

Direction Post-Graduation & Recherche Scientifique

# Mémoire de Magister

Option : Matériaux et Structures

**KERFOUF Hamid**

Ingénieur d'Etat en Travaux Publics  
Diplômé de l'Ecole Nationale des Travaux Publics

Intitulé du Mémoire

**Compactage à sec: Analyse de la technique**

Soutenu le 09 juillet 2012 devant le Jury composé de :

|            |                 |                       |           |
|------------|-----------------|-----------------------|-----------|
| Président  | Taki Mohamed    | Maitre de Conférences | ENSTP     |
| Encadreurs | Derriche Zohra  | Professeur            | ENSTP     |
|            | Gueridi Fatima  | Enseignante Associée  | ENSTP     |
| Examineurs | MELBOUCI Bachir | Professeur            | UMM-TO    |
|            | Merdoud Meriem  | Maitre de Conférences | ENSTP     |
|            | HaddadiSmail    | Maitre de Conférences | FGC-USTHB |
| Invités    | Goumettre Ahmed | Expert Associé        | E.N.S.T.P |
|            | DjidjeliZahir   | Directeur Central     | MTP       |

---

# **Dédicaces**

**A ma famille**

**A mes chers parents que Dieu les protège**

---

## Remerciements

Mes remerciements vont tout droit au Professeur Zohra Derriche, ma directrice de mémoire pour son encadrement, son suivi minutieux, ses conseils et ses orientations. Je ne la remercierai jamais assez de m'avoir permis d'accomplir ce travail sous sa direction et bénéficier de son expérience et ses larges compétences.

Je tiens également à remercier les membres du jury pour l'intérêt qu'ils ont accordé à mon travail en acceptant de l'évaluer et d'enrichir le débat le jour de la soutenance.

Je n'oublie pas de remercier les responsables et le personnel de l'organisme national de Contrôle Technique des Travaux Publics (C.T.T.P) de m'avoir accueilli et permis d'effectuer une partie considérable de mon programme expérimental dans leurs laboratoires.

Je remercie toute ma famille élargie pour son soutien et ses encouragements de tous les instants. Enfin que tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce modeste travail, trouvent ici, l'expression de ma profonde reconnaissance.

**ملخص**

تمثل المناطق الجافة أكثر من 80% من المساحة الكلية للجزائر. وتعتبر ندرة المياه أحد المعوقات الأساسية أمام بناء الطرق في هذه المناطق. وقد أظهرت التجربة أنه غالباً ما تبلغ تكلفة المياه المخصصة لعملية رص المواد المستعملة في بناء جسم الطريق أكثر من ثلث تكلفة مشروع الطريق. في ظل هذه الظروف فإنه من الواضح أن رص المواد المستعملة في بناء الطرق بنسبة مياه أو رطوبة منخفضة سيعود بمنافع ومكاسب اقتصادية واجتماعية مؤكدة.

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

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

للقيام بذلك نقوم بإنجاز تجارب رص حسب أنماط مختلفة على تربة مختارة، دارسين دلانلها على مردودية الرص، مستعينين بتغير كثافة التربة المتراسة بدلالة العمق. استناداً إلى نتائج الدراسات العلمية السابقة و هذه الدراسة، فإن إمكانية الرص بنسبة مياه منخفضة مرتبط بتضافر شروط تخص طاقة الرص، سمك الطبقات المرصوصة و الاختيار الأمثل لنوعية الرص. و يبقى أن تؤكد نتائج هذه الدراسة على أتربة مختلفة في المخبر و في الميدان.

**كلمات :** الموارد المائية , رص التربة, رص التربة بنسبة رطوبة منخفضة, جفاف, الصحراء.

**Titre : Compactage à faible teneur en eau : Analyse de la technique**

**Résumé**

En Algérie les régions arides représentent plus de 80% de la superficie du pays. La construction des chaussées dans ces zones est handicapée par la rareté de l'eau. L'expérience a montré que, le coût de l'eau nécessaire au compactage des matériaux peut être au près de tiers du prix de revient d'une infrastructure routière (P. Paige-green, 2009). Dans ces conditions il est clair que le compactage à faible teneur en eau des matériaux routiers peut représenter un potentiel socio-économique certain.

La contribution présentée dans ce travail participe aux efforts de recherche qui visent la mise en œuvre pratique de cette technique. On analyse au laboratoire la technique du compactage à faible teneurs en eau et on tente de cerner les conditions de sa faisabilité pratique. Pour ce faire on réalise des essais de compactage d'un sol choisi, effectué sous

---

différentes configurations, et on étudie l'expression des différentes conditions testées sur le rendement du compactage, explicité en termes de profil de densité du sol compacté. Sur la base des résultats obtenus, corroborés par des données de la littérature, on peut suggérer que le compactage à faibles teneurs en eau est faisable par la conjugaison de conditions particulières portant sur l'énergie de compactage, l'épaisseur des couches et sur le choix judicieux du mode de compactage. Les résultats de cette étude doivent être confirmés par des travaux sur d'autres sols et sur le terrain.

**Mots-Clefs :** ressources en eau, compactage des sols, compactage des sols secs, aridité, Sahara

**Title:** Soil compaction at low water contents: Technique analysis

### **Abstract**

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

The contribution presented in this dissertation takes part in the research efforts which aim at implementing practically this technique. By analyzing in the laboratory the technique of the compaction at low water contents we try to determine the conditions of its practical feasibility. To this end, we carry out compaction tests on a selected soil considering different test configurations, and we study the expression of the various conditions tested on the output of the compaction. The output of compaction is expressed in the soil density profile of the compacted soil layer. On the basis of the results obtained, corroborated by data from the literature we can suggest that compaction at low water contents is technically possible provided some conditions related to the compaction energy, the soil layer thickness, the adequate choice of compaction mode as well as the compaction control methods are met. Results of this study must be confirmed for other soil types in the laboratory and in the field.

---

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

### Liste des figures

|   | Page |
|---|------|
| Figure II.01 : Répartition des zones arides dans le monde.....  | 04   |
| Figure II.02 : Pluviométrie et limites du Sahara (Conrad, 1969) .....   | 05   |
| Figure II.02 : Variation de l'évaporation du nord au sud durant l'année (Tliba,1994)....  | 07   |
| Figure II.04 : Schéma de la configuration des terrains montrant les quatre zones discutées dans le document (Fookes, 1976).....               | 08   |
| Figure II.05 : Fuseaux granulométriques et plasticité des matériaux des zones II, II et IV (Fookes ; 1976) .....                              | 10   |
| Figure II.06 : Fuseau granulométrique du tuf calcaire utilisé dans la RN° 06 de la région de Bougtob (Tliba,1994).....                        | 11   |
| Figure II.07 : Fuseau granulométrique Sable gypseux de la région nord d'El-Oued (Tliba,1994).....   | 12   |
| Figure II.08 : Fuseau caractéristiques des tout-venants de plateau de TinRhert utilisé dans la RN° 03 de la région d'Ouhanet(Tliba,1994)..... | 13   |
| Figure II.09 : Fuseau caractéristique des Arènes granitiques de Tamanrasset (TLIBA,1994).....   | 13   |
| Figure III.01 : La forme générale de la courbe Proctor.....   | 17   |
| Figure III.02 : L'influence de l'énergie sur la courbe de compactage.....   | 18   |
| Figure III.03 : L'influence de la nature du sol sur le compactage.....  | 19   |
| Figure IV.01 : Courbe Proctor complète (I.S.T.E.D, 1987).....   | 21   |
| Figure IV.02 : Compacteur à rouleau à chocs.....  | 23   |

---

|  |    |
|--|----|
| Figure IV.03 : Le banc gamma (LCPC, 2010).....   | 26 |
| Figure IV.04 : Distribution de la densité sèche en fonction de la profondeur (ISTED, 1987).....  | 26 |
| Figure IV.05 : Distribution de la densité sèche en fonction de la profondeur (ISTED, 1987).....  | 28 |
| Figure V.01 : Mesures de la teneur en eau de sol par le gammadensimètre et la méthode de dessiccation au laboratoire (APWA; mars 2005).....      | 31 |
| Figure V.02 : Cône de sable (APWA; 2005).....  | 32 |
| Figure V.0 3 : Méthode de mesure par le SCS et son appareil .....  | 33 |
| Figure V.05 : Utilisation de l'utilitaire-DCP dans des remblais et tranchées bellhole (APWA; 2005).....  | 34 |
| Figure V.06 : Schéma des composants du système PANDA (APWA; 2005).....   | 35 |
| Figure V.07 : Essai avec le PANDA dans la section à l'intérieur de la fosse (APWA; 2005) .....   | 36 |
| Figure VI.01 : La courbe granulométrique du sol utilisé.....   | 40 |
| Figure VI.0 2 : Situation de plasticité du sol étudié dans l'abaque de plasticité de Casagrande.....   | 41 |
| Figure VI.03 : Les courbes Proctor complètes du sol selon les deux niveaux d'énergie .....   | 42 |
| Figure VI.04 : Étapes de réalisation de l'essai Proctor normal.....  | 43 |
| Figure VI.05 : Étapes de réalisation de l'essai Proctor modifié (plus les mêmes étapes d'homogénéisation 1, 2, 3 cité dans la figure VI.04)..... | 44 |
| Figure VI.06 : Le marteau vibrant et son piston dans leur valise.....  | 46 |
| Figure VI.07 : Les étapes de compactage dans la fosse.....   | 47 |

---

|   |    |
|---|----|
| Figure VI.08 : Méthode de la mesure des profils de densité et de teneur en eau à l'aide de la carotteuse manuelle.....                                  | 48 |
| Figure VI.09 : Différentes étapes de l'enfoncement de l'anneau .....  | 49 |
| Figure VI.10 : Etapes de détermination manuelle du profil de densité.....   | 50 |
| Figure VI.11 : Le mécanisme de lecture au gammadensimètre.....  | 51 |
| Figure VI.12 : Accessoires du gammadensimètre. ....   | 52 |
| Figure VI.13 : Etapes à effectuer pour la lecture sur le gammadensimètre.....   | 53 |
| Figure VI.14 : L'interface du logiciel « Uleadvideostudio ».....  | 54 |
| Figure VI.15 : Etapes de mesure de la vitesse propagation des ondes.....  | 55 |
| Figure VI.16 : Etapes de la méthode de mesure avec le papier filtre.....  | 56 |
| Figure VI.17 : Courbe de mouillage de la courbe d'étalonnage du papier filtre (ASTM D5298).....   | 57 |
| Figure VI.18 : Schématisation de la procédure expérimentale de la mesure de la succion par papier filtre (Ramdane, 2007).....                           | 57 |
| Figure VII.1 : Courbe Proctor modifié complète du sol étudié.....   | 60 |
| Figure VII.02 : Courbe Proctor normale complète. ....   | 61 |
| Figure VII.03 : Courbes Proctor modifié et standard avec les courbes de teneur en air...61  |    |
| Figure VII.04 : Courbes Proctor complètes normal et modifié et courbes hypothétiques (imaginées) correspondant à différentes énergie de compactage..... | 62 |
| Figure VII.05 : Courbes de compactage à la même énergie avec différentes couches...63   |    |
| Figure VII.06 : Courbes de compactage pour différents nombres de couches à la même énergie de compactage (Coyle et West, 1956).....                     | 64 |

---

|   |    |
|---|----|
| Figure VII.07 : Résultats de compactage dans le moule Proctor et dans la fosse avec le marteau vibrant.....   | 65 |
| Figure VII.08 : Des courbes de compactage dans des moules de différentes tailles (Coyle et West, 1956).....   | 66 |
| Figure VII.9 : Représentation graphique courante de la variation de la densité sèche en fonction de la profondeur d'une couche de sol compacté (Morel et Arquie, 1988)..... | 67 |
| Figure VII.10 : Formes parfois rencontrées de la courbe de variation de $\gamma_d$ en fonction de la profondeur dans la couche compactée.....                               | 67 |
| Figure VII.11 : Allure de la distribution des densités sèches sur un remblai compacté par couches.....  | 68 |
| Figure VII.12 : Disposition des densités des points de profil de moule autour de la courbe Proctor modifiée.....  | 70 |
| Figure VII.13 : Profil de densité d'une couche compactée à faible teneur en eau.....  | 71 |
| Figure VII.14 : Le profil de densité pour une couche compactée à l'OPN.....   | 72 |
| Figure VII.15 : Présentation de profil de la couche compactée à sec et de profil compactée à l'OPN.....   | 73 |
| Figure VII.16 : Profil de densité et de teneur en eau dans la fosse d'un spécimen compacté à sec.....   | 74 |
| Figure VII.17 : Profil de densité et de teneur en eau dans la fosse d'un spécimen compacté à l'OPN.....   | 75 |
| Figure VII.18 : Profil de densité et profil de teneur en eau d'une couche compactée à sec dans le moule Proctor compactée par le marteau vibrant.....                       | 76 |
| Figure VII.19 : Profil de densité et profil de teneur en eau d'une couche compactée à l'OPN dans le moule Proctor compacté par le marteau vibrant.....                      | 78 |

---

|   |    |
|---|----|
| Figure VII.20 : Courbe Proctor complète du sol compacté en deux couches à l'énergie Proctor normal.....                                     | 78 |
| Figure VII.21 : Profil de densité pour deux couches compactées à une teneur en eau de 0,56%.....  | 79 |
| Figure VII.22 : Profils de densités en deux couches compactées à différentes teneurs en eau.....  | 81 |
| Figure VII.23 : Présentation des profils d'une couche et deux couches compactées à sec .....  | 82 |
| Figure VII.24 : Présentation des profils d'une couche et deux couches compactées à l'OPN.....   | 83 |
| Figure VII.25 : Présentation des profils de densité de sol compactés à sec et à l'OPN par le marteau vibrant et la dame Proctor.....        | 84 |
| Figure VII.26 : Schéma explicatif de l'effet de poinçonnement de la dame Proctor dans le matériau lors du compactage dynamique.....         | 85 |
| Figure VII.27 : Interprétation des profils de densité.....  | 86 |
| Figure IV. 28 : Courbe Proctor modifiée complète et courbes de variation de l'indice CBR pour différentes teneurs en eau de compactage..... | 88 |
| Figure IV.29 : Courbe Proctor et courbe CBR pour un même sol pour trois énergies différentes (Morel et Arquie, 1988).....                   | 89 |
| Figure IV.30 : Courbe Proctor modifiée complétée et la courbe hypothétique variation de l'indice CBR en fonction de la teneur en eau.....   | 90 |
| Figure IV.31 : Profils de densité d'une même couche, un après le compactage et l'autre après la dessiccation.....                           | 91 |
| Figure IV.32 : Etat du sol dans la fosse compactée l'OPN après l'ensoleillement.....  | 91 |
| Figure IV.33 : Courbe de rétention d'eau du sol.....  | 92 |

---

|   |     |
|---|-----|
| Figure IV.34 : Succion dans le sol compacté en parallèle avec la courbe Proctor complète.....                 | 94  |
| Figure IV.35 : Observation des spécimens avec le microscope.....  | 95  |
| Figure IV.36 : Courbes résultats de mesures à l’ultrason.....   | 98  |
| Figure VII.37 : Explication de l’organisation porale par la similitude avec la perméabilité hydraulique ..... | 100 |

---

## Liste des tableaux

|  |    |
|--|----|
| Tableau II.01 : Certaines caractéristiques mécaniques des matériaux désertiques<br>(Fookes, 1976).....                       | 09 |
| Tableau 02.II : Analyses physico- chimiques des eaux souterraines de la région de<br>Biskra (Tabouche et Achour, 2004) ..... | 14 |
| Tableau V.01 : Appareils de contrôle de compactage (APWA; mars<br>2005).....   | 30 |
| Tableau VI.01 : Synthèse de calcul du nombre de coups de dame.....   | 45 |
| Tableau VI.02 : Synthèse des essais effectués dans le programme expérimental.....  | 58 |

---

---

## Table des matières

|  | <b>Page</b> |
|--|-------------|
| Dédicaces.....   | I           |
| Remerciements.....   | II          |
| ملخص.....  | III         |
| Résumé.....  | III         |
| Abstract.....  | IV          |
| Liste des figures.....   | V           |
| Liste des tableaux.....  | XI          |
| <br>   |             |
| <b>Chapitre I: Introduction</b> .....  | <b>01</b>   |
| <br>   |             |
| <b>Partie I. Analyse bibliographique</b>   |             |
| <br>   |             |
| <b>Chapitre II : situation géomorphologique et climatique des régions arides</b> .....             | <b>04</b>   |
| 1. Introduction.....   | 4           |
| 2. Importance des zones arides dans le monde.....  | 4           |
| 3. Situation météorologique.....   | 5           |
| 3.2 Pluviométrie .....   | 5           |
| 3.3 Température .....  | 6           |
| 3.4 Insolation (moyenne pendataire annuelle) .....   | 6           |
| 3.5 Évaporation .....  | 6           |
| 3.6 L'humidité de l'air .....  | 7           |
| 3.7 Les vents.....   | 7           |
| 4. Situation géomorphologique des déserts .....  | 8           |
| 4.1 Le zonage géomorphologique et les caractéristiques géotechniques générales des matériaux ..... | 8           |
| 4.2 Les matériaux utilisés au Sahara algérien .....  | 11          |

---

|   |           |
|---|-----------|
| 5. Les eaux dans les zones arides .....   | 14        |
| 6. Conclusion .....   | 15        |
| <b>Chapitre III : Généralités sur le compactage des sols.....</b>   | <b>16</b> |
| 1. Introduction.....  | 16        |
| 2. Les facteurs influençant le compactage.....  | 16        |
| 2.1 L'influence de la teneur en eau .....   | 16        |
| 2.2 Influence de l'énergie de compactage.....   | 17        |
| 2.3 L'influence de la nature de sol .....   | 18        |
| 2.4 Le compactage dynamique et le compactage vibratoire .....   | 19        |
| <b>Chapitre IV: Compactage à faible teneur en eau.....</b>  | <b>20</b> |
| 1. Mécanisme du compactage à faible teneur en eau .....   | 20        |
| 2. Historique et quelques expériences .....   | 22        |
| 3. Détection des déficits du compactage à sec par le profil de densité .....                                  | 25        |
| 3.1 Profil de densité.....  | 25        |
| 3.2 Problème de faible densité de la partie supérieure de la couche.....                                      | 26        |
| 3.3 Résolution et recommandation (ISTED, 1987).....   | 27        |
| <b>Chapitre V : Contrôle de compactage : Évaluation des appareils de contrôle de compactage des sols.....</b> | <b>29</b> |
| 1. Introduction.....  | 29        |
| 2. Classification des appareils de mesure et de contrôle .....  | 29        |
| 3. Les appareils de mesure du compactage.....   | 29        |
| 4. Conclusion .....   | 36        |
| <b>Partie II : Etude expérimentale et analyse des résultats</b>   |           |
| <b>Chapitre VI : Matériaux et Méthodes.....</b>   | <b>37</b> |
| 1. Rappels des objectifs de l'étude .....   | 37        |
| 2. Programme expérimental.....  | 37        |

---

|  |  |           |
|--|--|-----------|
| 2. 1   | Identification du sol objet de l'étude.....  | 38        |
| 2.2  | Les essais de compactage.....  | 38        |
| 2.2.1  | Compactage dynamique.....  | 38        |
| 2.2.2  | Compactage par vibration.....  | 38        |
| 2.3  | Les mesures de résistance (CBR immédiat).....  | 38        |
| 2.4  | Les essais d'analyse du résultat du compactage .....                                   | 39        |
| 2.4.1  | Profil de densité .....  | 39        |
| 2.4.1.1  | Détermination du profil de densité manuellement.....                                   | 39        |
| 2.4.1.2  | Détermination du Profil de densité avec le gammadensimètre.....                        | 39        |
| 2.4.1.3  | Vérification du Profil de densité .....  | 39        |
| 2.4.2  | Observation du sol au microscope .....   | 39        |
| 2.4.3  | Mesure de la vitesse de propagation des ondes ultrasoniques dans le sol compacté ..... | 39        |
| 2.4.4  | Mesures de la succion .....  | 39        |
| 3.   | Matériau utilisé .....   | 40        |
| 3.1  | Identification du matériau utilisé .....   | 40        |
| 4.   | Procédures essais et matériel .....  | 43        |
| 4.1  | Compactage.....  | 43        |
| 4.1.1  | Compactage classique.....  | 43        |
| 4.1.2  | Compactage en plusieurs couches .....  | 44        |
| 4.1.3  | Compactage avec le marteau vibrant .....   | 45        |
| 4.2  | Les essais CBR.....  | 47        |
| 4.3  | Procédures de détermination du profil de densité .....                                 | 48        |
| 4.3.1  | Recherche de la méthode adéquate pour la mesure du profil de densité ....              | 48        |
| 4.3.2  | Méthode de détermination du profil de densité retenue .....                            | 50        |
| 4.3.3  | Observation des échantillons au microscope optique.....                                | 53        |
| 4.3.4  | Mesure de la vitesse de propagation des ondes ultrasonores .....                       | 54        |
| 4.3.5  | Essais de mesure de la succion.....  | 55        |
| 5.   | Synthèse du programme expérimental .....   | 57        |
| <b>Chapitre VII : Résultats et Discussions .....</b> |  | <b>59</b> |

|   |                                    |
|---|------------------------------------|
| 1. Introduction.....  | 59                                 |
| 2. Caractéristiques de compactage du sol étudié .....   | 59                                 |
| 2.1 Effet de l'énergie de compactage .....  | 59                                 |
| 2.2 L'effet de nombre de couches .....  | 63                                 |
| 2.3 L'effet de la taille du moule sur les caractéristiques du compactage.....   | 64                                 |
| 3. Répartition de l'énergie de compactage dans le sol .....   | 66                                 |
| 3.1 Notions théoriques sur la variation de la densité en fonction de la profondeur<br>(Morel et Arquie, 1988) dans une couche compactée ..... | 66                                 |
| 3.2 Profil de densité .....   | 69                                 |
| 3.2.1 Fiabilité des résultats du profil de densité .....  | 69                                 |
| 3.2.2 Profils de densité à sec et à l'OPN.....  | 70                                 |
| 3.2.2.1 Profil de densité à sec et l'OPN par le compactage dynamique dans<br>le moule .....   | 70                                 |
| 3.2.2.2 Profil de densité à sec et l'OPN par le compactage par vibration<br>dans la fosse. ....   | 73                                 |
| 3.2.3 Facteurs influant sur le profil de densité.....   | 75                                 |
| 3.2.3.1 Résultat du compactage par vibration sur le profil de densité .....   | 75                                 |
| 3.2.3.3 Influence de l'eau dans les profils de densités .....   | 80                                 |
| 3.2.3.4 Influence de l'épaisseur et les conditions de compactage .....  | 82                                 |
| 3.2.3.5 Effet de mode de compactage sur le profil de densité .....  | 83                                 |
| 4. Effet de l'exposition à l'évaporation de l'eau sur un sol compacté vis-à-vis CBR et<br>du profil de densité .....                          | 87                                 |
| 4.1 Effet de l'exposition à l'évaporation de l'eau sur le CBR (par séchage) .....   | 87                                 |
| 4.2 Effet de l'exposition à l'évaporation de l'eau sur le profil de densité (par<br>exposition du sol) à l'évaporation naturelle .....        | 90                                 |
| 5. Observation au microscope des spécimens compactés .....  | 95                                 |
| 6. Distribution porale dans le sol compacté.....  | <b>Erreur ! Signet non défini.</b> |
| 7. Conclusion .....   | 100                                |
| <b>Chapitre VIII : Conclusions et recommandations.....</b>  | <b>102</b>                         |
| <b>Références Bibliographiques.....</b>   | <b>106</b>                         |

## Chapitre I

### Introduction

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

La rareté de l'eau rend la tâche de compactage dans ces régions, coûteuse et difficile. Les points d'eau étant très éloignés (environ 100 Km à 300 Km), les opérations de compactage (le forage de puits, le pompage de l'eau, l'épandage, le malaxage), demandent une organisation de chantier parfois contraignante, notamment pour limiter l'évaporation rapide de l'eau dans l'atmosphère. L'expérience a montré que, le coût de l'eau nécessaire au compactage des matériaux peut représenter jusqu'au tiers du prix de revient d'une infrastructure routière.

L'intérêt pour le compactage des sols à faible teneur en eau a démarré avec le projet de la transsaharienne dans les années soixante-dix. A cause des conditions socio-économiques qu'a vécu le pays pendant le crash pétrolier et juste après cette période, le projet de la transsaharienne s'est arrêté.

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

Des travaux de recherche, très peu nombreux malheureusement, ont avancé la possibilité de compacter les sols de régions arides à des teneurs en eau beaucoup plus faibles que la teneur en eau optimum avec toutefois certaines dispositions constructives particulières

pour garantir des caractéristiques techniques acceptables, dans le sol compacté. Parmi ces travaux, il peut être intéressant de citer quelques expériences qui ont été réalisées à Tamanrasset (Algérie), au Kenya et au Soudan durant les années soixante-dix à l'occasion de la réalisation de la transsaharienne. On reprend conscience ces derniers temps du potentiel socio-économique qu'offre le compactage à faible teneur en eau dans ces régions, s'il devait être faisable.

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

A l'appui de quelques rares résultats très limités, tirés de la littérature du sujet, on tente par un travail expérimental, de questionner la thèse qui avance qu'il est possible de compacter des sols à des teneurs en eau beaucoup plus faibles que l'optimum Proctor et d'obtenir tout de même des densités sèches aussi importantes sinon plus que celles qui correspondent à cet optimum ou au pire des densités intéressantes. L'objectif principal est alors de comprendre les conditions d'exécution de cette opération.

On utilise les résultats d'un programme expérimental, réalisé sur un sol extrait d'un remblai choisi, pour évaluer et analyser cette technique très demandée par le contexte aride.

Pour ce faire on réalise un travail composé dans sa majorité :

- ✓ D'essais de compactage du sol choisi sous différentes conditions et suivant différentes configurations.
- ✓ D'essais d'analyse visant le contrôle des résultats des compactages réalisés.

Les résultats obtenus dans cette étude, sont discutés, comparés et confrontés aux résultats tirés de la littérature afin de les interpréter et d'arriver à bien comprendre le mécanisme du compactage, notamment dans la plage des faibles teneurs en eau.

Le travail réalisé, est rapporté dans un mémoire qui compte huit chapitres.

Le premier chapitre comporte l'introduction qui pose la problématique dressée dans le travail et présente les travaux réellement effectués.

On consacre le deuxième chapitre, pour illustrer les particularités du contexte climato-géomorphologique du Sahara et donner certaines caractéristiques géotechniques des matériaux des régions désertiques. A fin de bien expliciter le problème de la rareté de l'eau dans les zones arides. On donne dans le chapitre quelques notions sur la place de cette ressource dans les zones arides du pays.

Dans le troisième chapitre, on rappelle les notions de base sur le compactage des sols.

Dans le quatrième chapitre, on donne une présentation de l'historique du compactage à faible teneur en eau et on dresse l'état des connaissances sur la question jusqu'au jour d'aujourd'hui. On présente aussi d'autres notions propres à ce type de compactage. On illustre les difficultés du compactage à la teneur en eau naturelle dans les zones sèches.

On termine la partie bibliographique par un chapitre qui présente l'opération de contrôle de compactage. On présente une évaluation des procédures et équipements de contrôle de cette opération.

On réserve le sixième chapitre à la présentation du programme expérimental réalisé. On commence par présenter les caractéristiques du matériau utilisé. On expose ensuite les méthodes et les procédures d'essais employés et les normes suivies pour les réaliser.

Dans le septième chapitre, on donne les résultats obtenus et on les interprète, sur la base de confrontations et de comparaisons entre des valeurs de différents paramètres étudiés dans ce travail et d'autres tirés de la bibliographie.

