre les grains et rend le sol plus plastique, déformable et plus facile à compacter. Et quand le sol devient sec les frottements entre les grains se multiplient, plus on serre les grains entre eux plus le sol résiste au compactage.

- Le sol sableux à une forme de courbe de Proctor régulière à cause de l'absence de phénomène de surface.

Dans cette étude on a examiné cette technique au niveau de laboratoire sur un sol choisi. Ce travail doit être complété par un plan volumineux au laboratoire pour tester l'expansion de cette technique sur des matériaux sahariens réels provenant du sud algérien. Un travail sur le terrain devra être engagé pour tester et relever les difficultés que pose cette technique sur terrain.

## Références bibliographiques

- Bekkouche.A. (2018).** Bases de la mécanique des sols.
- Biarez. (1974).** La pratique du compactage. (France).
- Carter, et al. (1991).** Correlation of soil properties.
- Chaigne, P., Blivet, J.C. (1971).** Compactage par vibration a teneur en eau nulle. Bulletin de Liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées, 8/9 n54 p 45-48.
- Cissé, A. (1972).** Le compactage à sec : Mythe ou réalité ?
- Derradj.A, et al. (2015).** Compactage a sec : Etat de l'art international & nouvelle expérience marocaine. The Fourth African Young Geotechnical Engineer's Conference (4AyGEC'15), November 12-13, 2015 Casablanca, Morocco.
- Djedid.A, B. (1998).** Introduction à la mécanique des sols 1. Université de Tlemcen, Algérie.
- Drnevich.V, E, et al. (2007).** A Study of Effective Soil Compaction Control of Granular Soils. West Lafayette: Purdue University.
- ELLIS, C I. (1980).** Soil compaction at low moisture content - field trials in Sudan. 7th Regional Conference for Africa on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Accra, Ghana, 1- 7 June 1980.
- GHANEM.F. (2011).** Etude de corrélation entre la perméabilité et la succion, mémoire de magistère Laboratoire Géo-matériaux Environnement Et Aménagement (L.G.E.A Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou.
- GMTR. (2001).** Guide Marocain pour les Terrassements Routiers. Maroc.
- Grace, H., Cocksedge, J.E. (1978).** Recent investigations into the dry compaction of sand. IRF Regional Conference for Middle East and North Africa, 9-15 April, Cairo, Egypt.
- Hassaine, D. R. (1990).** Contribution à l'étude du compactage au laboratoire. Tlemcen, Algérie. Université Abou bekr belkaid.
- Hafidi.F.Z, G. (2013).** Compactage des barrages en remblais. Tlemcen, Algérie. Université Abou bekr belkaid.
- HO, X. N. (2013).** Hydromechanical behaviour of partially saturated compacted granular materials.
- Holtz.R.D, K. (1999).** Introduction à la géotechnique. (E. P. Montréal).
- ISTED-LCPC. (1987).** Le savoir-faire français en matière de compactage à faible teneur en eau des sols et matériaux des terrassements et chaussées.

**La norme D.5298-03** : Essai de mesure de succion par la méthode de papier filtre.

**La norme NA.5288** : Détermination de la valeur au bleu.

**La norme NA.5288** : Equivalent de sable.

**La norme NF.P.94-093** : Proctor normal et modifié.

**La norme NF.P-94-051** : Les limites D'Atterberg selon la norme.

**La norme NF.P-94-056** : Analyse granulométrique selon la norme.

**LPEE. (2007)**. Laboratoire public d'essais et d'études(LPEE) .2007. Résultats des essais spécifiques sur les matériaux compactés à sec .Rapport d'essais du LPEE. Casablanca.

**Luxford, N. S. (1975)**. Compaction test for aggregate studies. Wellington National Roads Boards.

**MOREL. G, A. (1988)**. Le compactage. Eyrolles.

**Morris. (1975)**. Australian Road Research Board.

**Parsons. (1992)**. Compaction of soil and granulars materials : A review of research performed at the transport research laboratory.

**Proctor. (1933)**. Fundamental Principles of Soil Compaction. Engineering NewsRecord.

**Salager.S. (2007)**. Etude de la rétention d'eau et de la consolidation de sols dans un cadre thermo-hydro-mécanique. Institut de technologie. Grenoble. France.

**Sarsby, R. W. (2013)**. Environmental Geotechnics (éd. 2).

**SHAHIN, A. (2010)**. Investigation of the Variability in the Results of the NZ Vibrating Hammer Compaction Test. University of Auckland.

**Van Rooyen, M., Wessels, C.J. 1967a**. Report to the NIRR, CSIR on compaction of soil in arid areas. Part I - Literature survey. NIRR Report RS/13/67. Department of Civil Engineering, University of Pretoria.

**Van Rooyen, M., Wessels, C.J. 1967b**. ibid - Part II - Laboratory investigation. Rs/14/67.

**Van Rooyen, M., Wessels, C.J. 1967c**. ibid - Part III - Field investigation. RS/15167.

**Article** : Autorouttes : Le maroc champion du monde en compactage à sec. Site web : [www.infomediaire.net](http://www.infomediaire.net).

**Article** : Wikigeotech : Q/S (contrôle de compactage par la méthode du Q/S). site web : [www.wikhydro.developpement-durable.gouv.fr](http://www.wikhydro.developpement-durable.gouv.fr)