On termine le travail par une conclusion dans laquelle on rappelle l'essentiel des résultats obtenus. On énonce quelques recommandations pour bien réussir le compactage à la teneur en eau naturelle et on donne des propositions pour la poursuite de la présente recherche.

## Chapitre II

### Situation géomorphologique et climatique des zones arides

#### 1. Introduction

Afin de mieux illustrer le bien fondé de la préoccupation dressée dans ce mémoire, on présente dans ce chapitre la situation et les caractéristiques particulières de l'environnement des zones arides en général et du Sahara algérien en particulier.

On présente le cadre géomorphologique climatique du Sahara et la situation des eaux de la région. On termine en donnant un aperçu sur les matériaux qui abondent dans ces contrées hostiles.

#### 2. Importance des zones arides dans le monde

Alors que l'étendue des terres cultivées ne représente que le dixième des terres émergées, l'étendu des zones arides ou semi-arides en représente plus de 1/3 (figure II.01).

De plus selon les prévisions climatologiques actuelles, les régions les plus arides du monde vont encore s'assécher.

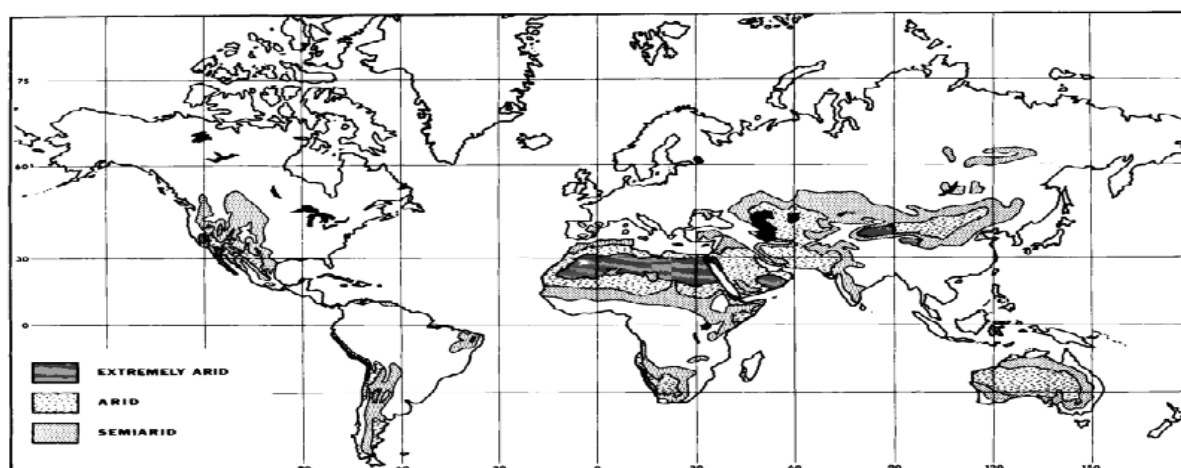


Figure II.01 : Répartition des zones arides dans le monde

Le Sahara algérien considéré comme le plus vaste désert chaud du monde, s'étend sur 2/3 de la superficie du pays avec plus de 2 million Km<sup>2</sup>.

L'eau douce qui est la réserve la plus précieuse des régions arides vient à manquer même dans les régions tempérées. L'eau de surface y est rare et insignifiante. Elle est perenne uniquement dans les zones humides situées dans les bas fonds des oasis et les guettas des oasis.

Ces zones représentent près de 1,3% de la superficie du Sahara septentrional (figure II.02).

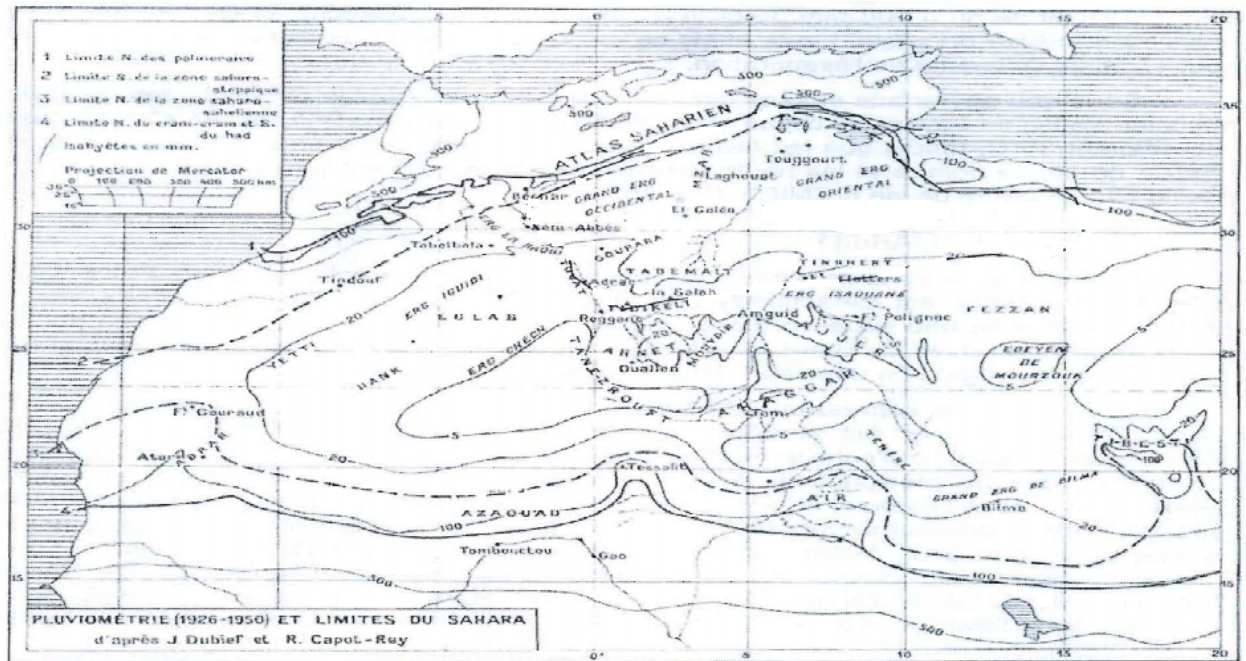


Figure II.02 : Pluviométrie et limites du Sahara (Conrad, 1969)

### 3. Situation météorologique

#### 3.2 Pluviométrie

Les zones arides ont des ressources limitées en eau. Les précipitations sont rares, imprévisibles et concentrées sur une brève saison des pluies, le reste de l'année ayant tendance à être relativement ou totalement sec. La faiblesse de la pluviosité est le caractère fondamental du climat saharien (figure II.02). On note ainsi des précipitations annuelles très faibles dans certaines localités : 33mm à Béni abbès ; 13mm à Adrar ; 10 mm à In Salah.

Toutefois, des pluies diluviennes peuvent aussi se produire au Sahara. En septembre 1950, Tamanrasset a reçu 44mm en trois heures alors que sa moyenne annuelle est de 25mm.

### **3.3 Température**

Le climat thermique est assez uniforme ; les étés du Sahara sont torrides. Juin, juillet et août sont les mois les plus chauds. Juillet est le mois le plus chaud avec, en année normale, une moyenne des maximums quotidiens comprise entre 40 et 46°C. Selon les localités les plus hautes températures ont été observée à In Saleh 56°C et à Tindouf avec 59°C. En hiver, il gèle presque partout. Les températures les plus basses enregistrées atteignaient -10 °C dans le Tibesti, -7°C à Tamanrasset, -6°C à Béchar et à Béni Abbès.

Il existe de grands écarts de température entre l'hiver et l'été. L'amplitude des variations thermiques annuelles, qui est l'une des particularités du climat des déserts chauds, peut dépasser 55°C au Sahara. En outre la variation diurne, c'est-à-dire la différence entre le maximum diurne et le minimum nocturne, dépasse souvent 35°C.

### **3.4 Insolation (moyenne pendataire annuelle)**

On entend par insolation la durée de jours exprimée en heures pendant laquelle le ciel est dégagé ce qui soumet le sol à l'ensoleillement. Le Sahara possède le record mondial de l'ensoleillement avec 3000 à 3500 heures par an contre 1600 à Paris. En saison sèche, le ciel est clair et lumineux tant que le vent ne le trouble pas, ce qui est rare. Au cours de la saison des pluies, le ciel prend un aspect plombé et les nuages peuvent former une nappe continue d'autant plus impressionnante que les horizons sont vastes.

### **3.5 Évaporation**

En zones arides, l'évaporation et l'évapotranspiration sont les mécanismes majeurs de perte en eau. Dans des bassins arides fermés, ils sont les seuls modes de pertes en eau. Dans le Sahara l'évaporation atteint des valeurs considérables.

L'évaporation est un paramètre très important qui conditionne l'équilibre hydrique. Sur la figure II.03 il est montré :

- ✓ une nette différence entre le Sahara et les zones littorales (Bejaia).
- ✓ Une amplitude annuelle importante pour le Sahara. Cela fait rappeler le régime des sabkhas qui sont complètement asséchées en été et inondés d'eau en hiver avec des fluctuations du niveau de l'eau qui approchent 1m.

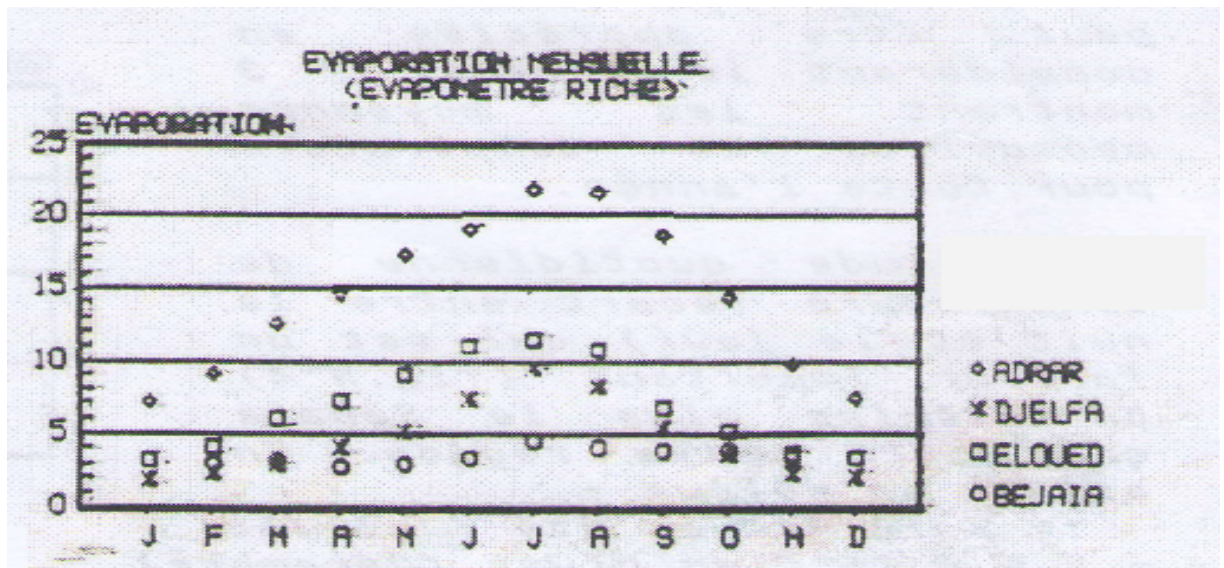


Figure II.03 : Variation de l'évaporation du nord au sud durant l'année (Tliba ,1994).

### 3.6 L'humidité de l'air

Le degré hygrométrique de l'air- ou humidité relative-oscille, en été entre 4% et 20% dans la région centrale. Le Sahara nordique est plus favorisé avec 20% à 30% en été et 50% ou 60% en janvier. Paris a en toutes les saisons plus de 60%. En rapport avec celles des températures, des variations quotidiennes se produisent : l'humidité relative est généralement minimale vers 15 heures et maximales vers 6 heures, au lever du soleil. En tout état de cause la faiblesse de l'humidité de l'air donne une atmosphère desséchante au Sahara.

### 3.7 Les vents

Avec la chaleur, l'été, le vent est l'autre caractéristique permanente du Sahara. Par sa situation dans l'hémisphère nordique, le Sahara est soumis au sol, à des vents dominants orientés du nord-est au sud-ouest. Mais, localement le vent peut provenir de directions sensiblement différentes. En été souffle le sirocco, un vent chaud et desséchant qui vient du sud et provoque des tempêtes de sable.

#### 4. Situation géomorphologique des déserts

On donne une description et une explication générale des formes du relief saharien. On cite quelques caractéristiques de matériaux désertiques et en particulier pour le sol du sud.

##### 4.1 Le zonage géomorphologique et les caractéristiques géotechniques générales des matériaux

Habituellement le profil des terrains en zones arides se présente, à grande échelle, comme indiqué dans la figure II.04 inspirée du schéma de Fookes (1976). Commenant à plus ou moins grande altitude dans le désert on trouve petites montagnes rocheuses disposées en bancs ou barres (le Tassili ou l'Ahaggar). En contre-bas de ces montagnes, on trouve une zone de débris rocheux grossiers et bien individualisés qui se continue plus bas encore par des graviers moyennement anguleux (zone I). Cette zone est traversée par des lits de cours d'eau irréguliers qui prennent naissance plus haut dans les montagnes. Dans la zone II, les dépôts évoluent en sable et graviers fins. Plus bas encore dans la vallée (Hamadas), on retrouve des alluvions caillouteuses ou sableuses (zone III). Dans les dépressions endoréiques : les sabkhas (zone IV) où les eaux de ruissellement aboutissent on retrouve en surface des dépôts récents constitués de sols fins salins à salés lorsque les eaux du sol s'évaporent.

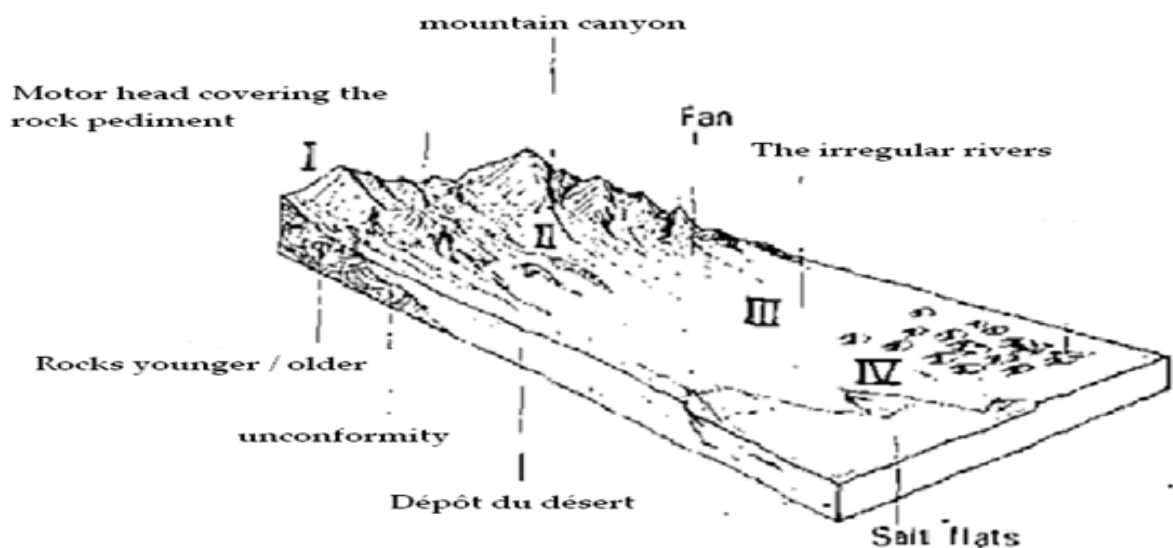


Figure II.04 : Schéma de la configuration des terrains montrant les quatre zones discutées dans le document (Fookes, 1976)

La taille relative des zones varie en fonction de l'âge du désert, sa taille globale, le drainage etc. Souvent, la zone IV ou parfois la zone II est la plus grande dans le bassin. Généralement, la nappe phréatique est proche de la surface dans la zone IV. Le tableau II.01 montre certaines caractéristiques géotechniques de ces zones.

Tableau II.01 : Certaines caractéristiques mécaniques des matériaux désertiques  
(Fookes, 1976)

| Zone  | I | II                                       | III  | IV   |
|---|---|--|--|--|
| Principaux types de sols                        |   | gros cailloux                            | rocaillieux limoneux et rocaillieux sablonneux.                                      | Les dunes de sable   |
| Angle d'inclinaison de la surface du désert     |   | 2-12°                                    | ½-2°   | 0-2°   |
| Principal agent de transport de l'environnement |   | La gravité et les oueds                  | Écoulement de ruisseau irrégulier et inondations de drap.                            | Le vent et l'évaporation l'écoulement absolu.                          |
| caractéristiques géotechniques                  |   | Bons pour les fondations et les remblais | Généralement très bons pour les fondations et les remblais. matériaux peu perméable. | portance imprévisible Migration de dunes absence de matière grossière. |

Plusieurs pics, sont séparés du massif montagneux et sont entourés par le désert rocaillieux ou un fronton. Ces pics ont chacun leurs propres éboulis de fragments de roche qui les entoure et sont eux-mêmes lentement érodés par le processus de désert.

On indique dans le tableau II.01 et la figure II.05 les caractéristiques géotechniques générales des sols désertiques. Le fait d'éroder des roches est actif avec les changements quotidiens et saisonniers de température.

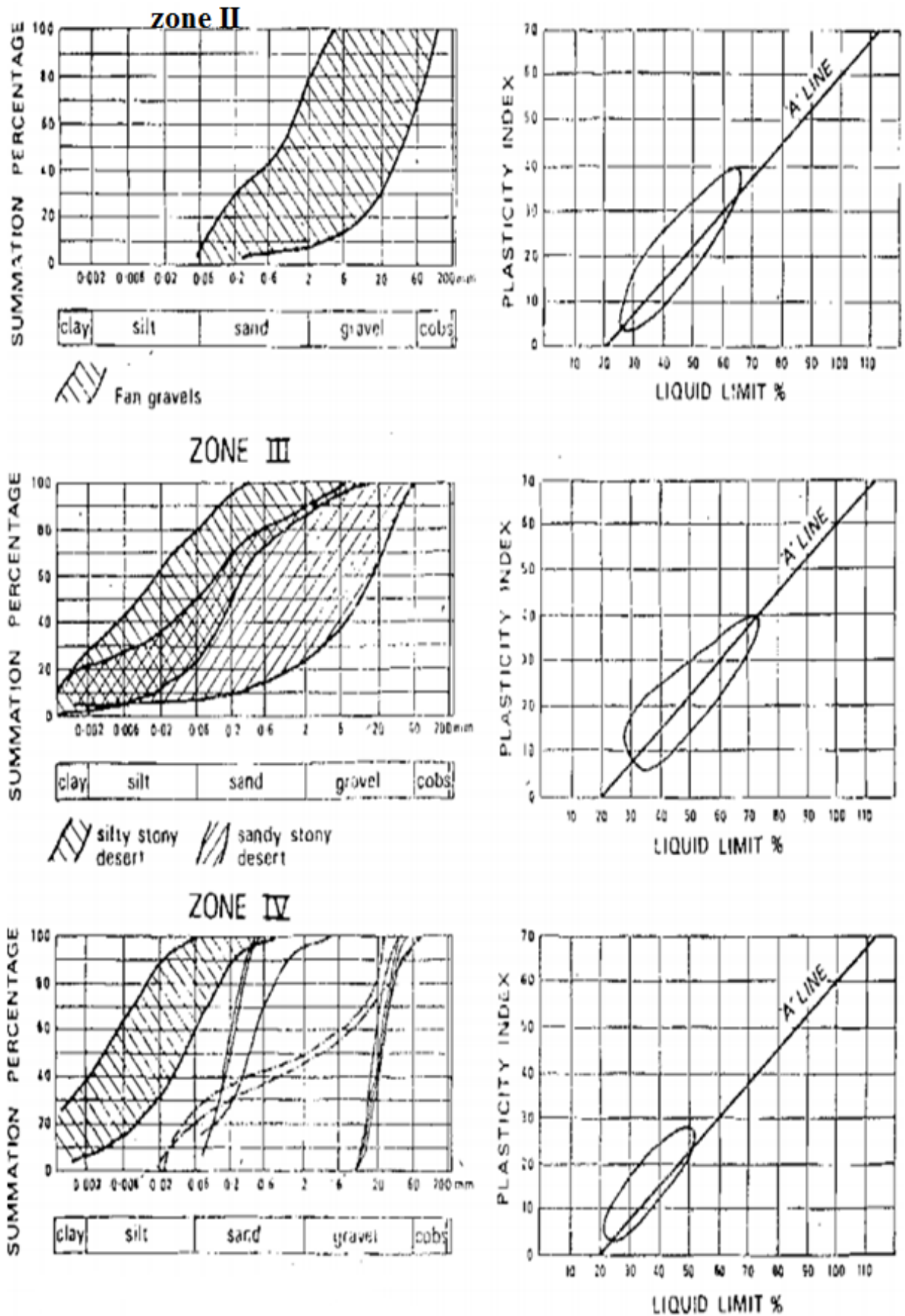


Figure II.05 : Fuseaux granulométriques et plasticité des matériaux zones II, III et IV (Fookes, 1976)

## 4.2 Les matériaux utilisés au Sahara algérien (Tliba, 1994)

La construction des chaussées au Sahara, se fait avec des matériaux locaux généralement subnormaux, car ne répondant pas aux spécifications des matériaux granulaires classiques. D'une manière générale, nous pouvons les classer en quatre familles :

### ✓ Les tufs calcaires

Provenant d'encroutements calcaires. Ils se présentent le plus souvent sous forme de graves avec une granulométrie étalée. Les éléments sont moins durs qu'un calcaire ordinaire ce qui implique un squelette friable. Le squelette est construit par le phénomène du durcissement de la fraction fine composée essentiellement de carbonate de calcium ( $\text{CaCO}_3$ ).

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

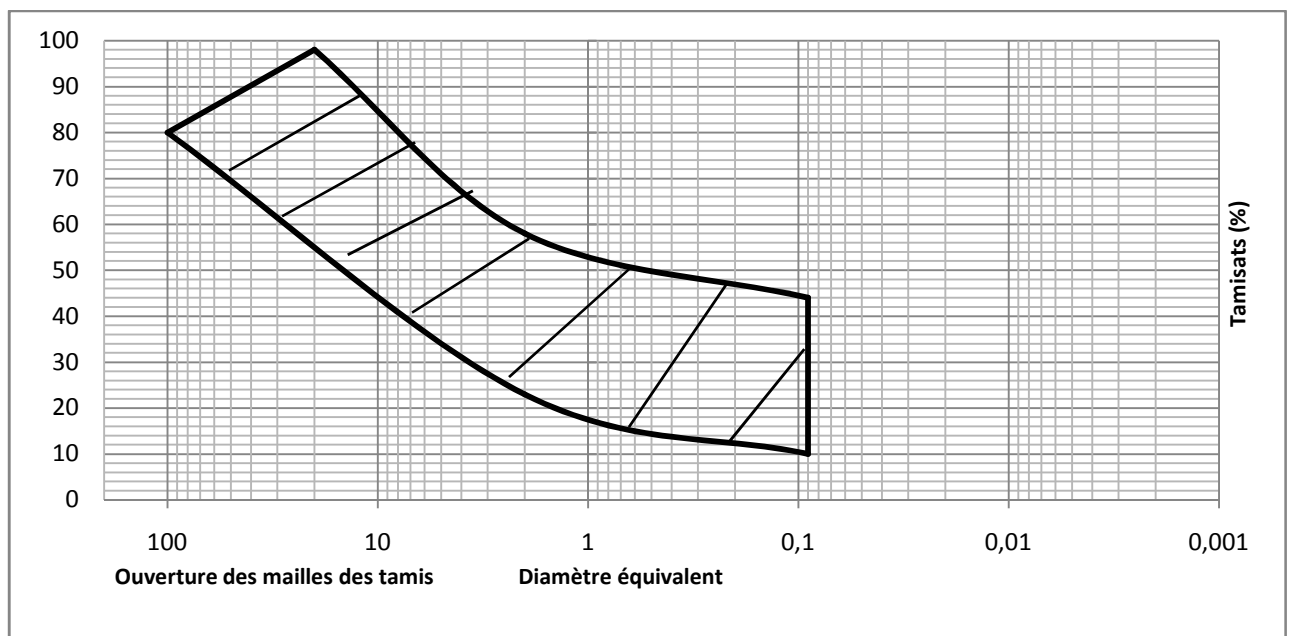


Figure II.06 : Fuseau granulométrique du tuf calcaire utilisé dans la RN° 06 de la région de Bougtob (Tliba, 1994)

La résistance à la compression est bornée entre 18 et 32  $\text{kg/cm}^2$  à 95% de la densité optimale. Elle varie entre 29 et 37  $\text{kg/cm}^2$  pour 98% de la densité

optimale. Ce matériau présente un coefficient des Angles L.A compris entre 40 et 60%.

#### ✓ **Sable gypseux**

Matériau ayant la granulométrie d'un sable (figure II.07) donc complètement dépourvu de squelette solide, les grains y sont essentiellement de nature gypseuse ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ). Comme les tufs calcaires, ils sont caractérisés par le durcissement après malaxage à l'eau, compactage et séchage ce qui confère au matériau une forte cohésion à sec.

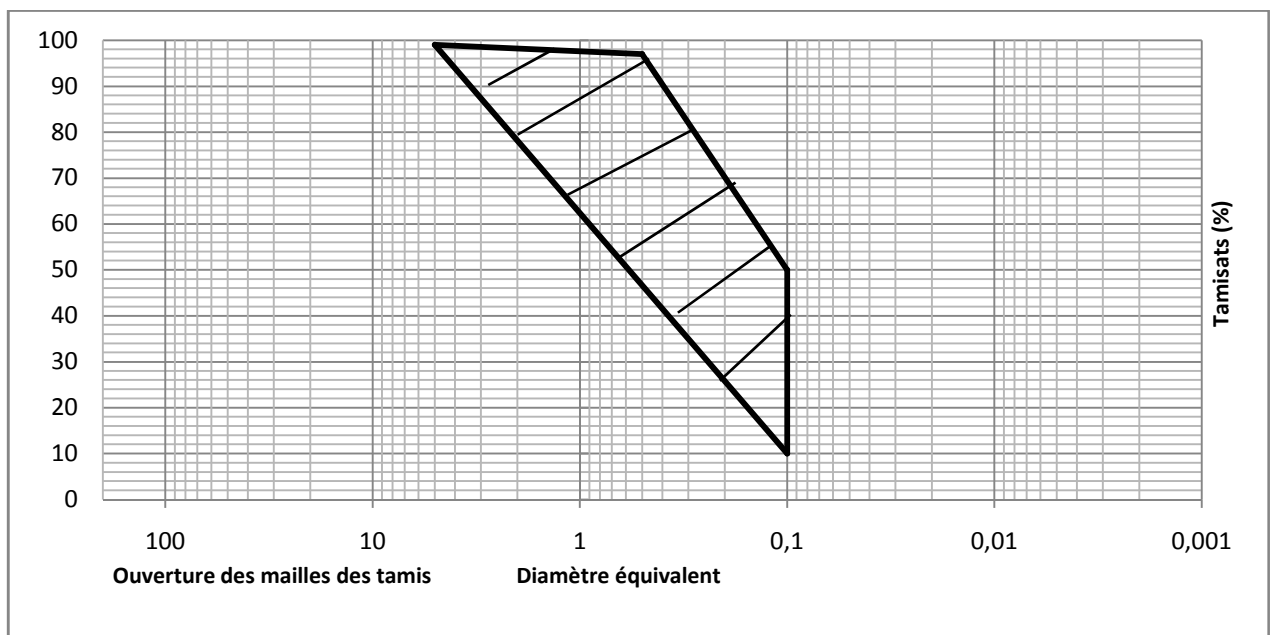


Figure II.07 : Fuseau granulométrique du Sable gypseux de la région nord d'El-Oued (Tliba, 1994)

Ce sable a une résistance variant entre 15 et 45  $\text{kg/cm}^2$  pour une compacité de 95%. Pour une compacité de 98% la résistance varie entre 20 et 45  $\text{kg.cm}^2$ . La teneur en gypse  $\text{Ca SO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  est de 60% et 90%.

#### ✓ **Tout venant**

Au Sahara, on trouve les tout-venants sur les surfaces des regs. Ils sont en générale des graves composées d'éléments anguleux et contenant une fraction fine argileuse carbonatée qui leur confère une importante cohésion. On donne dans la figure II.08 le fuseau granulométrique qui caractérise ce matériau. Le

tout venant présente un indice de plasticité de 5 à 10, il donne une résistance à la compression  $> 25 \text{ kg/cm}^2$  à 98% à l'OPM.

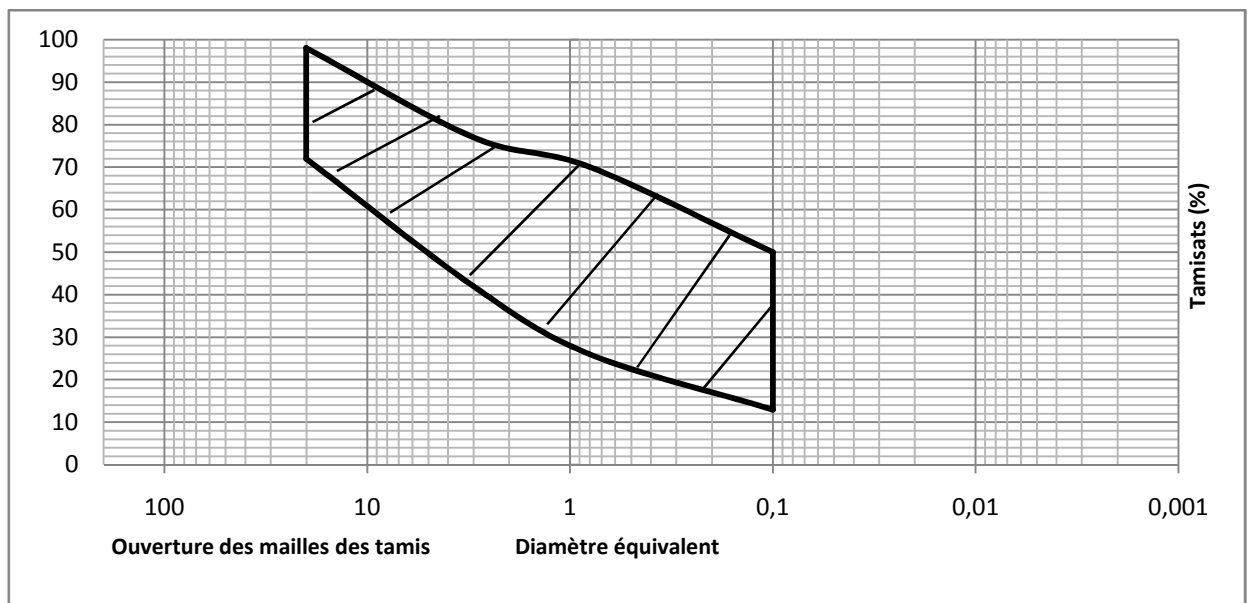


Figure II.08 : Fuseau granulométrique des tout-venants de plateau de TinRhert utilisé dans la RN° 03 de la région d'Ouhant (Tliba, 1994)

#### ✓ Arène granitique

On illustre dans la figure II.09 les caractéristiques de l'arène granitique de Tamanrasset.

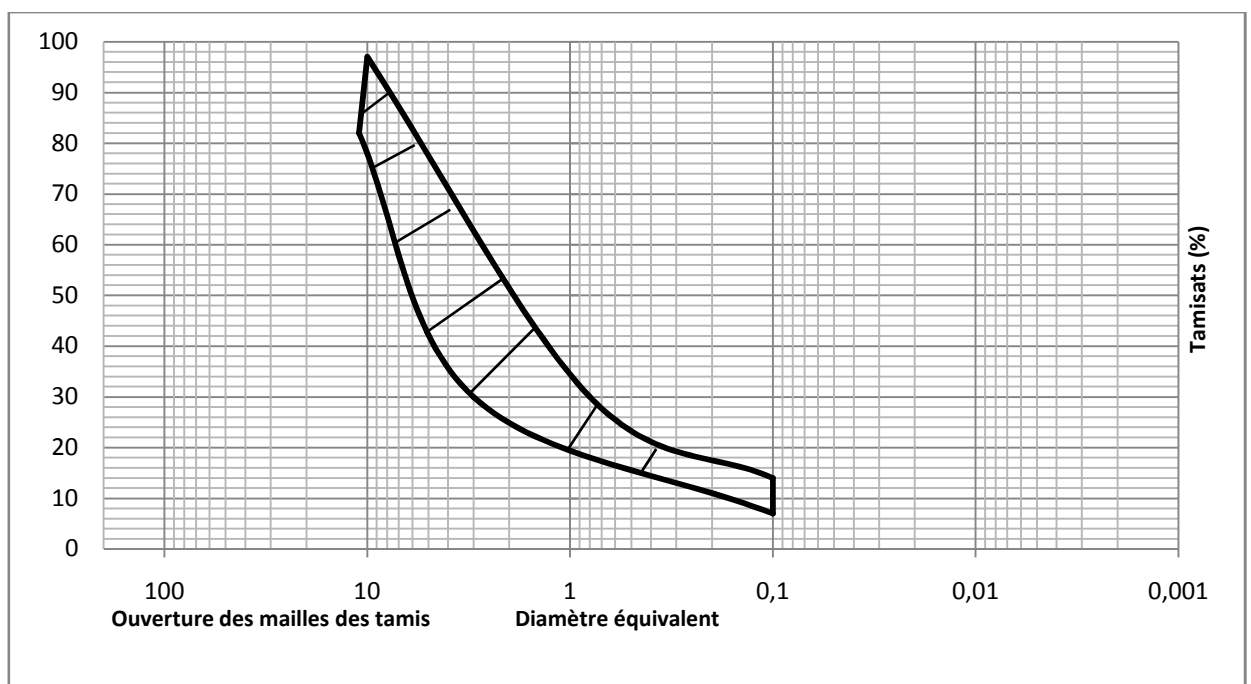


Figure II.09 : Fuseau granulométrique des Arènes granitiques de Tamanrasset (Tliba, 1994)

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

Les arènes granitiques fournissent une résistance allant de 14 à 35 kg/cm<sup>2</sup> pour une compacité de 98%. Elles donnent un IP borne entre 7 et 15.

## 5. Les eaux dans les zones arides

Les milieux arides sont caractérisés par une pénurie d'eau. Outre les eaux de surface qui persistent pour de très brèves périodes après les orages, la majeure partie des réserves d'eau est souterraine. Il s'agit d'eaux fossiles ou d'eau géologiquement confinées, qui ne sont plus alimentée par les pluies. Cette ressource est finie et non renouvelable.

Des recherches récentes ont révélé la qualité chimique de ces eaux notamment dans le Sahara septentrional algérien (Tabouche et Achour, 2004). Pour le Sahara septentrional algérien, l'essentiel des ressources est constitué par les eaux souterraines (tableau 02.II).

Tableau II. 02 : Analyses physico- chimiques des eaux souterraines de la région de Biskra (Tabouche et Achour, 2004)

| Localité      | nappe       | Désignation | Conductivité mS/cm | pH   | TH (°F) | Ca <sup>2+</sup> (mg/l) | Mg <sup>2+</sup> (mg/l) | Na <sup>+</sup> (mg/l) | K <sup>+</sup> (mg/l) | HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (mg/l) | Cl <sup>-</sup> (mg/l) | SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> (mg/l) | F <sup>-</sup> (mg/l) |
|---------------|-------------|-------------|--------------------|------|---------|-------------------------|-------------------------|------------------------|-----------------------|--------------------------------------|------------------------|--------------------------------------|-----------------------|
| Biskra        | Phréatique  | O. Biskra   | 3.8                | 8.08 | 93      | 198                     | 107                     | -                      | -                     | 172                                  | 976                    | 1200                                 | 1.07                  |
|               |             | Doucen      | 4.88               | 7.14 | 351     | 702                     | 421                     | -                      | -                     | 1150                                 | -                      | -                                    | 2.94                  |
|               |             | El-Hadjeb   | 3.19               | 7.14 | 179     | 645                     | 43                      | -                      | -                     | 185                                  | 1100                   | 1750                                 | 2.41                  |
|               | Miopliocène | M'Cid2      | 6.32               | 7.04 | 156     | 189                     | 261                     | 690                    | 33                    | 351                                  | 1999                   | 700                                  | 1.49                  |
|               |             | El-Alia     | 5.12               | 7.23 | 120     | 168                     | 187                     | 552                    | 24                    | 290                                  | 1799                   | 833                                  | 1.33                  |
|               |             | F-Wilaya    | 4.82               | 7.56 | 123     | 184                     | 185                     | 450                    | 37                    | 212                                  | 1949                   | 366                                  | 1.49                  |
| Eocène Albien | S-Chaiba    | 1.44        | 8.22               | 59   | 133     | 62                      | -                       | -                      | 167                   | 639                                  | 370                    | 2.63                                 |                       |
|               | O- Djellal  | 3.97        | 7.97               | 191  | 454     | 186                     | 356                     | 56                     | 139                   | 1545                                 | 1250                   | 0.65                                 |                       |

Ces dernières constituent l'un des plus vastes réservoirs hydrauliques du monde (Bel et Cuche, 1970; CDTN, 1992), dont les potentialités mobilisables sont estimés à 5 milliards de mètres cubes d'eau (ANRH, 1986). Par ailleurs, diverses études entreprises depuis une trentaine d'années, ont montré que les eaux de cette région sont caractérisées par une minéralisation totale excessive

Le pH de toutes les eaux est voisin de la neutralité avec un caractère plus ou moins alcalin. La plupart des eaux présentent aussi un caractère alcalin bicarbonaté du fait que le PH est souvent inférieur à 8,3. Ces eaux sont lourdes.

## **6. Conclusion**

Afin de mieux comprendre l'intérêt du compactage à faibles teneurs en eau, on a présenté dans ce chapitre le cadre climatique et géomorphologique des zones arides du pays et la qualité des sols qu'on peut y trouver. Les zones arides représentent 80% de la superficie de notre pays.

La réserve d'eau dans le désert, se présente sous une forme d'eau souterraine non renouvelable. Dans ces régions, l'eau de surface est rare et insignifiante. Ces ressources sont très limitées et minimes (précipitations rares) et des quantités d'eau s'échappent par évaporation, sous l'effet des températures excessives ou bien par les vents chauds et desséchant et de l'ensollement. La faiblesse de l'humidité de l'air donne une atmosphère desséchante au Sahara.

Connaissant :

- ✓ La qualité des matériaux sahariens.
- ✓ L'extrême rareté de l'eau.
- ✓ Les difficultés objectives pour compacter les sols et matériaux dans les conditions spéciales et eu égard à la nécessité d'équiper notre grand sud, principal pourvoyeur du développement du pays, il n'est plus besoin de démontrer l'intérêt économique de la mise en œuvre du compactage à faibles teneurs en eau.

## **Chapitre III**

### **Généralités sur le compactage des sols**

#### **1. Introduction**

Le compactage réalise un rapprochement et une réorganisation des grains entre eux, sous une énergie appliquée au sol, pour avoir une réduction de l'indice des vides de même qu'une augmentation de la compacité ( $\gamma_d$ ).

Cette opération se retrouve souvent dans les terrassements, la construction des corps de chaussées routières et des noyaux de barrage en terre.

Lorsqu'on compacte un sol ou un matériau, on réalise une amélioration dans ses caractéristiques mécaniques (la cohésion  $C$  et l'angle de frottement  $\varphi$ ) ainsi que l'augmentation du module de déformation et par conséquent l'amélioration de la portance du terrain, la diminution des tassements et de la perméabilité sous l'effet de la réduction de la porosité du sol compacté.

#### **2. Les facteurs influençant le compactage**

En 1929 Proctor a étudié le compactage de telle manière qu'il a bien défini l'effet de la teneur en eau et de l'énergie de compactage sur le serrage des particules du sol.

La masse volumique du sol compacté varie considérablement avec :

- ✓ La teneur en eau.
- ✓ L'énergie de compactage.
- ✓ La nature du sol.

##### **2.1 L'influence de la teneur en eau**

Le compactage se fait par arrosage du sol avec de l'eau. La courbe Proctor (figure III.01) montre bien que la masse volumique sèche augmente avec la teneur en eau

jusqu'à un point optimal qui s'appelle aussi l'optimum Proctor (défini par une densité sèche maximum  $\gamma_{dmax}$  et une teneur en eau optimale ( $w_{opt}$ )).

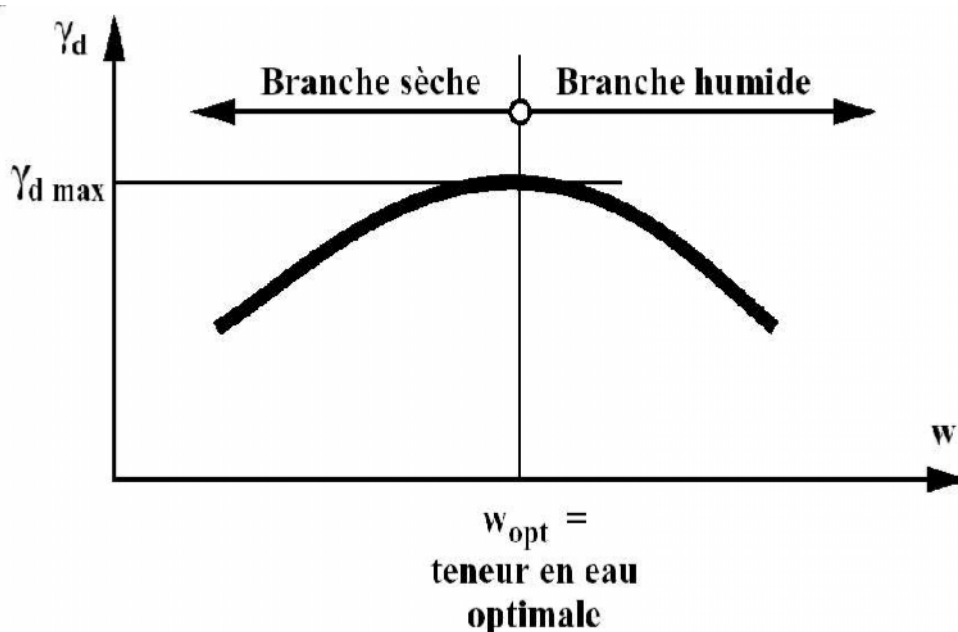


Figure III.01 : La forme générale de la courbe Proctor

Les teneurs en eau inférieures à la teneur en eau optimale forment la branche sèche du compactage. Lorsqu'un sol est compacté, on constate que plus on rajoute de l'eau plus le compactage devient facile. L'eau permet de diminuer le frottement qu'oppose le sol au compactage. Au-delà de l'optimum, l'eau est en excès. Elle occupe une grande partie des vides de sol. Lorsqu'on applique une charge de compactage sur le matériau l'eau étant un corps incompressible, elle va reprendre une portion importante de l'énergie de compactage. Cette portion dépend de la quantité d'eau. L'énergie transmise au sol par le compactage, ne se transfère pas aux grains. Dans ces conditions le sol devient petit à petit moins dense dans ces conditions de grandes humidités.

## 2.2 Influence de l'énergie de compactage

Sur le chantier, l'énergie mécanique peut être transmise au sol de différentes manières. La quantité d'énergie transmise au sol dépend premièrement du type de compacteur utilisé et du nombre de passes du compacteur ; plus le nombre de passes est grand plus l'énergie transmise est importante.

Pour le même sol, si on augmente l'énergie et on conserve la même teneur en eau la densité augmente (figure III.02), l'allure de la courbe de compactage est globalement la même, elle se déplace vers le haut et elle est limitée sur la droite par la courbe de saturation totale ( $s_r=100\%$ ).

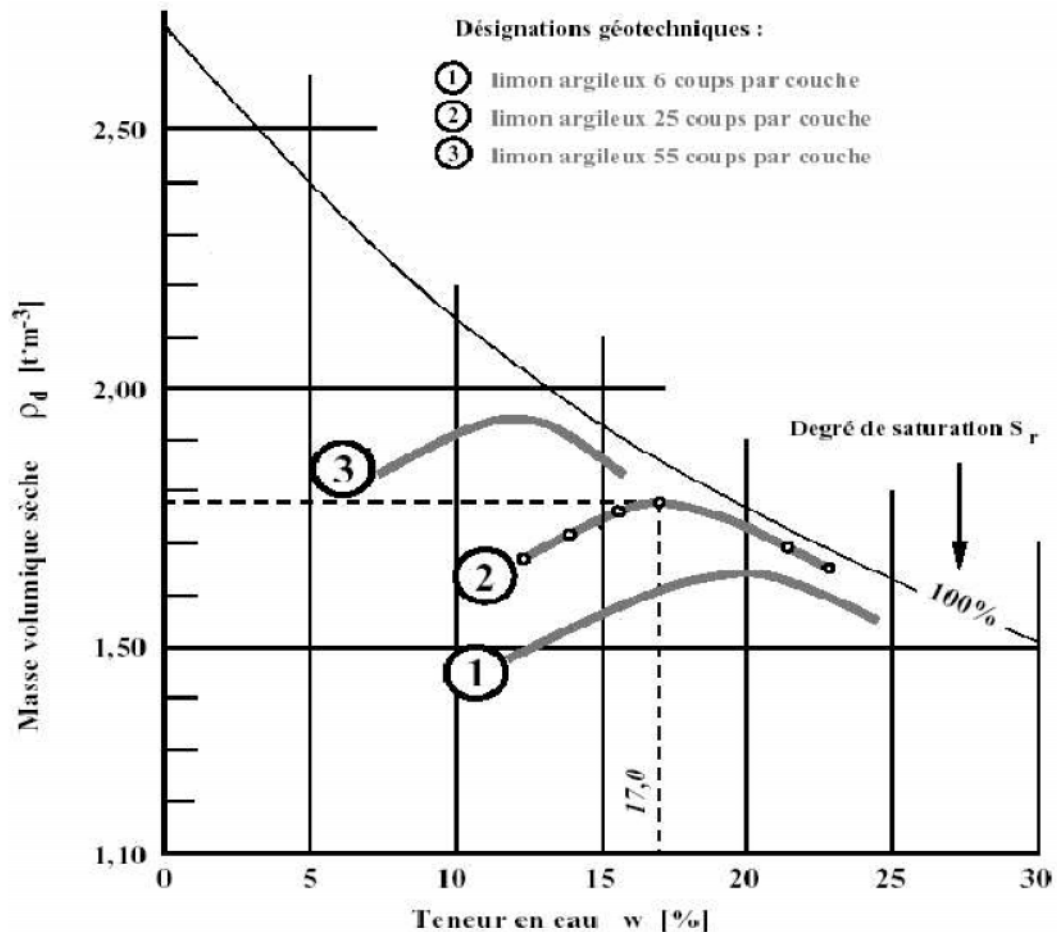


Figure III.02 : L'influence de l'énergie sur la courbe de compactage

### 2.3 L'influence de la nature de sol

Les sols qui ont une courbe de compactage avec un maximum très marqué, sont très influencés par la teneur en eau. Contrairement, les sols qui ont une courbe plate, sont moins influencés par la variation de la teneur en eau et ils forment des bons matériaux pour remblai (figure III.03).

Selon cette figure on constate que le compactage des sables est moins influencé par l'eau par contre l'eau influe considérablement sur le compactage des sols argileux.

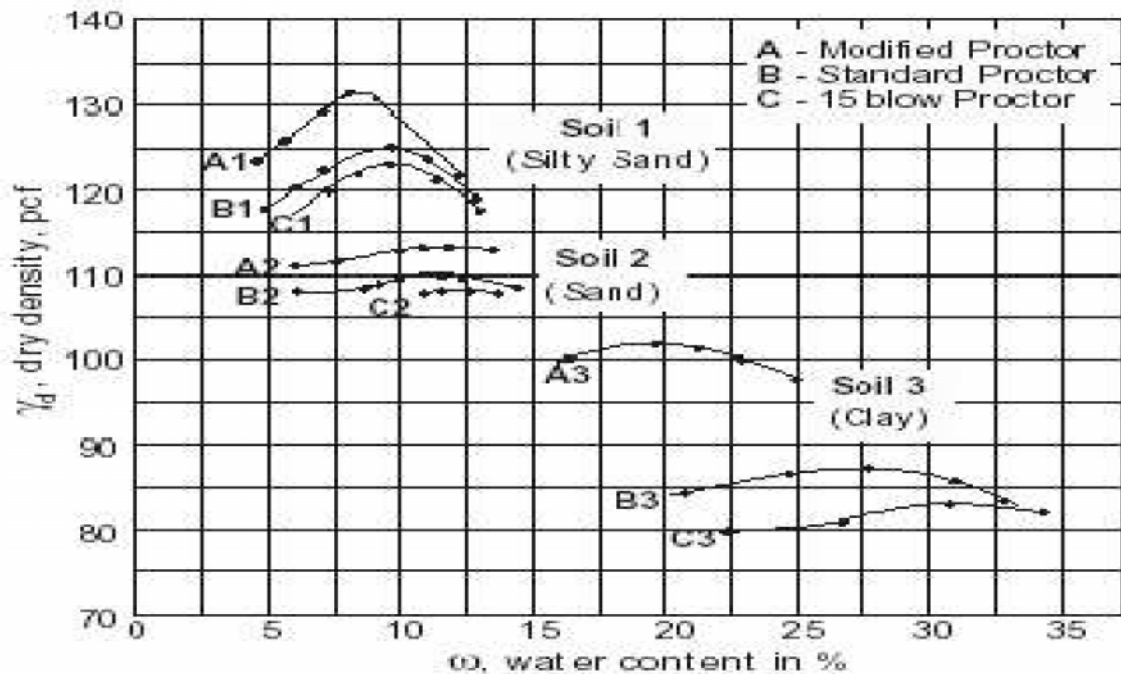


Figure III.03: L'influence de la nature du sol sur le compactage

## 2.4 Le compactage dynamique et le compactage vibratoire

On distingue deux types de compactage:

- ✓ Le compactage dynamique. L'énergie de ce mode de compactage est transmise depuis la surface au matériau compacté par propagation d'ondes de compression et de cisaillement.
- ✓ le compactage vibratoire, 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).

## Chapitre IV

### Compactage à faible teneur en eau

#### 1. Mécanisme du compactage à faible teneur en eau

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. Cependant, dans les zones arides où d'un côté, l'eau est une denrée rare, et de l'autre certains sols fins sont très sensibles à l'eau et leur compactage à des quantités d'eau importantes pose plusieurs problèmes techniques, le compactage à sec ou presque peut présenter des avantages économiques s'il peut offrir des performances acceptables des couches de sol ainsi compactées.

Des essais Proctor au laboratoire, effectués sur un grand nombre de spécimens et avec des teneurs en eau proches du zéro ont donné des courbes de compactage irrégulières. On présente dans la figure IV.01 une illustration de ces formes observées dans ces cas.

Des études ont montré qu'il existe une teneur en eau critique  $W_c$  pour laquelle la courbe passe par un minimum telle que pour des teneurs en eau plus faibles, on peut obtenir des densités sèches élevées et même parfois plus fortes que celles correspondant à l'optimum Proctor modifié. Il est possible, et avec certains engins notamment les rouleaux vibrants de compacter à teneur en eau quasi nulle. Cette possibilité a donné lieu à quelques applications dans les zones arides du globe où elle présente un intérêt considérable.

Il est à noter que même sous un climat désertique, le sol a naturellement une teneur en eau de 1 à 3 % (très faible mais pas nulle).

La forme de la courbe dépend du type de matériau, mais il est fréquent de rencontrer ce genre de courbes qui présentent un minimum et une zone où les densités sèches diminuent lorsque les teneurs en eau augmentent dans les faibles valeurs. Quelques

exemples de courbes de compactage prolongées sont reportées dans la littérature ((Morris, 1975) ; Grace et Cocksedge 1978 ; Lee et Suedkamp 1972 ; Lee, 1976 ; Lewis,

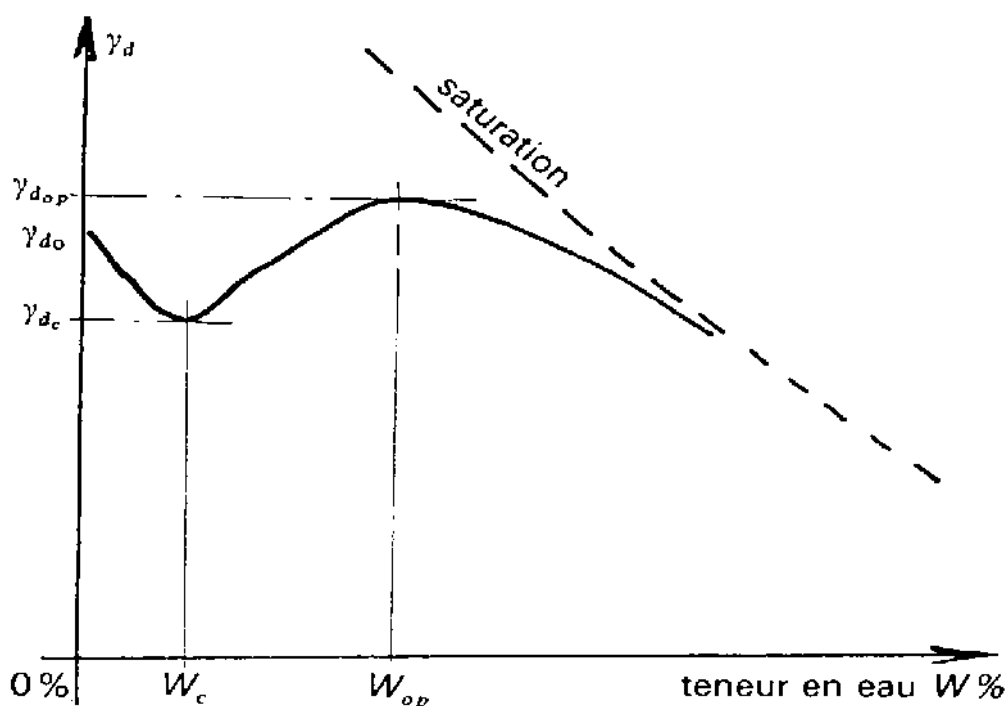


Figure IV.01 : Courbe Proctor complète (I.S.T.E.D, 1987)

1954 ; Lewis et Parsons, 1961 ; Mtango, 1979 ; Forsblad ,1974).

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

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

## 2. Historique et quelques expériences

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

En Australie, des travaux s'étalant entre 1962-73 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 compactés 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.

En Europe, dans le passé, on note très peu de travaux sur le compactage à sec en Angleterre et en France. Des recherches plus récentes s'intéressent plus à des techniques de construction dans les zones arides. Dans ce contexte, des sables ont été compactés à sec en Angleterre (Grace et Cocksedge, 1978).

En France, des travaux sur des sables quartzeux compactés à sec se sont révélés particulièrement intéressants (Chaigne et Blivet, 1971). La plus grande densité sèche a été obtenue à une teneur en eau nulle et de bons résultats ont été obtenus par une large gamme de rouleaux vibrants.

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

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

Les travaux ont consacré une large partie sur l'étude des ajouts pour améliorer le compactage. Cette étude a été suivie par un rapport sur l'utilisation de ces ajouts NIRR (Todres, 1970). Des ajouts qui sont des agents actifs de surface qui réduisent la tension de surface de l'eau et l'amènent à mouiller plus efficacement la surface des grains à compacter. Une panoplie de ces produits ont été développés et proposés sur le marché. Le rouleau à impacts (figure IV.02) a été développé à l'origine pour compacter les sols mous mais il s'est avéré très efficace pour le compactage à des profondeurs de 2 à 4 mètres des sables uniformes à de très faibles teneurs en eau (Clifford, 1976).



Figure IV.02 : Compacteur à rouleau à chocs

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

Au Soudan, un essai de compactage à grande échelle a été entrepris par la TRRL 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 UNDP Sahelian Feeder Road Project (International Road Federation, 1978).

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

Au Niger, une autre expérience aussi de compactage à sec a été conduite dans le cadre des travaux de réalisation de la route Tahoua-arlit, afin d'évaluer l'intérêt de l'emploi, a leur teneur en eau naturelle : - d'un sable fin 0/1 mm présentant un équivalent de sable de l'ordre de 50 (sol b1) pour constituer le remblai ; - d'un tout-venant de reg qui est une grave bien graduée 0/100 mm ayant 5 à 20 % de fines (sol c1 à c2) pour réaliser la couche de base de la chaussée. Après une étude de compactage en laboratoire à la dame Proctor et à différentes énergies, des essais de compactage en vraie grandeur de compactage au moyen de rouleaux vibrants et d'un compacteur à pneus utilisé en atelier après le rouleau vibrant ont été effectués. Les résultats (densités moyennes) ont permis de montrer que le compactage à faible teneur en eau du sable pouvait être utilisé sous réserve de prévoir un traitement de la partie supérieure du remblai (couche de forme) par arrosage ou apport d'une grave en couche mince. La dispersion des résultats obtenus sur le tout-venant de reg n'a pas permis de dégager une méthode de compactage à sec de ce matériau.

En Algérie, un programme d'essais a été tracé dans les années 1970, pour appuyer et suivre les projets de construction des routes dans le sud du pays. A cet effet une planche expérimentale a été réalisée à Tamanrasset. Les laboratoires Nationaux des Travaux

Publics ont réalisé les essais et interprété les résultats. On a retrouvé trois rapports sur le compactage à sec de Tamanrasset, le premier 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 points de vues et mis à jour une différenciation au niveau des arènes. Une différence de granulométrie relativement minime amène des gains non négligeables sur les densités et les essais de portance. On aura intérêt à rechercher préférentiellement ces zones d'arènes grises, évaluer leur importance par rapport aux arènes jaunes (profondeur, été). Ces planches ont aussi mis en évidence l'importance des matériaux choisis, plus que l'importance du rouleau, bien que ces derniers soient quand même différenciés. Le rouleau léger a l'avantage sur les deux rouleaux lourds à peu près équivalents.

### **3. Détection des déficits du compactage à sec par le profil de densité**

Pour compacter un matériau il existe selon le cas deux façons de procéder ; par l'arrosage des matériaux secs, ou bien, par assèchement des matériaux très humides. Or, dans les zones arides les sols sont secs et l'eau est très précieuse. Dans ces régions, les chercheurs proposent de compacter le sol à faible teneur en eau (Figure IV.01). Même si, le compactage était fait à l'optimum Proctor, les opérations impliquent une organisation de chantier assez compliquée, spécialement, pour éviter l'évaporation entre le moment de l'incorporation de l'eau et celui de la fin du compactage.

#### **3.1 Profil de densité**

La forme du profil de densité d'une couche de sol compacté est étudiée dans le chapitre VII. Le compactage conduit généralement à des densités importantes au sein de la couche avec un décompactage superficiel un maximum et une chute de densité en fonction de la profondeur.

L'ampleur du gradient de la densité dépend de la nature du matériau, de son état, de l'épaisseur de la couche et de l'énergie de compactage appliquée.

Les laboratoires à la pointe de la technologie, utilisent un appareil dit : le banc gamma, pour mesurer la variation de la densité dans un moule (figure VI.1).

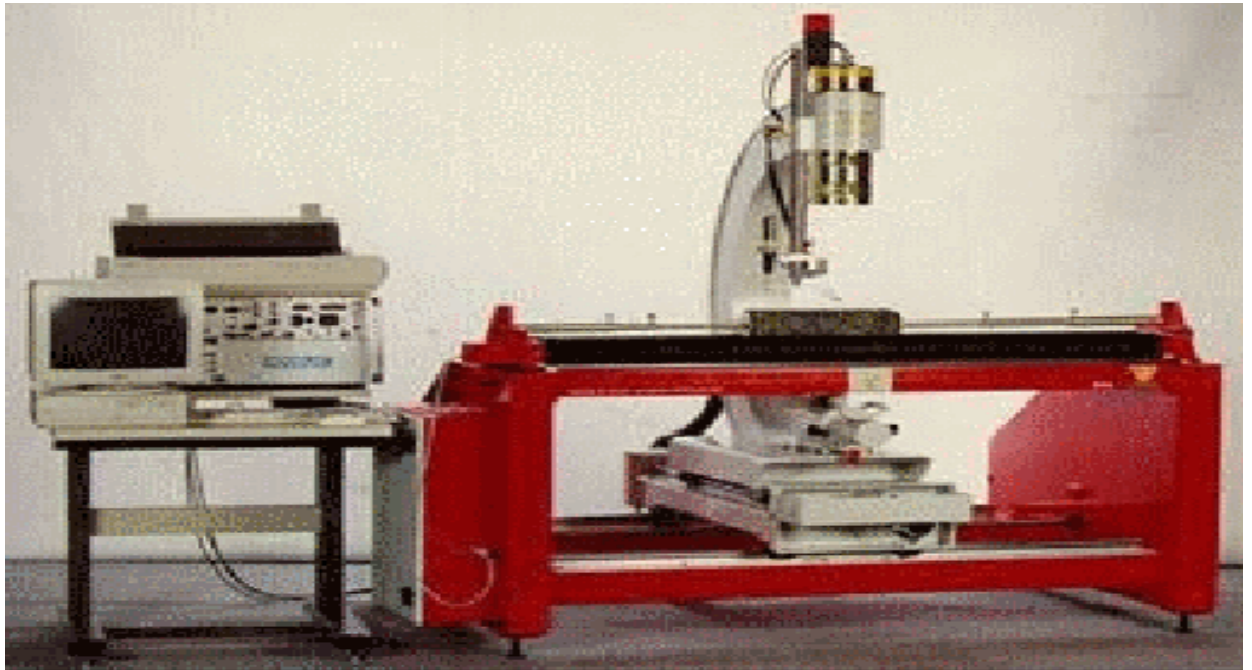


Figure IV.03 : Le banc gamma (LCPC, 2010)

### 3.2 Problème de faible densité de la partie supérieure de la couche

La courbe (figure IV.04) de compactage en fonction de la profondeur  $\gamma_d = f(z)$ , la courbe fait apparaître une zone de surface mal compacté.

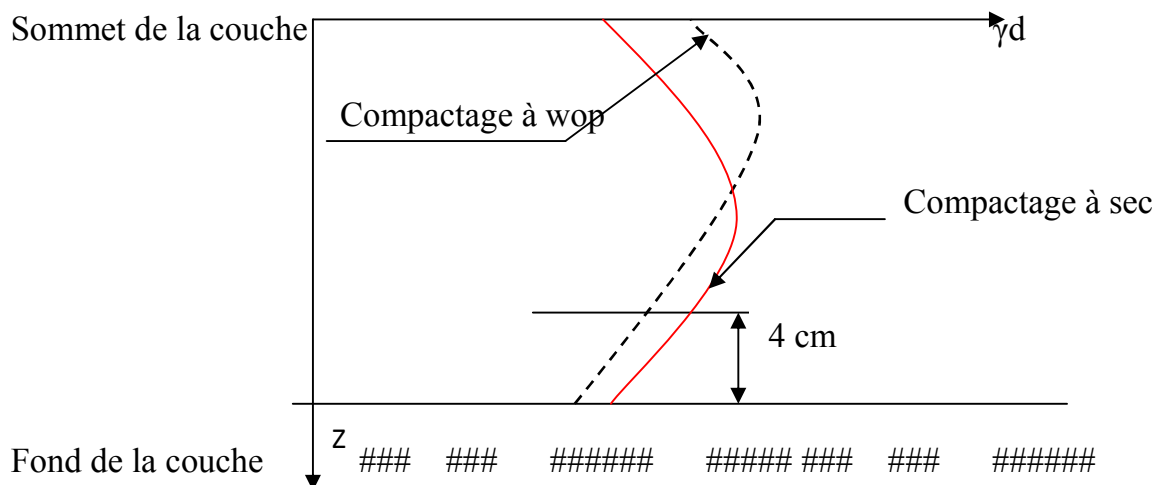


Figure IV.04 : Distribution de la densité sèche en fonction de la profondeur (ISTED, 1987)

L'importance du phénomène dépend de la nature du matériau, de sa teneur en eau réelle et du matériel de compactage. Ce phénomène est d'autant mieux marqué que les

caractéristiques du matériel sont plus élevées, que la teneur en eau est faible, que  $\gamma_{dmax}$  -  $\gamma_{dmin}$  est élevée, que le matériau est moins argileux (ISTED, 1987).

✓ **Les facteurs compliquant le problème**

➤ **Traficabilité**

Les difficultés sont donc d'autant plus grandes que la cohésion et angle de frottement du sol sont plus faibles ou que le matériel est plus lourd. On doit bien choisir le matériel de compactage (motricité de chaque roue et de chaque bille vibrante diamètre des roues suffisant). Cette difficulté sera grande dans le cas de matériaux très sensibles et une pente de profil en long un peu importante.

Selon les auteurs, il est conseillé de compacter en profondeur aux grands engins et de finir avec des engins plus légers ou des compacteurs pneumatiques pour densifier la partie supérieure.

➤ **La ségrégation et évolution granulométrique pendant le compactage**

Au moment du compactage à sec, il se produit une ségrégation verticale, spécifiquement pour les rouleaux vibrants. On aura, un cisaillement et une séparation des grains et par conséquence une réduction granulométrique. Si un matériau contient un pourcentage important de fines (12 à 35%), on aura une forte concentration des fines sur la partie supérieure.

### **3.3 Résolution et recommandation (ISTED, 1987)**

D'après les recommandations de l'ISTED, 1987, la densité faible de la partie supérieure de la couche peut être rattrapée et augmentée lors du compactage de la couche supérieure (figure V.05), à condition que l'épaisseur de la couche sus-jacente ne soit pas trop importante, compte tenu du matériel utilisé. Le contrôle du compactage par mesure de la densité moyenne couche par couche, n'est pas utilisable dans le cas du compactage à sec.

Il ne peut pas se faire que lorsque la réalisation de l'ouvrage est achevée. On donne dans le chapitre suivant les méthodes les outils de contrôle de compactage. On

pourra remarquer que les nouveaux outils permettent bien le contrôle une fois que tout l'ouvrage est compacté.

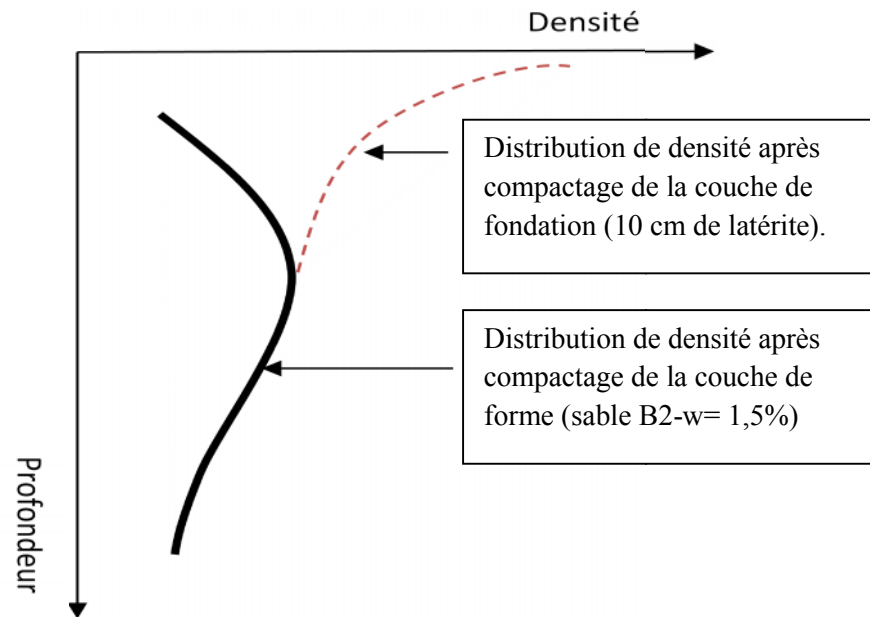


Figure IV.05 : Distribution de la densité sèche au sein de la couche compactée (ISTED, 1987).

## Chapitre V

# Contrôle du compactage : Évaluation des appareils de contrôle de compactage des sols

### 1. Introduction

L'opération du compactage d'une couche de sol se termine par le contrôle de la densité sèche selon les prescriptions énoncées dans le cahier des charges.

On présente dans ce chapitre les méthodes de contrôle du compactage. Afin d'illustrer l'évolution qui se réalise dans ces méthodes de contrôle du compactage, on présente les méthodes traditionnelles qui doivent suivre le compactage de chaque couche, appelées méthodes contrôle qualité. On présente aussi des méthodes beaucoup plus récentes qui permettent de contrôler le compactage de tout l'ouvrage. Ces méthodes s'appellent méthodes d'assurance qualité.

### 2. Classification des appareils de mesure et de contrôle

Comme indiqué plus haut, les appareils de mesure de compactage ont été classés en deux types. Ces types sont de contrôle qualité (QC) ; des appareils de mesure qui sont utilisés dans le contrôle couche par couche au cours du compactage, et d'assurance qualité (AQ) des dispositifs qui sont utilisés pour mesurer le profil de post-compactage de tout le profil de remblai compacté et (A.C) sont illustrés dans le tableau V.01.

### 3. Les appareils de mesure du compactage







Parmi les appareils de mesure du compactage qui sont nouveaux, on cite :

- ✓ Le contrôleur (ou superviseur) du compactage du sol (SCS)
- ✓ L'appareil pénétromètre dynamique à cône Pénétromètre (DCP)
- ✓ La géo-jauge.

On les présente dans ce qui suit (Tableau V.01) en mettant en avant l'apport qu'ils réalisent par rapport aux méthodes conventionnelles qui sont :

- ✓ Gammadensimètre.
- ✓ Cône à sable.

Tableau V.01 : Appareils de contrôle de compactage (APWA; mars 2005)

| Appareil  | photos   | type                                     |
|---|--|--|
| Gammadensimètre<br>[Modèle Troxler 3440]        |     | contrôle qualité (QC)                    |
| Cône à sable.                                   |    | contrôle qualité (QC)                    |
| Superviseur du compactage du sol                |  | contrôle qualité (QC)                    |
| Pénétromètre dynamique à cône<br>[DCP]          |   | contrôle qualité (QC)<br>(DCP)           |
| Pénétromètre dynamique à cône<br>[Standard DCP] |  | assurance qualité (AQ)<br>[Standard DCP] |
| La géo-jauge                                    |  | contrôle qualité (QC)                    |
| PANDA   |   | assurance qualité (AQ)                   |

### ✓ Le gammadensimètre

Le Gammadensimètre permet d'effectuer avec rapidité des mesures de densité et d'humidité de divers sols, terrassements, granulats, bétons et enrobés bitumineux sans avoir recours à des prélèvements ou à d'autres méthodes destructives. On peut effectuer des mesures dans une tranchée de moins de 60 cm mais sur lesquelles on doit effectuer des corrections. Cet appareil contient des options spéciales pour la correction en tranchée. Les mesures de l'humidité du sol en utilisant les NDG sont généralement plus élevées que les lectures obtenues à partir des tests de laboratoire-étuve. La figure V.01 montre les résultats des deux tests en différents types de sols. La corrélation entre les deux résultats dépend essentiellement du type de sol.

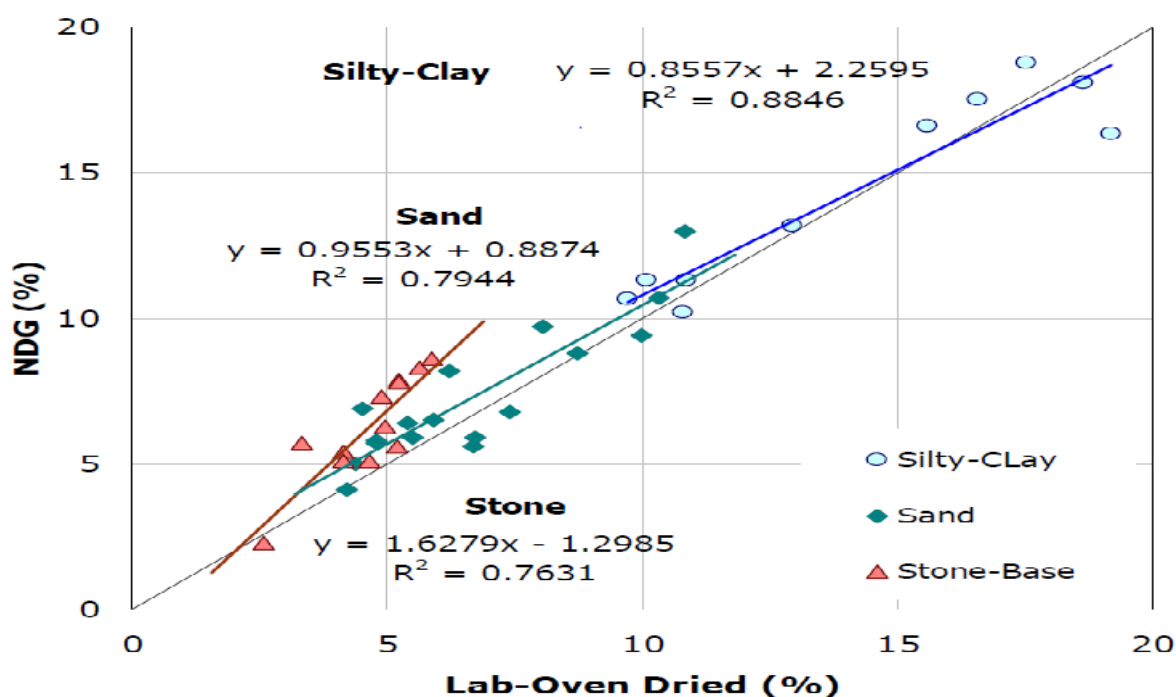


Figure V.01: Mesures de la teneur en eau de sol par le gammadensimètre et la méthode de dessiccation au laboratoire (APWA; mars 2005)

En outre, la quantité d'hydrogène dans le gypse, la chaux, et les particules de cendres volantes peuvent affecter les valeurs de l'humidité et les résultats dans le contenu en humidité sont plus élevés. L'effet des parois latérales varie avec la hauteur de la tranchée. Les résultats montrent que l'effet des parois latérales est réduit à des profondeurs moindres.

**✓ Cône à sable:**

La méthode du cône à sable est enseignée dans les écoles d'ingénieurs. Elle est utilisée pour déterminer la densité du sol humide sur le terrain. La méthode consiste à creuser à la main un trou sur le site et mesurer la masse humide du sol excavé. L'appareil est ensuite utilisé pour remplir le trou avec un jet de sable de densité connue. Le poids du sable est utilisé pour déterminer le volume du trou. La densité en place par voie humide est déterminée en divisant la masse de sol enlevée sur le volume du trou. La teneur en eau du sol enlevée du trou est déterminée dans le laboratoire et la quantité de poids sec du sol peut également être calculé.

La figure V.02 montre l'appareil cône à sable. L'appareil est simple et la procédure est inscrite dans la norme ASTM D-1556. Toutefois, l'appareil nécessite un calibrage périodique et la précision des résultats dépend de l'expérience de l'opérateur. En outre, le calcul de la densité du sol sec exige la détermination de la teneur en eau du sol au niveau de laboratoire (méthode de séchage).



Figure V.02: Cône de sable (APWA; 2005)

Pour exécuter le test avec succès, le sol doit avoir une cohésion suffisante pour maintenir stables les parois du trou creusé. En conséquence, la méthode ne peut pas être adaptée à des sols saturés ou très plastiques qui risquent de se déformer ou se compresser au cours de l'excavation.

✓ **Le contrôleur (ou superviseur) du compactage du sol (CCS)**

Le contrôleur du compactage du sol consiste à placer un capteur au fond du trou. Le compacteur transmet des ondes (Figure V.03). La valeur de la densité mesurée dépend principalement de la rigidité du sol. Le dispositif produit un signal rouge lorsque le sol atteint son compactage maximal réalisable, ce qui indique l'arrêter le compactage. L'appareil est portable, économique et facile à utiliser. L'appareil peut être utilisé pour améliorer son utilisation comme outil QC pendant le compactage.

Cet appareil valable pour les sols à drainage libre est préféré à l'utilisation de la plaque vibrante.

D'autre part, l'application aux sols cohérents nécessite des recherches supplémentaires en raison de difficultés à atteindre la densité ciblée. En plus, il présente d'autres difficultés de mesure.



**A** CCS capteur avec le disque au fond de la tranchée (APWA; 2005)

**B** CCS mesures des ondes émises pendant le compactage (extrait du manuel de SCS)

Figure V.0 3 : Méthode de mesure par le SCS et son appareil

✓ **Le pénétromètre dynamique à cône (The Dynamic Cone Penetrometer (DCP)):**

Le dispositif est une version plus petite du pénétromètre dynamique standard à cône. Il a été développé pour être utilisé par les entreprises de services publics pour évaluer le

compactage des remblais de tranchées et de trous. L'utilitaire-DCP a une force de chute de 22.241 N, en comparaison avec les 78.28 N de la DCP Standard (figure V.05).

Le poids léger de l'appareil facilite son utilisation pour l'évaluation de compactage à QC pour chaque couche de sol.



Figure V.05 : Utilisation de l'utilitaire-DCP dans des remblais et tranchées bellhole (APWA; 2005)

### ✓ La géo-jauge

La mesure de la compacité se fait à partir de la rigidité de la couche donnée par la géo-jauge. Il estime la rigidité par l'application d'une force de vibration, qui produit des petites déformations dans le matériau. Par la suite la géo-jauge mesure les déplacements produits par les vibrations. Il peut donc donner facilement la rigidité de la couche.

Des essais antérieurs ont été réalisés pour évaluer la performance de la géo-jauge dans le contrôle du compactage. L'effet de bord a eu un impact négatif sur les données recueillies. La recherche montre qu'il n'existe aucune relation entre la rigidité mesurée à partir du la géo-jauge et la densité sèche mesurée à partir du gammadensimètre. Toutefois, les fabricants prétendent que les rigidités sont converties en valeurs de densité à l'aide des tableaux de corrélation. Ces mesures sont à moins de 5% des mesures effectuées avec le gammadensimètre.

## ✓ Le PANDA

### Description

Le PANDA est un pénétromètre de cône dynamique où un marteau manuel est utilisé pour mener un cône standard dans le sol. Figure V.06 montre un schéma du dispositif. Quand la tige du cône est conduite dans le sol, un accéléromètre mesure la vitesse d'impact et la bande escamotable mesure la profondeur de pénétration.

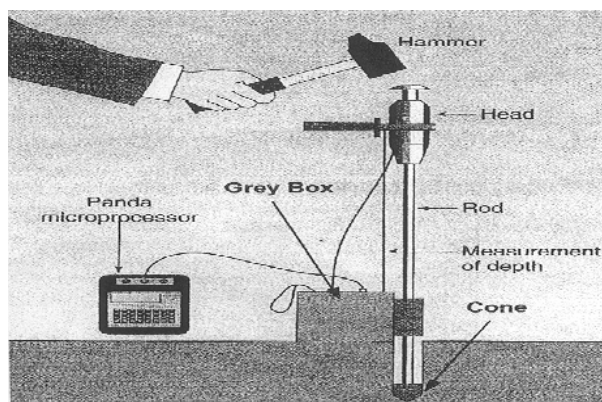


Figure V.06 : Schéma des composants du système PANDA (APWA; 2005)

Les résultats sont enregistrées à chaque coup dans une boîte électronique et le logiciel analyse les données et les compare aux courbes pré-calibrées établies pour différents sols standards. Le dispositif a été développé en France et les courbes calibrées ont été basées sur le système GTR français de classification des sols. Accompagnant des diagrammes sont fournis aux types de sol de corrélation entre les normes américaines (AASHTO et USCS) et françaises.

L'essai sur le terrain peut être exécuté par une personne. Le programme de calcul et d'interprétation des données suppose la connaissance de l'utilisateur des normes de classification des sols et de tassement et exige la formation technique pour l'usage du logiciel de qui accompagne le matériel.

### Essai et procédures d'analyse

La figure V.07 montre l'essai de PANDA dans une section typique d'essai dans un trou. Pendant l'essai, les mesures de la profondeur de pénétration et de la résistance de cône sont enregistrées et stockées dans un dossier dans la boîte du microprocesseur.



Figure V.07 : Essai avec le PANDA dans la section à intérieur de la fosse (APWA; 2005)

#### 4. Conclusion

On a présenté dans ce chapitre les méthodes disponibles pour le contrôle du compactage. Les méthodes conventionnelles permettent le contrôle couche par couche. Les méthodes modernes peuvent considérer le contrôle de tout le remblai. Selon la littérature, Le PANDA peut être plus efficacement utilisé pour l'inspection du site après la construction car il donne un profil complet de profondeur du sol compacté et, par conséquent, il permet de détecter toute anomalie ou un écart dans l'opération de compactage. Avec une politique d'application pertinente le PANDA pourrait devenir très rentable, en minimisant la nécessité d'une inspection sur place lors de la construction.

## **Chapitre VI**

### **Matériaux et Méthodes**

#### **1. Rappels des objectifs de l'étude**

Tel que montré dans la partie bibliographique de ce mémoire, certains sols sont capables d'exhiber des densités sèches croissantes lorsqu'ils sont compactés à des teneurs en eau très faibles.

On veut confirmer dans ce travail l'existence d'un tel phénomène pour un sol choisi. Pour ce faire, on détermine et on tente d'expliquer les courbes Proctor complètes étendues aux faibles teneurs en eau.

Afin d'étudier la viabilité du compactage à sec dans les ouvrages, on analyse le comportement du sol (résistance) compacté à sec par rapport à celui compacté aux normes standards (OPN, OPM). On situe cette analyse dans le contexte des sols non saturés. Pour aboutir à ces objectifs, on a réalisé le programme expérimental détaillé dans ce chapitre.

#### **2. Programme expérimental**

Le programme consiste à faire des essais de compactage réalisé suivant diverses configurations. On a fait varier les paramètres suivants :

- ✓ le nombre de couches compactées (ou la hauteur de la couche) dans le moule.
- ✓ L'énergie de compactage (Proctor normal, Proctor modifié...).
- ✓ Le moule de compactage (moule Proctor, moule CBR, fosse).
- ✓ Le mode de compactage (dynamique, vibratoire).

Pour les sols ainsi compactés, on a analysé le profil de densité obtenu à chaque fois. Les profils de densité ont été mesurés de deux manières ; manuelle et par le gammadensimètre lorsque ceci est possible. On a réalisé aussi des mesures de la propagation des ondes ultrasoniques dans les carottes de sols compactés, des essais CBR

et des essais de succion. Dans ce qui suit, on explique les méthodes qui ont été suivies pour réaliser chacun des essais de ce programme expérimental, qui est synthétisé dans un tableau à la fin du chapitre.

## **2.1 Identification du sol objet de l'étude**

L'identification comporte un ensemble d'essais d'identification, tels que l'analyse granulométrique et sédimentométrique, les limites de consistance, l'équivalent de sable et l'essai de valeur au bleu de méthylène ainsi que la détermination des caractéristiques du compactage du sol retenu.

## **2.2 Les essais de compactage**

### **2.2.1 Compactage dynamique**

Pour le compactage dynamique, on a réalisé les compactages avec les configurations :

- ✓ Compactage en une seule couche à l'énergie Proctor normal dans le moule Proctor.
- ✓ Compactage en deux couches à l'énergie Proctor normal dans le moule Proctor.
- ✓ Compactage en trois couches à l'énergie Proctor normal dans le moule Proctor.
- ✓ Compactage en cinq couches à l'énergie Proctor modifiée dans le moule CBR.

### **2.2.2 Compactage par vibration**

Pour le compactage par vibration, on a étudié les configurations :

- ✓ Compactage en une seule couche dans le moule Proctor.
- ✓ Compactage en une seule couche dans la fosse à différentes teneur en eau.

## **2.3 Les mesures de résistance (CBR immédiat)**

Par ces essais on tente de mettre en évidence entre autres l'influence relative de l'évaporation sur la résistance d'un matériau compacté à des différentes teneurs en eau.

## **2.4 Les essais d'analyse du résultat du compactage**

### **2.4.1 Profil de densité**

#### **2.4.1.1 Détermination du profil de densité manuellement**

Un travail a été consacré à la recherche d'une méthode manuelle adéquate, pour la mesure du profil de densité d'un sol compacté au laboratoire. La méthode manuelle a été utilisée pour le sol compacté dans le moule Proctor.

#### **2.4.1.2 Détermination du Profil de densité avec le gammadensimètre**

Le gammadensimètre a été utilisé, pour la mesure de profil de densité du sol compacté dans une fosse.

#### **2.4.1.3 Vérification du Profil de densité**

Les résultats du profil de densité ont été vérifiés par référence aux résultats de la courbe Proctor. Par disposition des points du profil de densité, par rapport à la courbe Proctor complète (le profil réalisé en cinq couches). On a pu confirmer la fiabilité des résultats et par conséquent l'adéquation de la méthode utilisée, pour la détermination du profil de densité.

### **2.4.2 Observation du sol au microscope**

Ces observations permettent normalement d'avoir une idée sur la disposition des grains et de l'humidité, dans les échantillons de sol compacté, donc ce qui devait renseigner sur la structuration des sols.

### **2.4.3 Mesure de la vitesse de propagation des ondes ultrasoniques dans le sol compacté**

On utilise ces mesures dans l'optique d'obtenir une idée sur les différences dans la distribution porale au sein du matériau compacté.

### **2.4.4 Mesures de la succion**

Ces mesures sont réalisées pour expliquer l'allure de la courbe Proctor, en particulier l'allure de sa partie sèche qui est au centre d'intérêt de cette étude.

### 3. Matériau utilisé

#### 3.1 Identification du matériau utilisé

Contrairement à ce qui était programmé le sol utilisé dans cette étude ne provient pas d'une zone aride, eu égard aux difficultés rencontrées pour l'acheminement d'une grande quantité à partir du sud. Un sol de remplacement a été utilisé.

Tous les essais d'identification ont été réalisés selon les normes françaises. Il a été prélevé le 19/12/2010, au niveau de l'Ecole. Il s'agit d'un remblai de couleur ocre. Le creusement a été fait après l'enlèvement de la terre végétale qui s'est constituée à la surface du remblai d'une épaisseur variable entre 25 et 30 cm. Le sol utilisé pour les essais d'identification et pour la première série de compactage a été récupéré par excavation manuelle jusqu'à une profondeur de 60 cm. Pour les autres essais le sol a été récupéré à l'aide d'une pelle mécanique jusqu'à une profondeur de 2,20 m. La teneur en eau naturelle du sol est autour de 15%.

#### ✓ Distribution granulométrique

Le sol contient environ 4,6% de gravier, 13,2% de gros sable, 34% de sable fin soit 47% de sable au total et une fraction supérieure à 25% de limon. Même si la sédimentométrie n'a pas été poussée aux ultrafines afin de pouvoir déterminer le diamètre équivalent ( $D_{10} < 3\mu$ ), on peut prévoir un coefficient d'uniformité  $> 16,67$ . Le pourcentage des passants au tamis de  $80\mu$  est environ 70% (figure VI.01).

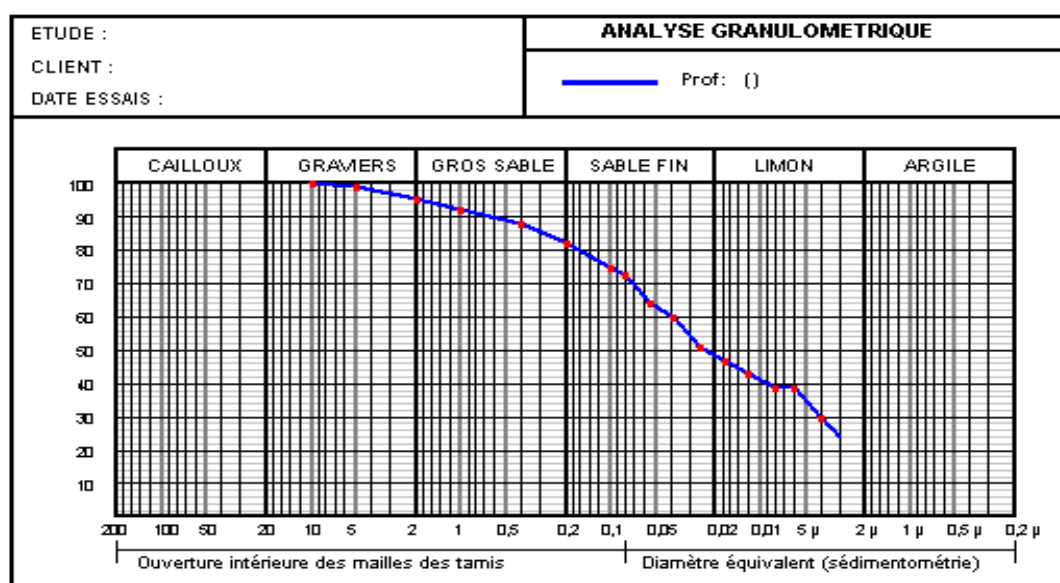


Figure VI.01 : La courbe granulométrique du sol utilisé

✓ **Valeur au bleu de méthylène**

Le sol a une valeur de bleu de méthylène variant entre  $1,5 < VBS=2,43$  g/ (100g de matériau sec).

✓ **Plasticité**

Les essais de consistance ont donné une limite de liquidité  $W_L=37,31\%$ , une limite de plasticité  $W_p=20,78\%$  et donc un indice de plasticité  $I_p=16,53$ . Cette valeur indique que le matériau est un sol peu plastique.

### 3.2 Classification du sol

✓ **Selon la classification du laboratoire Central des Ponts et Chaussées (L.C.P.C)**

Il s'agit d'un sable argileux conformément à la classification des sols grenus LCPC. La situation de la plasticité du sol donne un point au dessus de la droite A dans l'abaque de plasticité de Casagrande (figure VI.0 2).

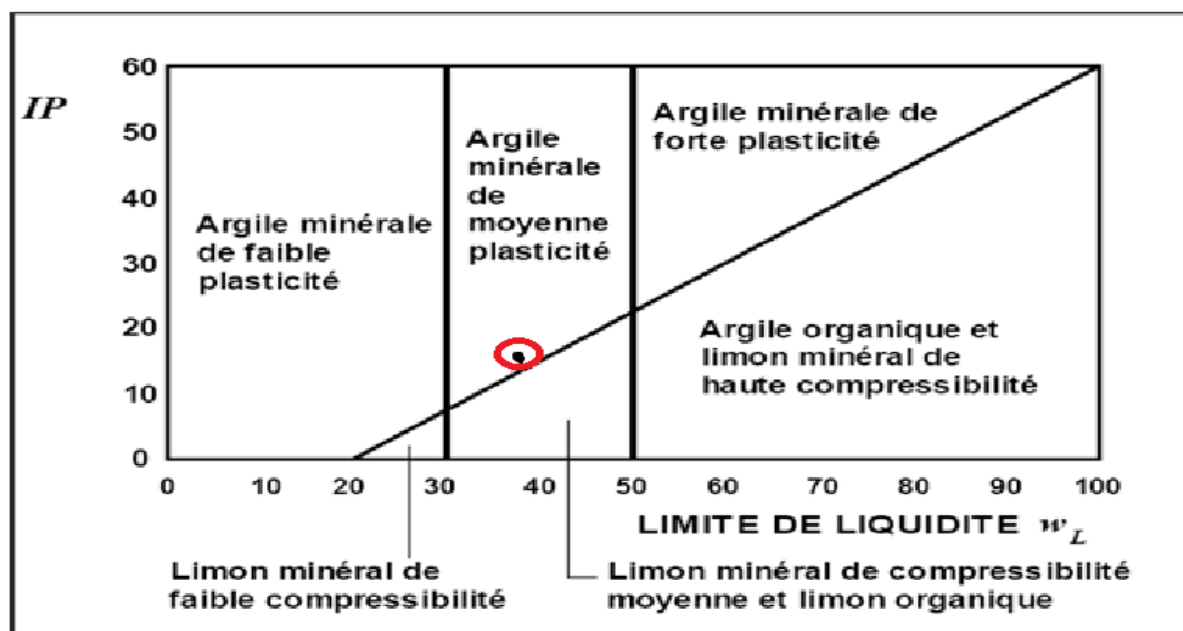


Figure VI.0 2 : Situation de plasticité du sol étudié dans l'abaque de plasticité de Casagrande

✓ **Selon la norme française N.F 11-300**

Selon cette norme, le sol est classé **A<sub>2</sub>** qui est un sol fin.

✓ **selon le Guide des Terrassements Routier G.T.R**

Le G.T.R donne la classification dans la NF 11-300 ; le sol se classe en **A<sub>2</sub>**.

Il s'agit d'un sol fin de faible plasticité, un sable fin limoneux si on se base sur la valeur VBS.

Il est comparable à une arène granitique argileuse. On peut voir que sa courbe granulométrique s'insère dans le fuseau granulométrique des limons grossier du désert (silty stony desert) présenté dans la figure II.06.

✓ **Détermination des caractéristiques du compactage**

On donne dans la figure VI.03, les courbes Proctor standards étendues aux faibles teneurs en eau obtenues pour deux niveaux d'énergie standard et modifié.

On remarque que la courbe ① présente deux pics et que la courbe ② présente un pic et demi. Il s'agit bien d'un matériau qui présente une courbe Proctor irrégulière. Donc on l'a retenu pour cette recherche.

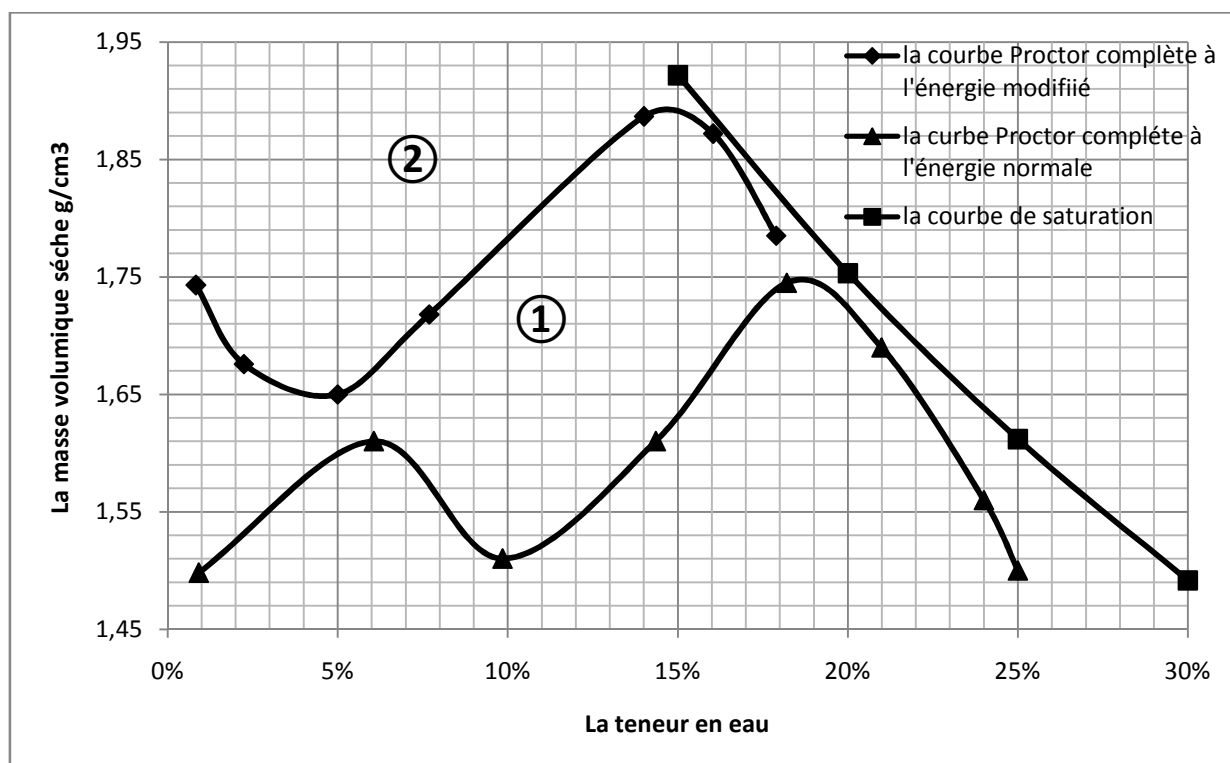


Figure VI.03 : Les courbes Proctor complètes du sol selon les deux niveaux d'énergie

#### 4. Procédures essais et matériel

Le sol est compacté selon les normes standards, en prenant soin de compléter les essais avec des échantillons compactés aux teneurs en eau très faibles.

##### 4.1 Compactage

###### 4.1.1 Compactage classique

Le matériau est préparé et compacté selon la norme NF P 94-093. On montre dans la figure VI.04 et la figure VI.05, les étapes de la préparation et de la réalisation de l'essai du compactage classique pour les deux types d'essai, standard et modifié.



Figure VI.04 : Étapes de réalisation de l'essai Proctor normal.



① Séchage de sol



② Tamisage au tamis 20mm



③ Malaxage et imbibition



④ Sol en 05 parts égales



⑤ Compactage moule CBR



⑥ Sol après compactage

Figure VI.05 : Étapes de réalisation de l'essai Proctor modifié (plus les mêmes étapes d'homogénéisation 1, 2, 3 cité dans la figure VI.05).

#### 4.1.2 Compactage en plusieurs couches

On veut changer la hauteur des couches compactées en gardant la même énergie de compactage. L'essai Proctor normal correspond à une énergie distribuée pour 3 couches à 25 coups par couche, si on veut garder la même énergie, le nombre de coups doit changer pour un nombre de couches différent.

L'exemple suivant, calcule le nombre de coups pour les essais de compactage en deux couches de telle façon qu'on conserve la même énergie Proctor normale:

$$\text{Energie de compactage (exprimée en kNm/m}^3\text{)} = \frac{N \times H \times m \times g \times C}{V}$$

Où :

N : est le nombre total de coups ;

H : est la hauteur de chute de la dame ;

m : est la masse de la dame utilisée ;

g : est l'accélération de la pesanteur ;

V : est le volume du matériau compacté dans le moule ;

C : est le nombre de couches.

L'application numérique donne:  $N_1 = (3 \times 25)/2 = 37$  coups et il reste un coup. Il est rajouté à la deuxième couche.

On utilise la même méthode de calcul pour le compactage à une seule couche. On illustre les résultats de nombre de coups, pour chaque nombre de couches, dans le tableau VI.01.

Tableau VI.01 : Synthèse de calcul du nombre de coups de dame

| L'énergie utilisée | Nombre de couches | Nombre de coups |
|--------------------|-------------------|-----------------|
| Proctor standard   | Une couche        | 75              |
|                    | Deux couches      | 37              |
|                    | trois couches     | 25              |
| Proctor modifié    | 5 couches         | 56              |

On réalise dans ce travail les compactages suivants :

- ✓ En une seule couche à l'énergie Proctor normal.
- ✓ En deux couches à l'énergie Proctor normal.
- ✓ En trois couches à l'énergie Proctor normal.
- ✓ En cinq couches à l'énergie Proctor modifiée.

#### 4.1.3 Compactage avec le marteau vibrant

C'est un compactage par vibration en utilisant le marteau vibrant (figure VI.06). Le marteau vibrant utilisé est de marque KANGO 750K/750S, il est fabriqué en Angleterre.

Selon la fiche technique, il a les caractéristiques suivantes :

- ✓ Puissance consommée : 800W.
- ✓ Fréquence variable entre 20 à 50 Hz.
- ✓ Vitesse (tr/min) : 400tr/min
- ✓ Taux de percussion : 3100/min.
- ✓ Energie de fusion : 6,8J
- ✓ Poids : 6,8 kg
- ✓ Capacité de perçage : 38mm dia max.

- ✓ (Foret aléreur) : 90mm dia max.

Le marteau a un piston qui bouge d'une manière alternative ; de diamètre 80mm et d'épaisseur 40mm



Figure VI.06 : Le marteau vibrant et son piston dans leur valise

#### ✓ **Compactage dans le moule Proctor**

On a utilisé le marteau vibrant avec la haute fréquence 50Hz, pour le compactage en une seule couche, dans le moule Proctor. La préparation du matériau se fait selon la norme NF P 94-093.

La littérature, ne donne pas une formule ou une méthode pour évaluer l'énergie de compactage par le marteau vibrant. Pour cela on cherché à recréer les conditions de densité obtenues par l'essai de compactage d'une seule couche compactée dans le moule Proctor à l'énergie Proctor normal.

Ceci est réalisé par le contrôle de la masse et le volume du sol dans le moule ; le volume est contrôlé par la mesure de tassement, à l'aide d'une règle métallique.

#### ✓ **Compactage dans la fosse**

Le compactage vibratoire en une seule couche avec la haute fréquence (50Hz) est réalisé, dans une fosse de dimensions (40x40x30 cm).

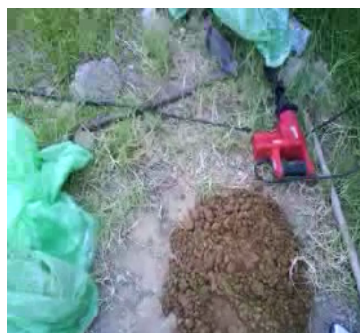
#### ✓ **La détermination des caractéristiques de la fosse**

Une réflexion a été menée sur les conditions de réalisation de cette fosse. Au début, on a pensé à compacter et déterminer le profil de densité, dans une cuvette métallique. Les

dimensions de la surface de la cuvette, ne sont pas convenables pour que la base du gammadensimètre repose dessus, un autre coté les parois métalliques de la cuvette peuvent réfléchir les rayons gammas, ce qui va perturber les mesures du gammadensimètre. On a pensé alors à la réalisation d'un trou avec des parois de béton. Mais il y a toujours l'effet des parois rigides qui peut perturber les résultats en plus des difficultés de la réalisation de ce trou (un grand trou avec une quantité de béton importante).

Finalement, on a opté pour la réalisation d'un trou de (40x40x30 cm) creusé dans la terre. Les dimensions de surface (40x40 cm), sont suffisantes pour recevoir la base de gammadensimètre (37x21) cm et nous permettre de prendre les mesures au milieu de chaque coté de trou.

Le gammadensimètre peut donner des mesures, jusqu'à une profondeur de 30cm et en plus l'erreur de la mesure due aux effets du bord, devient minime (voir la bibliographie chapitre IV la partie gammadensimètre). Le compactage est réalisé selon les étapes illustrées dans figure VI.07.



① La réalisation du trou et le compactage de son fond

② Remplissage du trou par le sol

③ Compactage du sol dans la fosse

Figure VI.07 : Les étapes de compactage dans la fosse.

#### 4.2 Les essais CBR

On réalise deux séries d'essais CBR, l'une avec des échantillons conservés à la température ambiante et l'autre avec des échantillons conservés dans l'étuve à une température de 105°C. On a réalisé des essais CBR immédiat, même si l'essai n'a pas été réalisé après le compactage du sol, mais 5 jours après, pour assurer la stabilisation de

l'évaporation (pour la série une mise à 105°C) et conservé dans les même conditions pour la deuxième série (conservé à la température ambiante).

### 4.3 Procédures de détermination du profil de densité

#### 4.3.1 Recherche de la méthode adéquate pour la mesure du profil de densité

Pour mesurer les profils de densité manuellement, on a testé plusieurs méthodes afin d'arrêter la bonne. Les tentatives ont été faites sur des essais Proctor de types modifiés. La difficulté se pose aux matériaux compactés à faibles teneurs en eau où il n'y a pas une cohésion suffisante (0%,1%,...,6%), pour découper des échantillons. On a travaillé à la recherche d'une méthode fiable. On a essayé plusieurs méthodes (plus de 9 méthodes) parmi lesquelles on va citer les plus importantes.

#### ✓ La méthode basée sur l'utilisation de la carotteuse manuelle

On dispose le moule Proctor sous la carotteuse manuelle, on commence à tourner le volant afin que la carotte s'insère lentement dans le moule (figure VI.08).



① Carotteuse manuelle



② L'enfoncement de la Carotteuse



③ Récupération de la carotte



④ La carotte est découpée en petites tranches



⑤ La mesure de l'épaisseur de chaque tranche



⑥ La mesure du poids de chaque tranche

Figure VI.08 : Méthode de la mesure des profils de densité et de teneur en eau à l'aide de la carotteuse manuelle

Malheureusement, avec cette méthode, on n'est pas parvenu à sortir des carottes pour les faibles teneurs en eau parce que dans ces situations, la cohésion du sol est insuffisante.

Il est évident que parce que cette méthode n'est pas valable que dans le cas des teneurs en eau importantes, elle a été abandonnée.

✓ **La méthode de la séparation des couches à l'aide des disques en nylon et l'enfoncement de l'anneau**

On utilise un moule démoulable et on sépare les cinq couches compactées avec un disque de nylon ; on démoule le moule puis, on enfonce un anneau dans la couche en même temps qu'on élimine le sol latéralement, en utilisant une spatule (figure VI.09). Le volume et la masse de l'anneau étant connus, il reste à déterminer la masse totale humide, on enlève l'anneau avec la feuille de disque plastique et on le met dans un bac taré puis on fait le surfaçage.



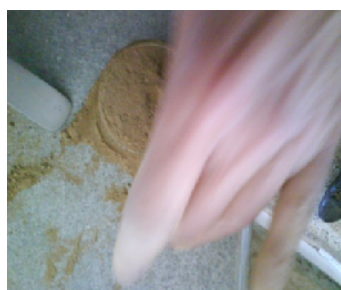
① Couches compactées et séparées à l'aide du polyen



② L'enfoncement de l'anneau et l'enlèvement du matériau latéral



③ Le surfaçage de l'anneau enfoncé



④ Le déplacement de l'anneau à un bac

Figure VI.09 : Différentes étapes de l'enfoncement de l'anneau

L'inconvénient de ce procédé réside dans le fait qu'on modifie la granulométrie de sol au moment de surfacage par l'ajout des fines et des pertes de matériau pendant le transport de sol vers le bac pour le peser. L'échantillon se déforme beaucoup pendant la manipulation.

En plus, d'autres méthodes sont testées, comme, la méthode de paraffinage, la méthode de détermination des caractéristiques de chaque couche juste après son compactage et bien d'autres. Ces méthodes n'ont été pas concluantes et ont du être abandonnées.

### 4.3.2 Méthode de détermination du profil de densité retenue

#### ✓ Méthode manuelle

On utilise un outil pour démouler le matériau compacté, par petites tranches ; l'épaisseur de chaque tranche varie entre 9 et 16 mm. Les étapes sont illustrées dans la figure VI.10.



① On dispose le moule compacté sur l'outil de démoulage



② On met une boîte de carton, et on scelle la zone de contact



③ On remonte une tranche avec le cric hydraulique



④ Avec une règle métallique on mesure l'épaisseur de la tranche



⑤ On enlève la couche et on fait le surfacage avec la règle à araser



⑥ On prend la boîte en carton et on récupère le matériau pour le peser

Figure VI.10 : Etapes de détermination manuelle du profil de densité

De chaque tranche récupérée, on prend une quantité de matériau pour mesurer la teneur en eau. Pour déterminer la densité sèche de chaque tranche ; on a son volume (l'épaisseur de la tranche) et de la masse humide de chaque tranche.

### ✓ Le gammadensimètre

C'est un matériel qui se base sur le même principe que le banc gamma. Il est utilisé pour la détermination du profil de densité du sol compacté dans la fosse. C'est un appareil qui permet de mesurer avec rapidité et une certaine précision, la teneur en eau, la densité sèche, la compacité et la densité humide d'un sol, enrobé bitumineux, béton..., à différentes profondeurs. Quelques caractéristiques mécaniques de Troxler gammadensimètre :

- ✓ Dimensions (sans poignée) : 366x225x183 mm
- ✓ Le poids 13kg
- ✓ Température d'exploitation Ambiante : -10 à 70°C
- ✓ Température de stockage : -55 à 85°C

Le gammadensimètre Troxler, peut fonctionner selon deux modes différents :

- ✓ Mode en transmission directe (Figure VI.11.a) (la "tige porte-source" contenant la source radioactive pénètre alors le matériau à analyser), il est utilisé en profondeur.
- ✓ Mode par rétrodiffusion (Figure VI.11.b), il est utilisé en surface.

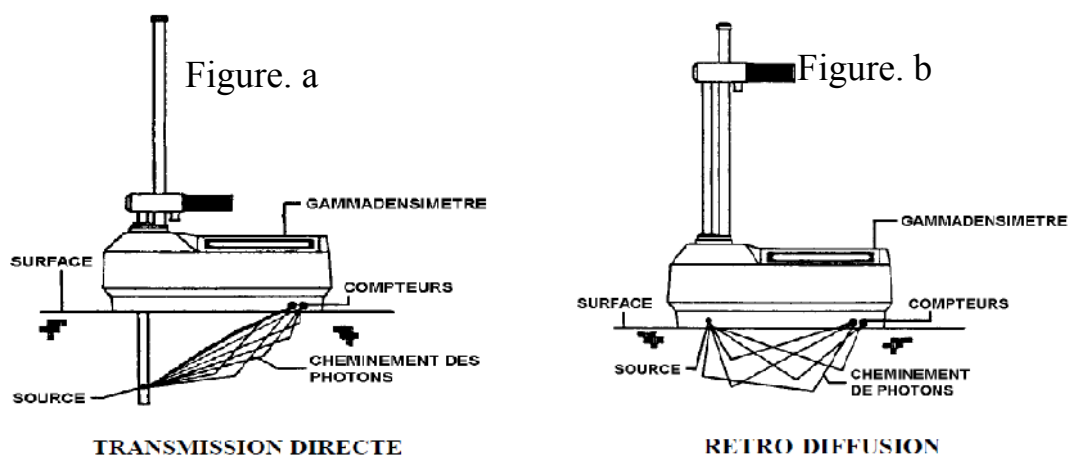


Figure VI.11 : Le mécanisme de lecture au gammadensimètre

Le gammadensimètre Troxler, peut mesurer la teneur en hydrogène (et par conséquent la teneur en eau) d'un matériau, grâce à sa source neutron. Il est destiné à mesurer les densités dans la gamme de 1,100 à 2,700 kg/m<sup>3</sup> et pour prendre des mesures au-delà de cette gamme on doit procéder à un étalonnage spécial.

Les accessoires de gammadensimètre (figure VI.12)

- ✓ Extracteur : il aide à tirer la tige après son enfoncement.
- ✓ Bloc de référence : lorsqu'on fait l'étalonnage, on laisse le gammadensimètre reposer sur cette plaque.



Extracteur



Bloc de référence



Marteau, tige de perçage, grattoir/ guide de perçage

Figure VI.12: Accessoires du gammadensimètre.

- ✓ Marteau : Pour enfoncer la tige.
- ✓ Tige de perçage : pour réaliser le trou.
- ✓ Grattoir : pour guider la tige pendant son perçage.

La mesure avec le gammadensimètre :

La figure 13.VI présente les différentes étapes de la mesure.

Le gammadensimètre donne des lectures, en surface, et à chaque 5 cm, jusqu'à une profondeur de 30 cm.

- ✓ Par la disposition des points du profil de densité mesurés par rapport à la courbe Proctor complète (le profil fait en cinq couches) on vérifie la fiabilité des

mesures. Il s'agit de rassembler les points dans le même graphe et voir si la courbe Proctor complète passe quelque peu au milieu de ces points.



① **L'étalonnage** : on allume et on met le gammadensimètre sur le bloc de référence pendant 15 mn.



② **La réalisation du trou** : avec la tige, le marteau, et le grattoir on réalise un trou où on enfonce la tige de lecture du gammadensimètre



③ **récupération de la tige** : On tire la tige avec l'extracteur



④ **La lecture** : on enfonce la poignée de gammadensimètre jusqu'à la profondeur voulue et on fait la lecture

Figure VI.13: Etapes à effectuer pour la lecture sur le gammadensimètre

### 4.3.3 Observation des échantillons au microscope optique

#### Le microscope utilisé :

C'est un microscope optique de marque MOTIC. MOTIC est capable d'agrandir l'objet examiner jusqu'à 50 fois, on relie ce microscope à l'ordinateur et on utilise avec un logiciel appelé «Uleadvideostudio» pour visualiser les objets sur ordinateur passés sous l'appareil (figure VI.14).

Le logiciel utilisé :

Uleadvideostudio : permet d'éditer des vidéos et de réaliser des montages de qualité. On a fait passer des échantillons compactés à l'essai Proctor modifié, aux teneurs en eau supérieures à 8%, On n'a pas réussi faire passer des échantillons plus secs (des teneurs en eau inférieures à 8%). par ce que le matériau n'a pas la cohésion suffisante pour tenir la manipulation.

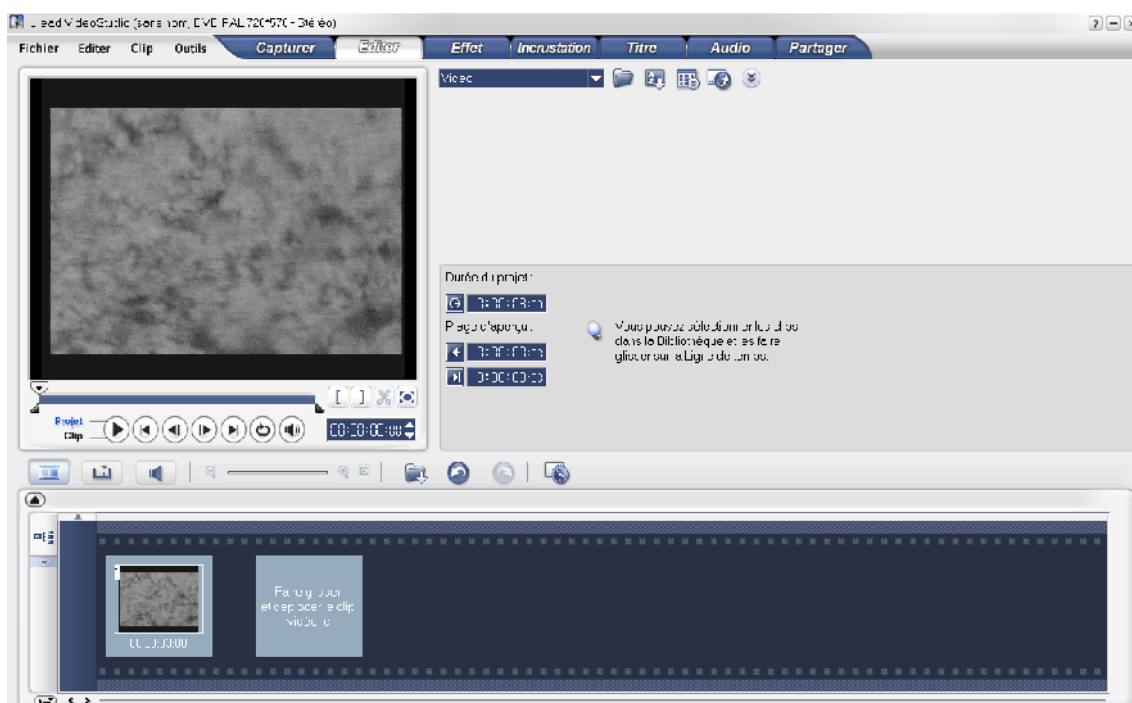


Figure VI.14: L'interface de logiciel « Uleadvideostudio »

#### 4.3.4 Mesure de la vitesse de propagation des ondes ultrasonores

Le but de ces essais est d'avoir une idée sur la distribution porale du sol compacté. C'est un instrument ultrasonique, conçu pour mesurer la vitesse d'impulsions émises par le matériel, afin d'obtenir l'uniformité ou la résistance du béton ou d'un matériau.

C'est un appareil à affichage digital LCD avec mémoire non volatile de 250 mesures, 2 transducteurs (le premier est un émetteur et le deuxième est un récepteur) de 54 kHz, barre d'étalonnage, pâte d'accouplement, dans un coffret de transport. Pour calculer la vitesse de l'onde on mesure le temps de transmission de l'onde dans l'échantillon (la figure VI.15-3).

On a préparé une série compactée à différentes teneur en eau où on a mesuré la vitesse de propagation immédiatement après le compactage. Deux autres séries sont faites après la conservation des spécimens dans leurs moules pendant 24<sup>h</sup>, pour vérifier est ce-que la relaxation du matériau a une influence sur les résultats trouvés. On donne dans la figure VI.15 les étapes de mesure avec cet appareil.



① Préparation de l'échantillon pour le compactage      ② Conservation de l'échantillon après le compactage durant 24h      ③ Prise de la mesure avec l'appareil à ultrasons

Figure VI.15 : Etapes de mesure de la vitesse propagation des ondes

#### 4.3.5 Essais de mesure de la succion

Afin de déterminer l'influence possible de la succion, sur le compactage du sol et la participation de la rétention d'eau au compactage de sol, on a réalisé des mesures de la succion au sein du sol compacté. On veut déterminer en quelques sortes la courbe de rétention de sol compacté allant de 0% de teneur en eau rajouté jusqu'à une teneur en eau importante. En faisant le parallèle de cette courbe avec la courbe Proctor, on tentera de trouver une explication de la participation de l'eau à la compactibilité de sol. Pour déterminer la succion, il existe plusieurs méthodes. On a utilisé dans ce travail, la technique du papier filtre. L'essai est réalisé selon la norme anglaise D 5298 – 03. On a utilisé le papier filtre Whatman 42, pour lequel, il existe des courbes d'étalonnage dans les normes.

Pour des raisons de similitude des conditions de recherche et pour atteindre le but cité précédemment, on compacte le sol en deux couches dans le moule Proctor en appliquant l'énergie normale. Entre les deux couches on met des étuis préparés en papier filtre et à

l'intérieur de l'étui on place aussi un autre papier filtre destiné à la mesure de la succion, avant de mettre l'étui dans le sol entre les deux couches. Le papier central est passé à l'étuve pendant 24h ensuite il est pesé avec une balance de précision 1/1000 g (figure VI.16).



① Des étuis préparés

② La pesée des étuis

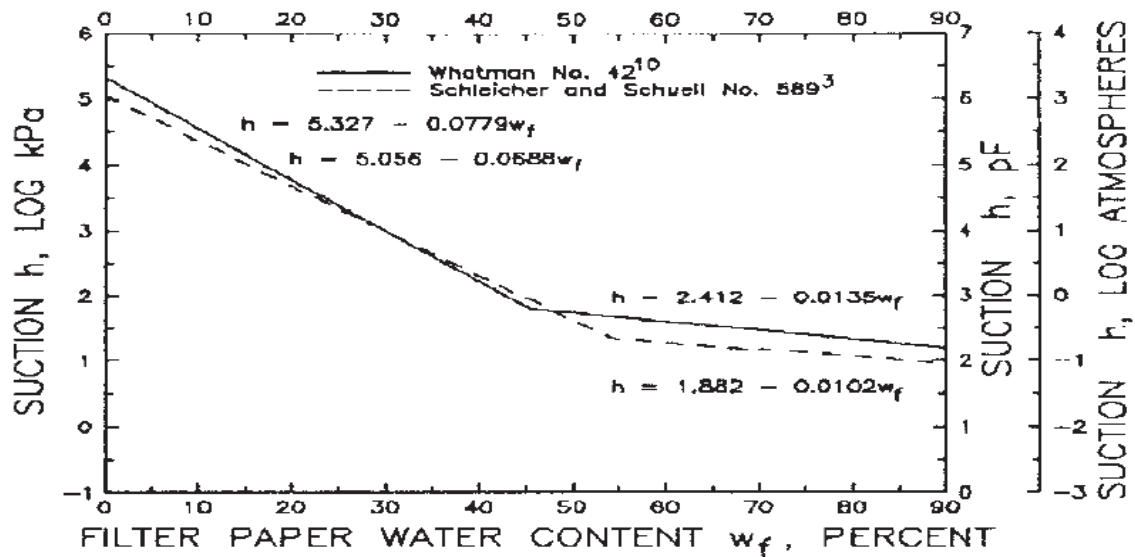
③ Un étui à l'intérieur du moule

Figure VI.16 : Etapes de la méthode de mesure avec le papier filtre

Les moules compactés (cités précédemment) sont conservés par la suite à une température constante à l'ombre à l'intérieur d'une enceinte thermique pendant 10 jours, pour stabilisation de la succion. Après 10 jours, on pèse le papier filtre qui est conservé à l'intérieur de l'étui pour déterminer la teneur en eau du papier.

A partir de la teneur en eau du papier on trouve la succion à l'aide de la projection sur la courbe d'étalonnage (figure VI.17) de papier filtre utilisé.

Lorsqu'on enlève le papier filtre, on enlève une quantité de sol qui se situe autour du papier pour mesurer la teneur en eau du sol.



NOTE 1—Coefficient of determination  $r > 0.99$ .

Figure VI.17 : Courbe de mouillage de la courbe d'étalonnage du papier filtre (ASTM D5298)  
 À l'aide de la teneur en eau du papier et avec la projection sur le graphe précédent, on mesure la suction. On trace le graphe suction en fonction de la teneur en eau sol pour définir la courbe de rétention (figure VI.18).

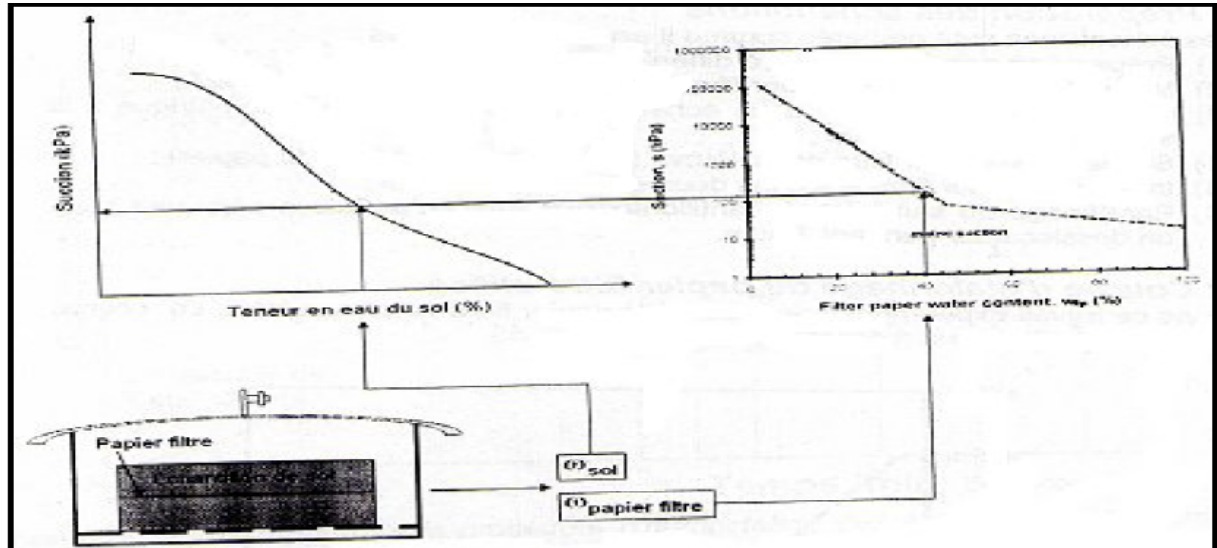


Figure VI.18: Schématisation de la procédure expérimentale de la mesure de la suction par papier filtre (Ramdane, 2007)

### 5. Synthèse du programme expérimental

Pour clarifier la consistance du programme expérimental, on synthétise dans le tableau VI.02, les différents essais effectués dans le cadre de cette étude.

Tableau VI.02 : Synthèse des essais effectués dans le programme expérimental

| <b>Les essais d'identifications</b> |                             |                              |                 |                                 |                           |                      |                             |  |
|-------------------------------------|-----------------------------|------------------------------|-----------------|---------------------------------|---------------------------|----------------------|-----------------------------|--|
| L'analyse granulométrique           | L'analyse sédimentométrique | Les limites de consistances  |                 | La valeur au bleu méthylène VBS |                           | Equivalent de sable  |                             |  |
| 1                                   | 1                           | +2                           |                 | 2                               |                           | 1                    |                             |  |
| <b>compactage</b>                   | <b>Compactage classique</b> | <b>Les essais d'analyses</b> |                 |                                 |                           |                      | <b>Essais de résistance</b> |  |
|                                     |                             | Profil de densité            |                 | Essais ultrasoniques            | Observation au microscope | Essais de la succion | Les essais CBR              |  |
|                                     |                             | Manuel                       | Avec le Troxler |                                 |                           |                      |                             |  |
| Une couche                          | /                           | +3                           | 3               | /                               | /                         | /                    | /                           |  |
| Deux couches                        | /                           | +14                          | /               | 9+10+10=29                      | /                         | +9                   | /                           |  |
| Trois couches                       | +20                         | /                            | /               | /                               | /                         | /                    | /                           |  |
| Cinq couches                        | +12                         | +12                          | /               | /                               | 4                         | /                    | 6                           |  |

**Note :** les essais de compactage sont réalisés à l'énergie Proctor normal, sauf les cinq couches sont compactées à l'énergie modifiée.

## Chapitre VII

### Résultats et Discussions

#### 1. Introduction

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

On recherche aussi la compréhension de la forme de la courbe Proctor complète et des difficultés du compactage à faible teneur en eau. Pour ce faire on examine les profils de densité pour différentes configurations du compactage. On analyse les mesures à l'appareil à ultrasons, les mesures de la succion et de la résistance. À la lumière de la synthèse de tous ces résultats on tentera d'émettre quelques propositions pour améliorer le rendement du compactage à sec.

#### 2. Caractéristiques de compactage du sol étudié

On teste l'effet de l'énergie de compactage, l'effet du nombre de couches et l'effet de la taille du moule sur les caractéristiques de compactage du sol étudié.

##### 2.1 Effet de l'énergie de compactage

Le compactage du sol étudié selon les normes standards permet d'obtenir la courbe de la figure VII.1. Cette courbe présente un pic et demi (figure VII.1). La branche avant le pic s'appelle le versant sec et celle au-delà du pic s'appelle le versant humide. La courbe Proctor normale complète présente quant à elle deux bosses, comme indiqué dans la figure VII.2.

#### La courbe Proctor Modifié complète

La détermination de la courbe Proctor modifié complète, depuis une teneur en eau quasi nulle, jusqu'à des teneurs en eau importantes permet d'obtenir une courbe de forme différenciée, qui fait apparaître deux teneurs en eau caractéristiques (figure VII.1).

- ✓  $w_{op}$  : teneur en eau optimale traditionnelle qui correspond à une densité sèche optimale.
- ✓  $W_c$  : teneur en eau critique qui correspond à une densité sèche critique ; c'est la teneur en eau à partir laquelle  $\gamma_d$  croit lorsque la teneur en eau diminue.

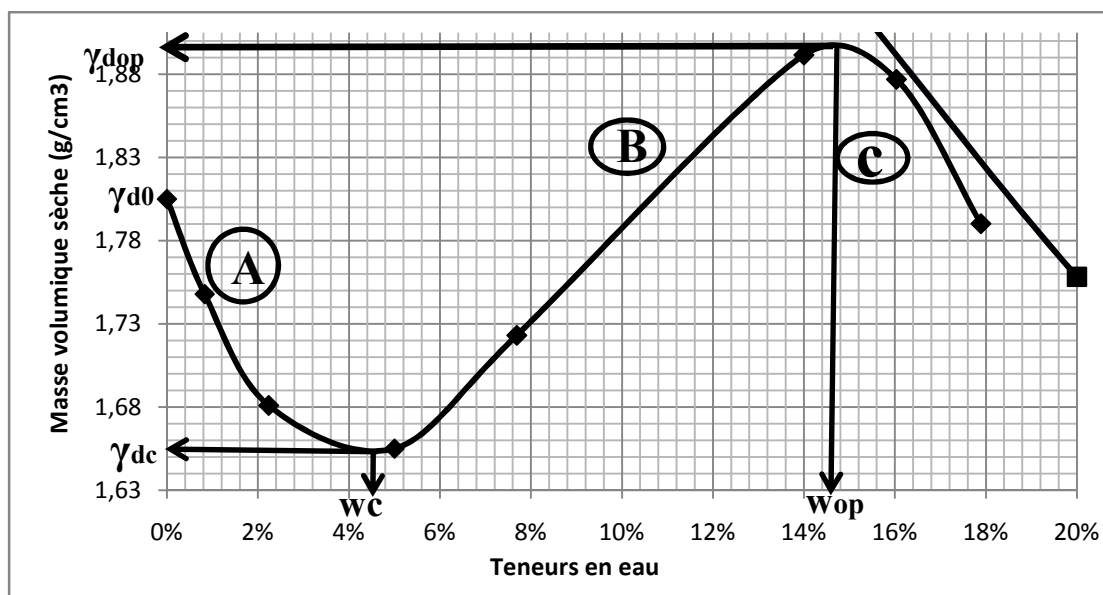


Figure VII.1 : Courbe Proctor modifiée complète du sol étudié

On remarque que, la densité sèche diminue à partir d'une teneur en eau quasi nulle, jusqu'à une teneur en eau critique (branche A). À partir de cette teneur en eau la densité augmente jusqu'à une teneur en eau optimale (branche B). Sur la branche C la densité sèche diminue lorsque la teneur en eau augmente.

### La courbe Proctor normale complète

Cette courbe présente deux sommets, elle fait apparaître trois teneurs en eau caractéristiques, telles que indiquées sur la figure VII. 02.

- ✓  $W_{opns}$  : teneur en eau optimale sèche, correspond à une densité sèche optimale dans les faibles teneurs en eau.
- ✓  $W_c$  : teneur en eau critique qui correspond à une densité sèche critique. C'est la densité la plus faible sur la courbe.
- ✓  $W_{opn}$  : teneur en eau optimale humide classique, qui correspond à une densité sèche optimale correspondant à la partie humide.

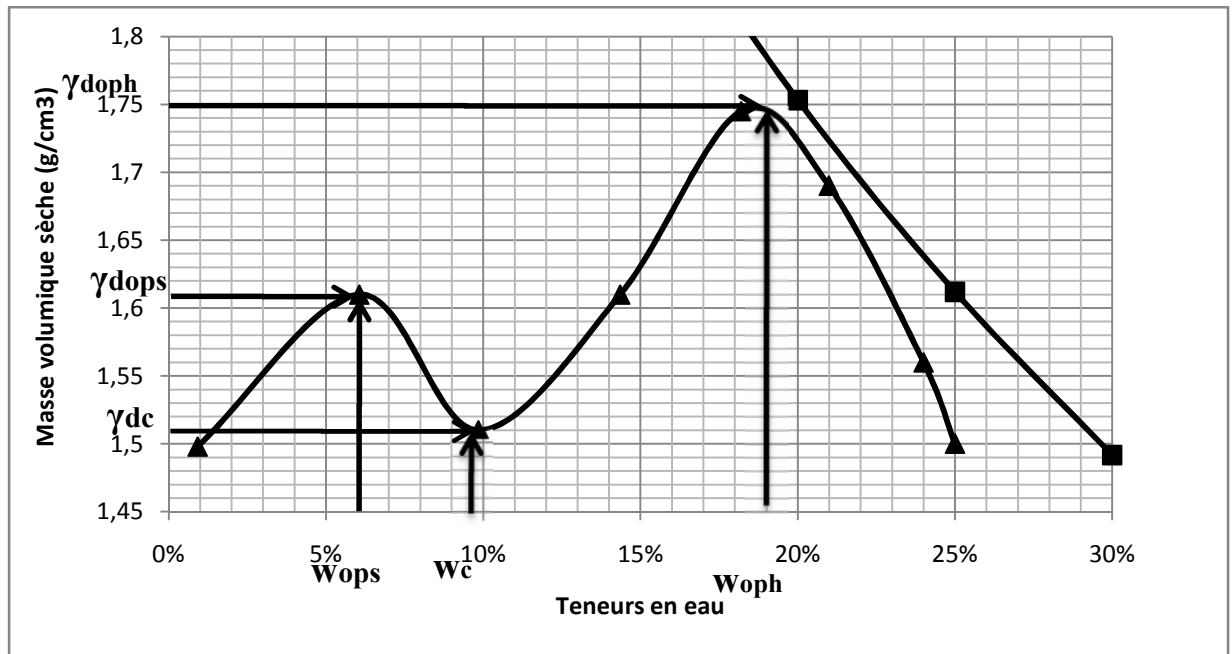


Figure VII.02 : Courbe Proctor normale complète.

On montre dans la figure VII.03, les deux courbes Proctor normal et Proctor modifié rassemblées et les courbes de saturations partielles correspondant à différents teneurs en air. L'observation de ces deux courbes permet de faire les remarques suivantes :

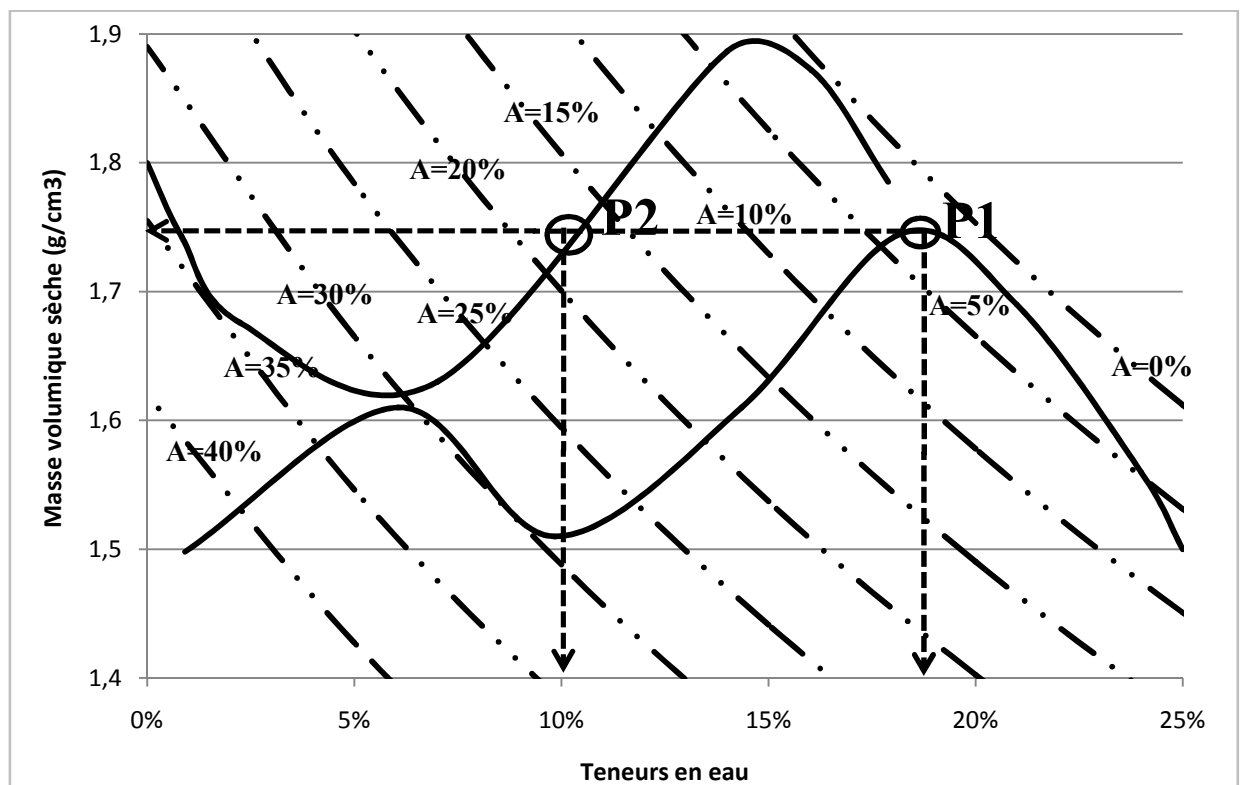


Figure VII.03 : Courbes Proctor modifié et standard avec les courbes de teneur en air

- ✓ Avec l'augmentation de l'énergie de compactage, la courbe Proctor se déplace vers le haut à gauche. Ce résultat déjà connu, dans la pratique de compactage, indique qu'il serait possible de réaliser des économies d'eau de compactage en augmentant l'énergie de compactage sur le terrain. Dans l'exemple présenté sur la figure VII.03 ; les points P1 et P2 ont la même densité sèche mais ne correspondent pas à la même énergie et teneur en eau. Autrement dit au point P2, on a obtenu la même densité qu'en P1. Dans ces conditions, on a augmenté l'énergie pour avoir un gain de 10% d'eau.
- ✓ Le compactage à faible teneur en eau, donne une bonne densité, mais la condition de la teneur en air inférieure à 5%, comme normalement stipulé dans les cahiers de charge n'est pas remplie. On pense que pour pouvoir considérer le compactage à faible teneur en eau la technique routière saharienne doit pouvoir déroger à cette condition de 5% de teneur en air. Pour pouvoir répondre scrupuleusement à cette condition  $A < 5\%$  (avoir la même teneur en air), on devrait compacter à une énergie importante qui est peut être irréalisable avec le même mode de compactage. Pour illustrer cette idée, on dessine sur la figure VII.04, les courbes Proctor complètes similaires, obtenues pour différentes énergies de compactage.

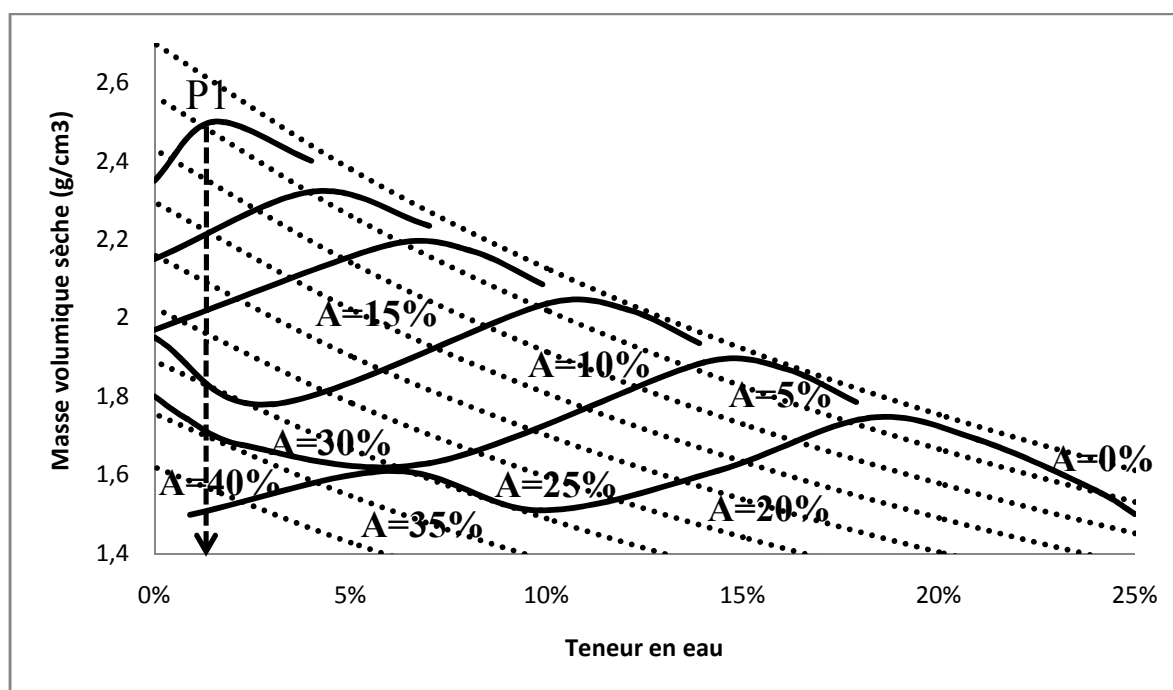


Figure VII.04 : Courbes Proctor complètes normal et modifié et courbes hypothétiques (imaginées) correspondant à différentes énergie de compactage

Pour compacter à une faible teneur en eau (1%) et remplir en même temps la condition de la teneur en air (inférieure à 5%), on devrait utiliser une énergie extrêmement importante capable de mener à la situation indiquée par le point P1 de la figure VII.04. Une opération tout à fait irréalisable dans la pratique avec le mode de compactage. Il est clair que l'augmentation de l'énergie peut être envisagée jusqu'à une limite qui correspond à la densité maxima que peut prendre le sol  $e_{min}$ .

## 2.2 L'effet de nombre de couches

Augmenter le nombre de couches compactées dans un moule, réduit l'épaisseur de chaque couche compactée. Il est attendu que les caractéristiques de compactage varient aussi en fonction de nombre de couches compactées. Sur la figure VII.05, on trace les courbes de sol compacté à la même énergie Proctor normal. Dans une série, on compacte en trois couches pour la première série, en deux couches dans une deuxième série.

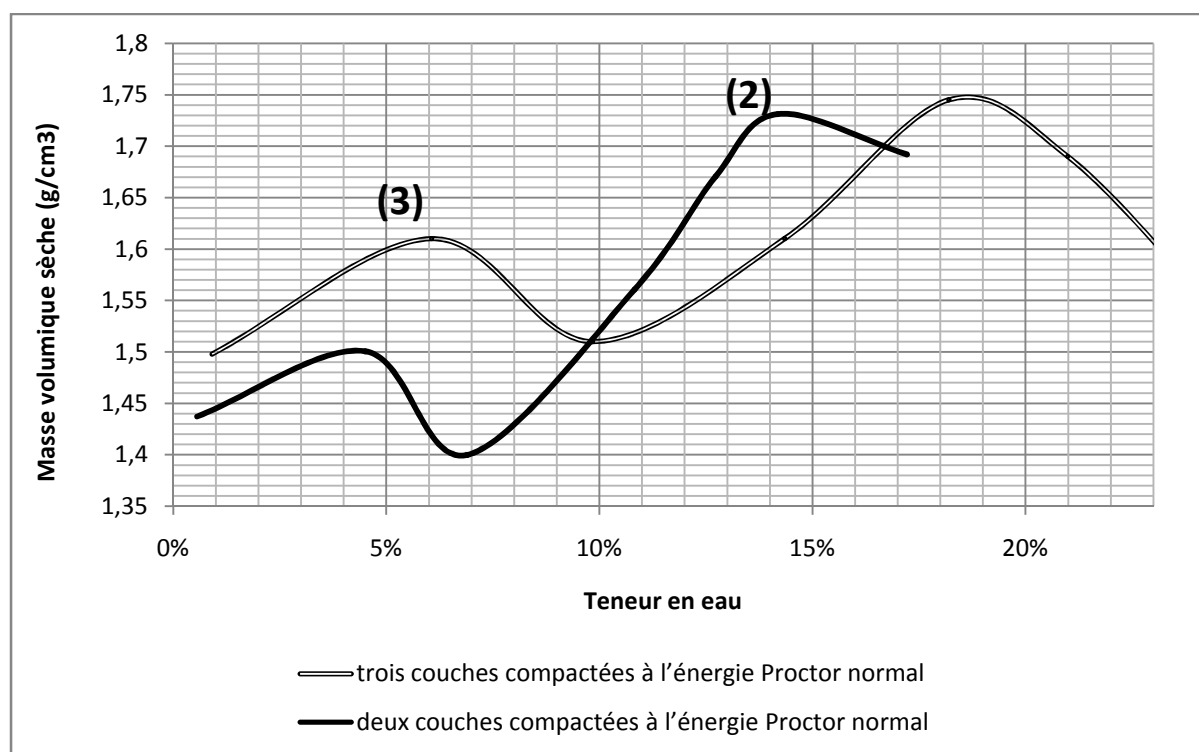


Figure VII.05 : Courbes de compactage à la même énergie avec différentes couches

L'observation rapide des deux courbes Proctor de la figure VII.05, fait ressortir que, pour une même énergie de compactage, augmenter le nombre de couches, (ou diminuer l'épaisseur des couches) influe sur les caractéristiques de compactage du sol. Augmenter le nombre de couche de 2 à 3, semble améliorer le compactage des sols, dans les faibles

teneurs en eau, et introduire par ailleurs une dépense supplémentaire en eau, dans le domaine des grandes teneurs en eau.

Réaliser des couches minces, permet d'obtenir des densités plus importantes, mais sur le terrain cela se fera au prix d'un temps d'exécution plus long. On donne dans la figure VII.06, les résultats de Coyle et West (1956), obtenus pour un sol argileux. Augmenter le nombre de couches (en réduisant l'épaisseur de chaque couche) donne une plus grande densité sèche maximum à une teneur en eau optimale moindre.

On note que le mouvement de l'optimum Proctor en haut et à gauche est à peu près le même pour une augmentation de 2 à 3 couches que pour une augmentation de 3 à 8 couches. Ce résultat est indicatif du fait que l'effet de la réduction de l'épaisseur de la couche compactée ne peut pas continuer à l'infini.

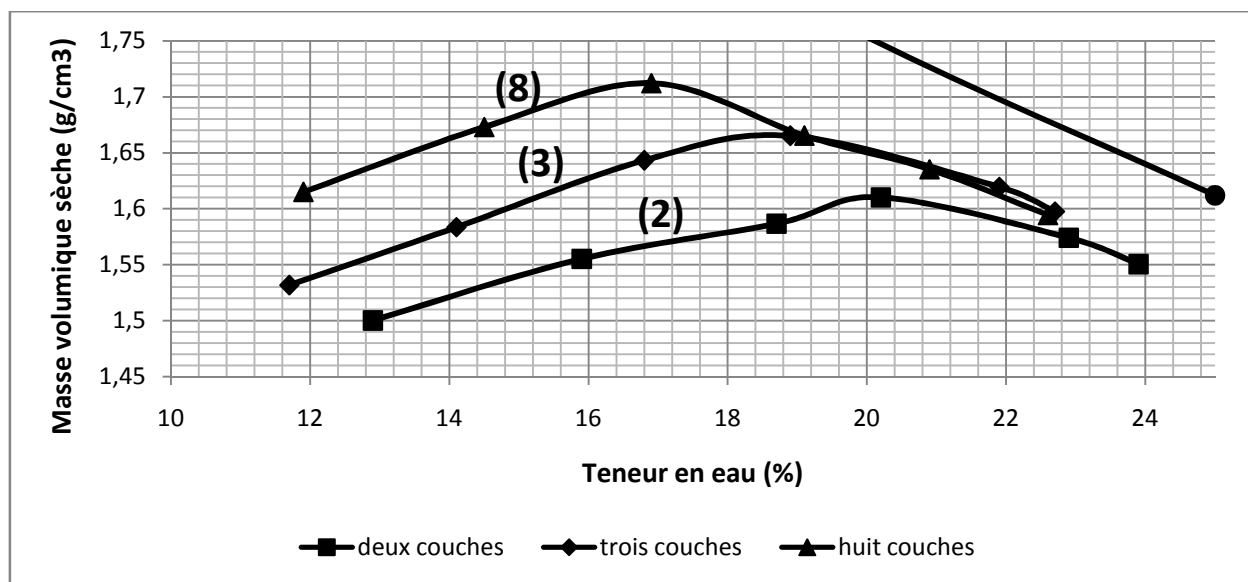


Figure VII.06 : Courbes de compactage pour différents nombres de couches à la même énergie de compactage (Coyle et West, 1956)

### 2.3 L'effet de la taille du moule sur les caractéristiques du compactage

On présente dans figure VII.07, une courbe hypothétique construite sur deux essais de compactage, réalisés dans le moule Proctor et une deuxième même courbe construite sur deux essais réalisés dans une fosse creusée dans le sol. Pour les deux cas le compactage a été réalisé avec le marteau vibrant.

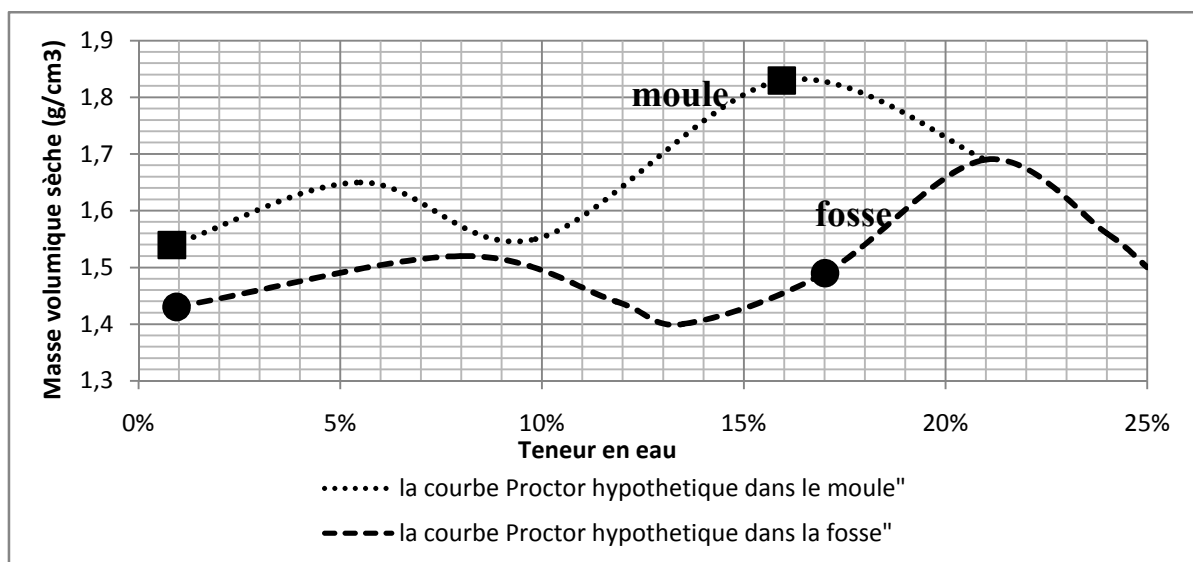


Figure VII.07 : Résultats de compactage dans le moule Proctor et dans la fosse avec le marteau vibrant. Si les compactages ont été réalisés à la même énergie, on peut remarquer une augmentation considérable de la densité sèche avec la réduction de la taille du moule. On peut expliquer ce résultat par le facteur  $Q/S$  utilisé pour identifier les compacteurs.  $Q$  : est le volume de sol compacté pendant un temps donné (par exemple un jour ou une heure), et  $S$  la surface balayée par le compacteur pendant le même temps. Plus ce facteur est important plus les densités obtenues seront faibles.

Pour le compactage dans la fosse ou dans le moule à l'aide du marteau vibrant, on a contrôlé la même énergie (énergie standard) par le contrôle des teneurs en eau d'imbibition et la quantité de matériau compacté.  $S$  étant le même dans les deux cas (moule, fosse), le facteur  $Q/S$  est plus important dans la fosse que dans le moule ce qui explique les résultats trouvés. A partir de là, on arrive à poser une question capitale : comment se projette le compactage qui se fait au laboratoire par les essais Proctor modifié et Proctor normal sur celui qui se réalise sur le terrain ?

On donne dans la figure VII.08, les résultats Coyle et West (1956), obtenus en compactant le sol dans deux moule de tailles différentes (2,5 " et 6") 6,35 cm et 15,24 cm. Les résultats indiquent un mouvement de l'OPN vers le haut et vers la gauche avec augmentation de la taille du moule.

Les résultats de figure VII.08, sont en contradiction avec ceux exposés dans la figure VII.07. Coyle et West (1956) ont indiqué que normalement on doit trouver un

mouvement de l'OPN vers le bas et vers la droite avec l'augmentation de la taille moule (comme les résultats de la figure VII.07). Les résultats de ce test particulier dans lequel la taille moule augmente donné un mouvement inverse de l'OPN.

Coyle et West (1956) ont expliqué le mouvement de l'OPN vers le bas à la droite par une augmentation l'énergie totale plutôt que par l'augmentation de la taille moule. En effet, la variation de volume a été inversée, par la variation de l'énergie.

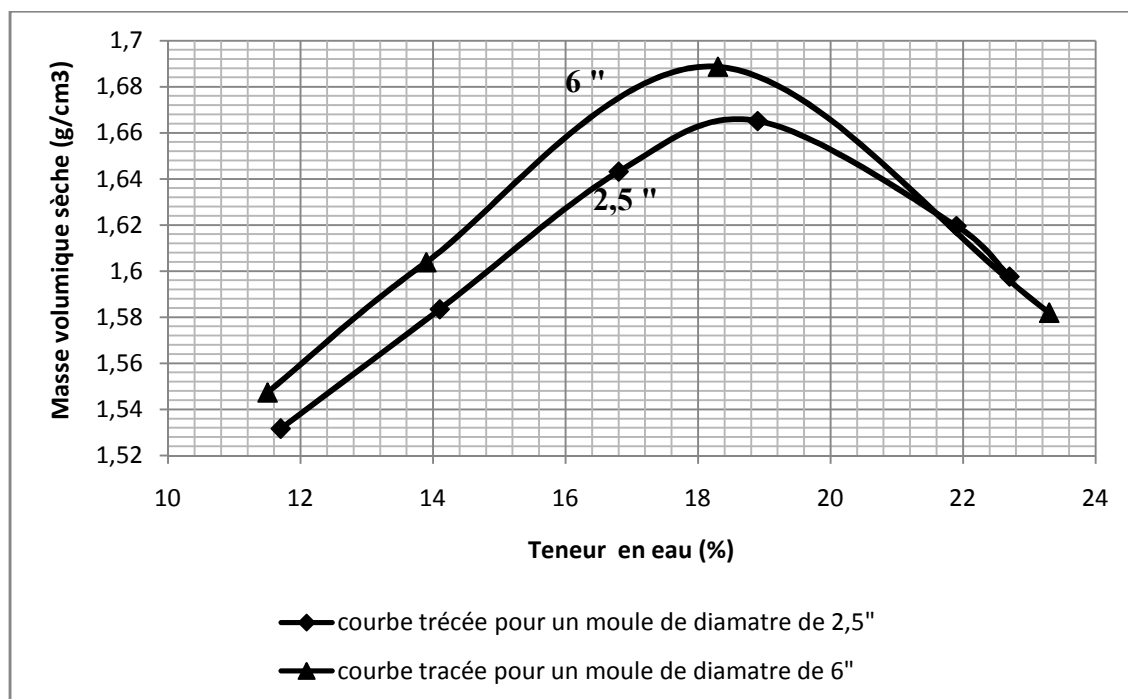


Figure VII.08 : Des courbes de compactage dans des moules de différentes tailles (Coyle et West, 1956)

### 3. Répartition de l'énergie de compactage dans le sol

Afin de mieux comprendre les résultats, qui vont être présentés ci-après. On donne quelques éléments d'information concernant la répartition de la densité sèche dans une couche compactée.

#### 3.1 Notions théoriques sur la variation de la densité en fonction de la profondeur (Morel et Arquie, 1988) dans une couche compactée

On compacte une couche épaisse et on mesure la variation de la densité sèche dans cette couche. La forme du graphe est celle de la figure VII.9.

La dérivée de la densité sèche par rapport à la profondeur (on dit couramment le gradient au lieu de la dérivée) est positif. Sur la zone AB d'épaisseur  $h_s$ . On l'appelle

zone de gradient inversé. Le gradient sur la zone BD est négatif qui s'appelle la zone normale car l'influence de compacteur diminue en fonction de la profondeur et l'épaisseur  $h_i$  et nettement supérieure à  $h_s$ . On constate parfois, mais rarement, que la zone AB n'existe pas et que l'on a un graphe comme celui de la figure VII.9 partie gauche. Mais il arrive aussi que ce soit la partie inférieure de la courbe qui fasse défaut et que l'on ait une représentation telle que celle de la figure VII.10-A.

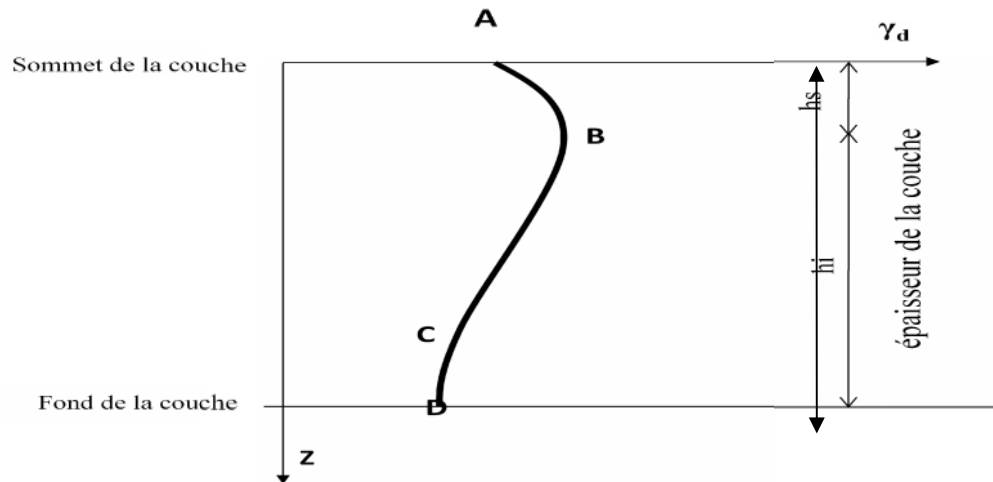


Figure VII.9 : Représentation graphique courante de la variation de la densité sèche en fonction de la profondeur d'une couche de sol compacté (Morel et Arquie, 1988)

Le deuxième cas est particulier, on le rencontre lorsque l'on compacte avec un engin puissant un matériau peu anguleux en très faible épaisseur.

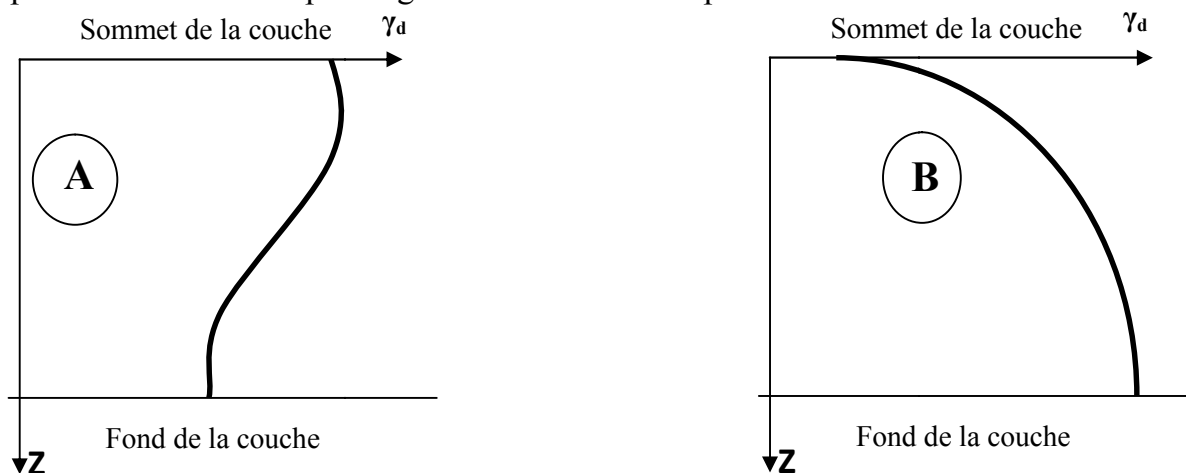


Figure VII.10 : Formes parfois rencontrées de la courbe de variation de  $\gamma_d$  en fonction de la profondeur dans la couche compactée

La zone de gradient positif est produite à cause des efforts tangentiels dus au mouvement des engins. Ces actions cisailent le terrain et le décompactent sur une faible profondeur.

Certains matériaux, qui ont peu de stabilité naturelle (sables homométriques à grains ou même graves peu anguleuses à granularité serrée) manifestent ce phénomène sur des épaisseurs plus grandes, si bien que l'on ne peut les compacter correctement.

Dans la figure VII.9, on voit apparaître un point d'inflexion, noté C sur la figure, puis, au voisinage du point D, une partie de la courbe dans laquelle la densité sèche varie peu.

Intuitivement, on comprend que l'efficacité de compacteur après avoir décro rapidement (partie BC de la courbe), ne décroît que lentement jusqu'à atteindre évidemment la densité sèche du matériau avant compactage.

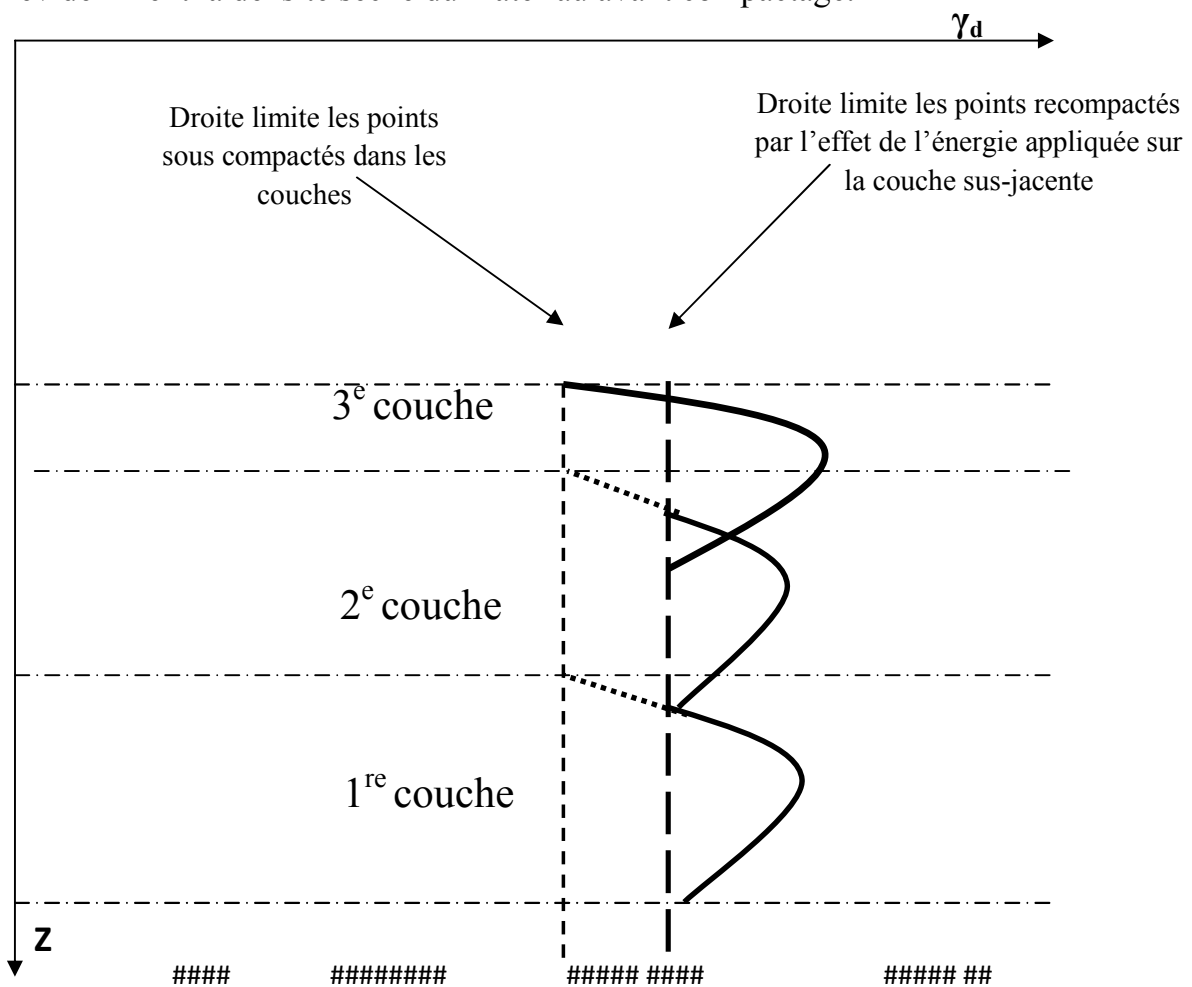


Figure VII.11 : Allure de la distribution des densités sèches sur un remblai compacté par couches

Mais on ne constate cette variation que si l'épaisseur de la couche est suffisante. Il arrive souvent, en pratique, que celle-ci est même trop faible pour atteindre le point C (qui se trouve ainsi au-dessous de la limite inférieure de la couche).

En compactant, un remblai par plusieurs couches, on peut dans certaines conditions obtenir le recomptage de la partie superficielle de la couche inférieure. On obtient finalement une densité sèche assez homogène (courbe en traits pleins figure VII.11) évitant le sous-compactage des parties en pointillés. Il reste néanmoins le problème pour la dernière couche. Bien entendu, un tel matériau ne peut pas être laissé en surface sous-compacté, il doit être couvert par un autre matériau ou recevoir un traitement approprié.

### **3.2 Profil de densité**

Par la suite, on illustre les courbes de profil de densité, pour des échantillons et des séries d'essais compactés par la dame Proctor et le marteau vibrant, dans le moule Proctor et la fosse.

#### **3.2.1 Fiabilité des résultats du profil de densité**

On a réalisé une première série de compactage en deux couches dans laquelle, on a extrait trois tranches à partir de chaque couche pour la mesure de la densité sèche. Malheureusement, il n'a pas été possible de construire des profils de densités fiables à partir des trois points de cette série.

On a alors décidé de réaliser une autre série, dans laquelle on a augmenté le nombre de points. Dans la série analysée dans cette section, on peut dire que les résultats sont valables ; car la densité sèche moyenne mesurée sur la base des tranches extraites et la densité sèche moyenne du moule complet sont proches.

On a réalisé aussi une troisième série où on a fait l'extraction de profil de densité dans le moule CBR, pas dans la couche, comme on a fait précédemment. On a vérifié la fiabilité de ces résultats, par disposition des points du profil de densité, par rapport à la courbe Proctor complète (figure VII.12). La courbe en ligne continue représente les densités moyennes du moule, les autres points sont les points de la variation de densité dans des tranches extraites du moule.

On remarque que les points correspondant aux densités des tranches prélevées, ne sont pas vraiment autour de la courbe moyenne, notamment sur la partie sèche de la courbe. Ce qui pourrait nous amener à penser que les résultats ne sont pas crédibles et bien

entendu donc la méthode utilisée pour la mesure de la densité dans cette série d'essai est remise en question.

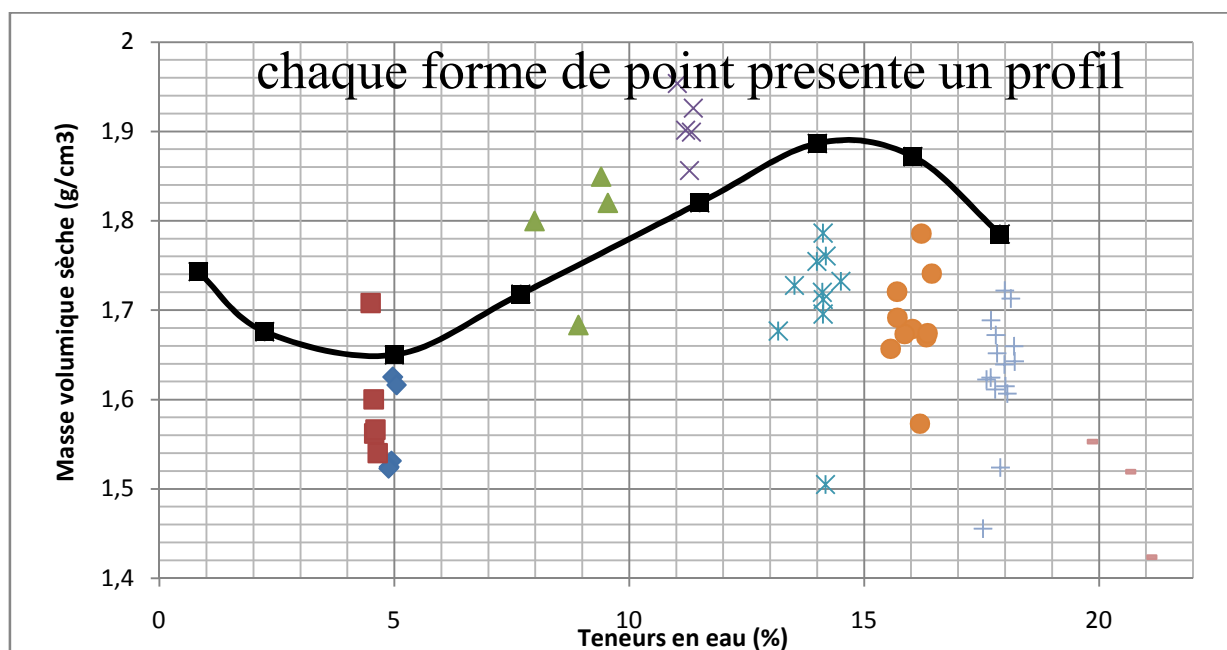


Figure VII.12 : Disposition des densités des points de profil de moule autour de la courbe Proctor modifiée

### 3.2.2 Profils de densité à sec et à l'OPN

On compare entre le compactage humide et le compactage à sec en termes de profils de densités.

#### 3.2.2.1 Profil de densité à sec et l'OPN par le compactage dynamique dans le moule

On réalise ces essais, pour deux teneurs en eau différentes (0%, 14%) correspondant respectivement aux états secs et près de l'OPN de sol.

##### ✓ Les résultats de profil de densité pour une seule couche compactée à sec

La teneur en eau de compactage est de 0,83%. Dans la figure VII.13, on présente le profil de densité d'une seule couche compactée à sec. On indique sur la figure VII.13 la densité moyenne avant l'extraction du profil de densité. Le calcul de la densité moyenne est une façon de vérifier, si les densités du profil sont autour de la moyenne. La densité moyenne calculée (la somme des densités de chaque couche divisée par le nombre des couches extraites), égale à  $1,53\text{g/cm}^3$ . Donc il n'y a pas une grande différence entre les deux moyennes, ce qui exprime la fiabilité des résultats obtenus.

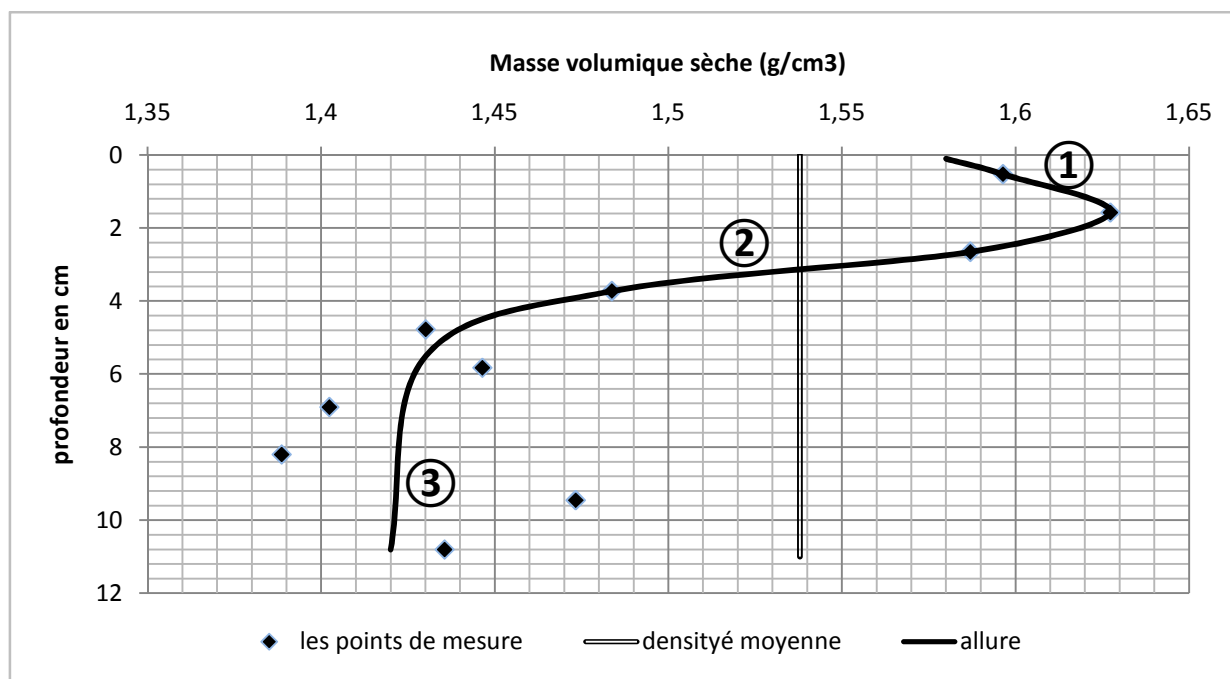


Figure VII.13 : Profil de densité d'une couche compactée à faible teneur en eau

Les résultats montrent que le profil de densité présente une allure qui fait apparaître, trois branches. Le profil appelle les remarques suivantes :

- ✓ La courbe présente une augmentation de la densité sèche pour les premiers centimètres branche ① jusqu'à 1,8 cm, où la densité sèche est maximum 1,63 g/cm<sup>3</sup>, par la suite, une diminution brusque jusqu'à une profondeur de 4,8 cm. Cette dernière branche est très accentuée. A partir d'une profondeur de 6 cm, la densité est globalement constante jusqu'au fond du moule (branche 3) la densité est de 1,42 g/cm<sup>3</sup>
- ✓ Le gradient de la densité est très accentué surtout sur la première et la deuxième branche.
- ✓ On peut dire aussi, que le profil a globalement la forme de la distribution de Boussinesq des contraintes dans le sol.

On peut expliquer le gradient inverse de la branche une, par le saut des grains pendant le compactage avec la dame (compactage dynamique) ainsi que probablement au poinçonnement de la dame dans le matériau provoqué par la contrainte de cisaillement. Sur le point où on compacte, il y a une augmentation de la densité, tout autour de la surface d'impact, il y a un décompactage du sol. Ce phénomène crée une certaine perte

d'énergie. Au point de densité max, à une profondeur, on peut dire que, les points ne sautent plus. A partir de ce point et sur la branche deux, la densité diminue considérablement.

Le début de la troisième branche, représente la fin de la zone d'influence du compactage. La densité est faible (autour de  $1,42 \text{ g/cm}^3$ ) et semble constante avec la profondeur. Pour ce compactage la zone d'influence semble être de 6 cm.

#### ✓ Les résultats de Profil de densité en une seule couche compactée à l'OPN

Pour ce compactage, la teneur en eau est 15,94%, la densité moyenne calculée avant de faire l'extraction du profil de densité, est égale à  $1,83 \text{ g/cm}^3$ . La densité moyenne calculée (la somme des densités de chaque couche divisé par le nombre des couches extraites), est égale à  $1,8 \text{ g/cm}^3$ . Pour ce profil, on trouve qu'il y a une petite différence entre les deux moyennes, de  $0,03 \text{ g/cm}^3$ . Ce qui exprime quelque peu la fiabilité des résultats obtenus. Sur la courbe de la figure VII.14, on remarque que le profil de densité présente un seul sommet, avec deux branches. L'allure présente une augmentation pour les premiers centimètres (jusqu'à 2,5 cm) où la densité sèche est maximum ( $1,87 \text{ g/cm}^3$ ).

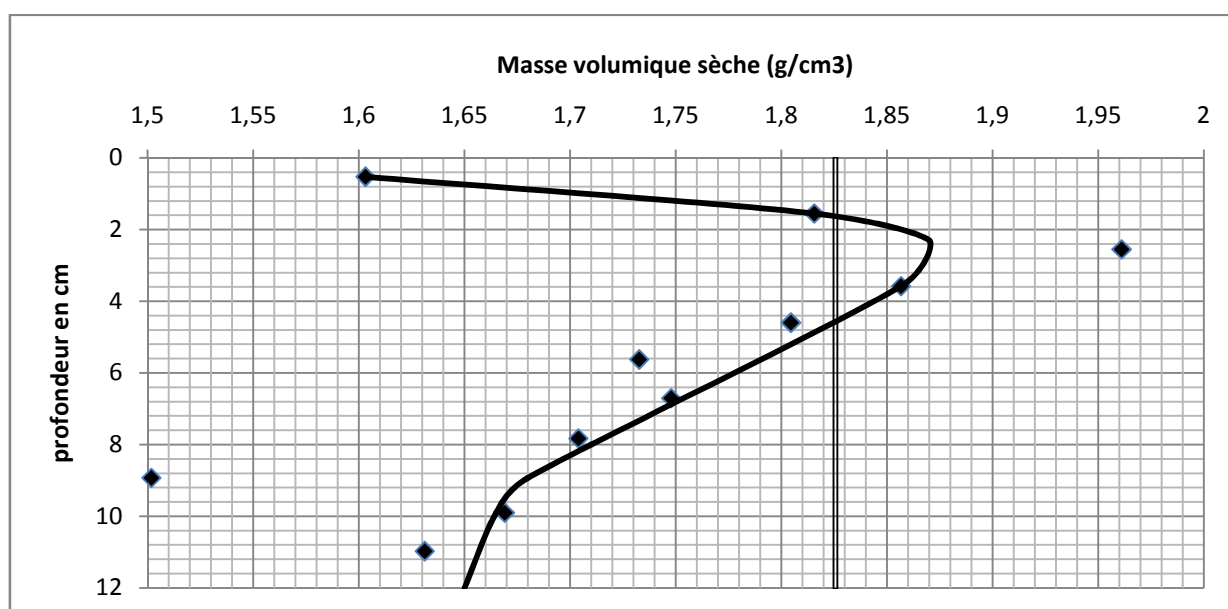


Figure VII.14 : Le profil de densité pour une couche compactée à l'OPN

La deuxième branche présente une diminution jusqu'au fond du moule. La diminution de la densité est plus importante sur la branche de surface que sur la branche du fond de

moule, car la pente de la première branche est égale à 20,73% et la pente de la deuxième branche est de 3,47%. La zone d'influence du compactage semble être de 9,2 cm.

### Comparaison des deux profils de densités

Si on compare les deux profils de densité compacté à sec et à l'OPN (Figure VII.15), on note les constatations suivantes :

- ✓ Il est apparent que l'influence de l'énergie pour le compactage à sec, s'arrête à une profondeur de 5cm, par contre au compactage humide l'énergie, continue à influencer plus au moins jusqu'au fond du moule.
- ✓ Le gradient de densité inversé en surface, est relativement plus important dans le compactage humide, que dans le compactage à sec.

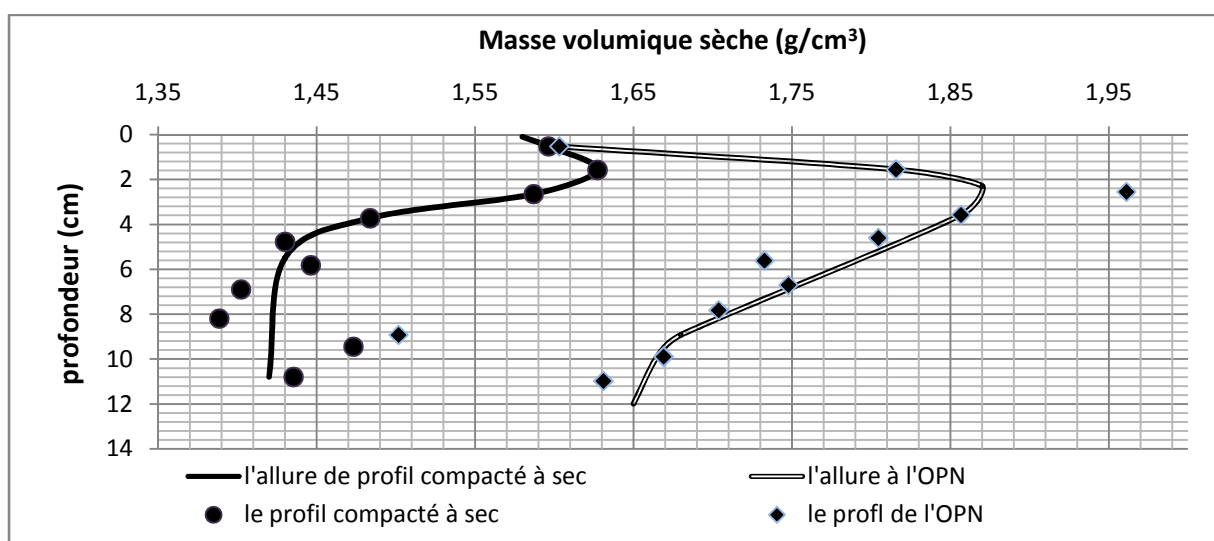


Figure VII.15 : Présentation de profil de la couche compactée à sec et de profil compactée à l'OPN

#### 3.2.2.2 Profil de densité à sec et l'OPN par le compactage par vibration dans la fosse

A la suite des essais de profil de densité, réalisés au laboratoire, on a effectué trois profils de densité dans une fosse creusée dans le sol ; un profil compacté à sec, un autre compacté à l'OPN. Le troisième profil, a été obtenu sur le même matériau compacté à l'OPN, après son exposition à l'ensoleillement pendant trois mois.

On rappelle que le gammadensimètre donne à chaque fois la densité moyenne d'une couche de 5 cm. Les points présentés sont au milieu de la tranche. C'est une hypothèse

pour tracer la courbe du profil de densité. Pour ce profil, le gammadensimètre n'a pas pu donner des mesures en surface et en profondeur.

Le profil obtenu a une forme de dos de tortue (Figure VII.16). Comme pour les résultats précédents, le profil présente une faible densité sèche en surface et une densité extrêmement faible au fond du trou. Le maximum de la densité, est au tiers de l'épaisseur de la couche. Il a une densité max de  $1,73 \text{ g/cm}^3$ . La teneur en eau de compactage est autour de 0,94%.

A partir du profil de teneur en eau, on voit que la teneur en eau est presque constante, sur toute la profondeur de la couche.

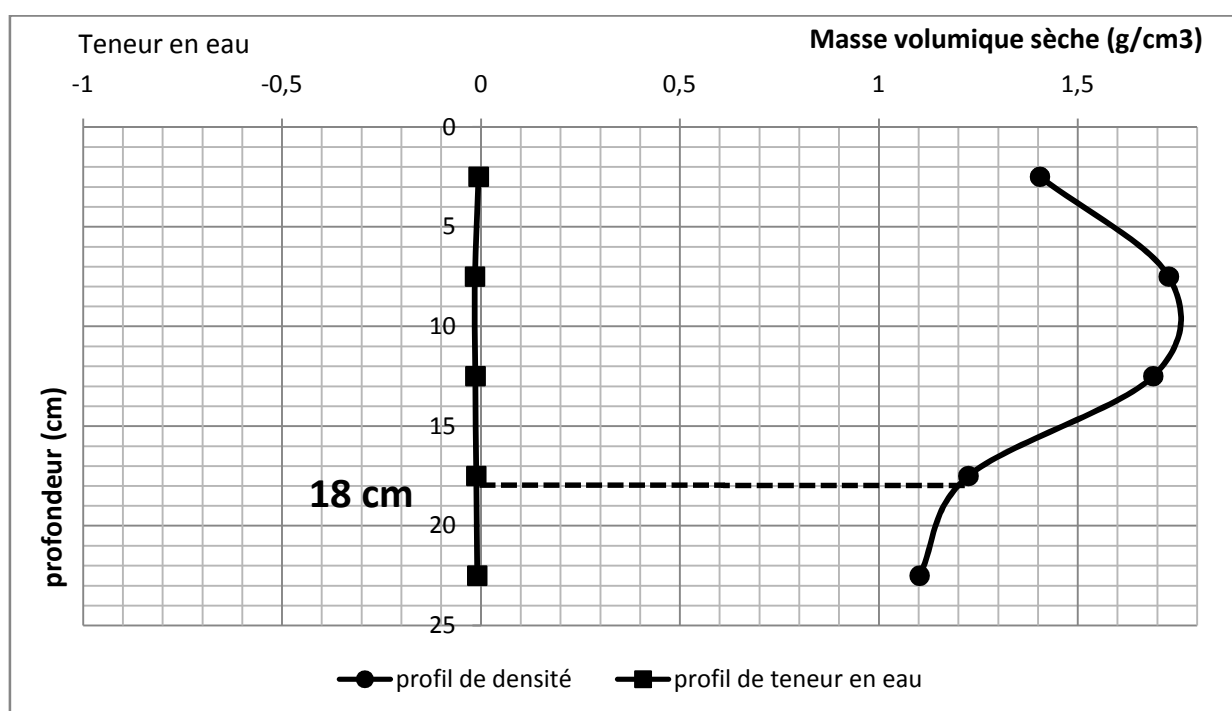


Figure VII.16 : Profil de densité et de teneur en eau dans la fosse d'un spécimen compacté à sec. La profondeur d'influence du compactage semble être de 18cm. Les densités obtenues sont appréciables ailleurs qu'au fond du trou.

Le compactage au marteau vibrant, donne des vibrations au matériau. Sur le point où on compacte avec le marteau vibrant il y a une densification. Sur les autres points, les grains du matériau vibrent, il y a un décompactage du matériau. Ce phénomène se produit dans les premiers centimètres.

### Compactage à la teneur en eau optimale dans la fosse

La figure VII.17 montre la courbe du profil dans la fosse. L'allure du profil a une forme de dos de tortue. Elle présente une faible densité sèche au fond du trou, le maximum de la densité est à 2,5cm de profondeur. Sa densité max de  $1,79 \text{ g/cm}^3$ . La teneur en eau de compactage est autour de 17%.

Le profil de teneur en eau est presque une droite, et le gradient de la teneur en eau (figure VII.17) présente une faible variation 0,04 le long de la profondeur.

On remarque que la zone de gradient inversé a disparu dans le profil. La profondeur d'influence du compactage semble se situer à 23 cm.

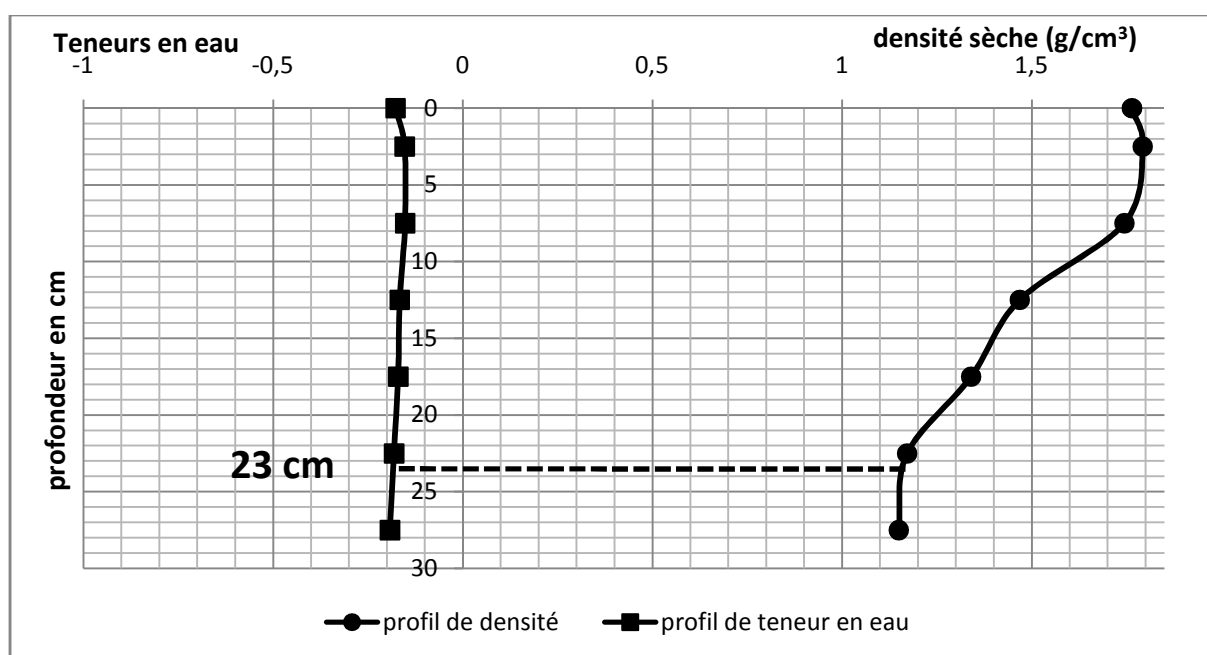


Figure VII.17 : Profil de densité et de teneur en eau dans la fosse d'un spécimen compacté à l'OPN.

### 3.2.3 Facteurs influant sur le profil de densité

#### 3.2.3.1 Résultat du compactage par vibration sur le profil de densité

Afin de comparer les caractéristiques du compactage à sec et celles du compactage humide à l'aide de marteau vibrant, on réalise le compactage d'une couche dans le moule avec le marteau vibrant. Comme précédemment, on a compacté un spécimen à l'OPN et un autre à sec.

En comparant les profils de densité de la figure VII.16 et VII.17, on remarque qu'ils sont plus au moins dans les mêmes niveaux de densité. On ne peut admettre que les deux essais ont été réalisés à la même énergie. Peut-on dans ce cas conclure que le compactage par vibration moins dépendant de la teneur en eau, comme l'est le compactage dynamique.

### ✓ Compactage à sec d'une couche par le marteau vibrant dans le moule Proctor

Afin de confirmer les résultats du compactage par vibration obtenu dans la fosse, on réalise les mêmes tests dans le moule Proctor normale.

La figure VII.18 montre la courbe de profil de densité pour le compactage à sec. La densité la plus faible est au fond du moule. La teneur en eau moyenne de compactage est de 0,63%. La densité moyenne calculée avant l'extraction du profil est de  $1,48 \text{ g/cm}^3$ . La densité moyenne calculée après l'extraction du profil est de  $1,55 \text{ g/cm}^3$ . Le calcul de ces densités moyennes; on voit qu'il y atteste quelque peu de la fiabilité des résultats.

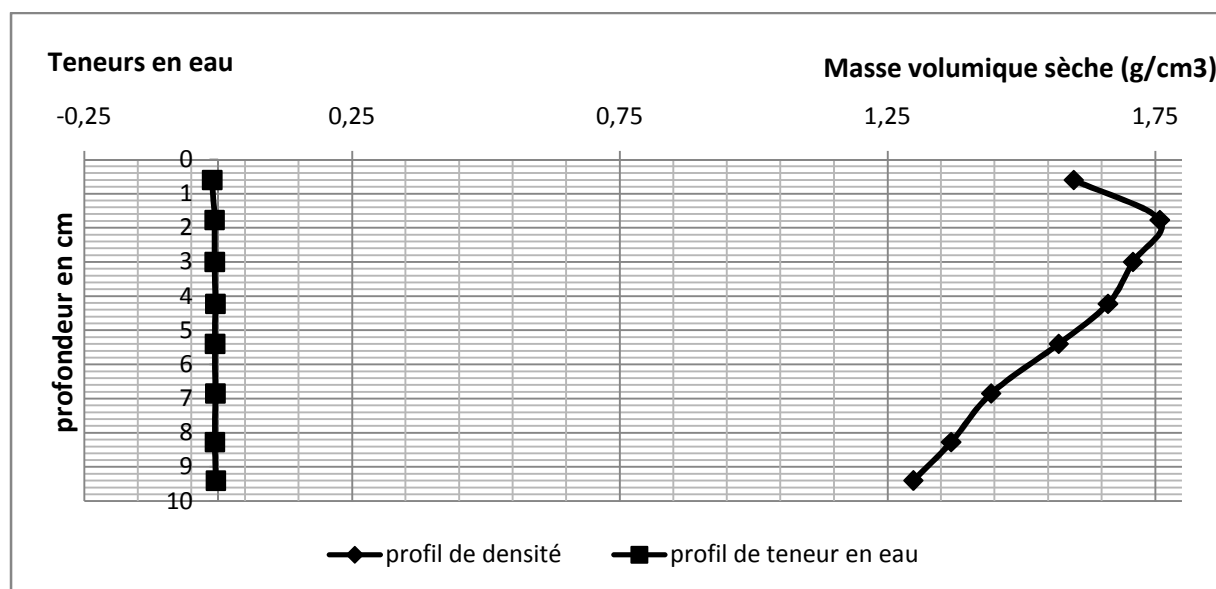


Figure VII.18 : Profil de densité et profil de teneur en eau d'une couche compactée à sec dans le moule Proctor compactée par le marteau vibrant.

Le profil de teneur en eau est presque vertical, et la teneur en eau présente une variation négligeable 0,0067. Les profils montrent que la profondeur d'influence du compactage va au-delà de 9 cm.

Malgré que le diamètre du piston de marteau vibrant soit proche du diamètre du moule il y a toujours la branche à gradient inversé, qui présente une diminution de la densité en surface. On explique cela par la présence du joint latéral de 1cm, car pendant le compactage, on a constaté la remontée de la poussière et voligeage des grains sur et autour du joint.

Au début de ces essais, on a cherché un moule de diamètre moins de 8,5cm, qui laisse un joint de 0,5 cm, juste pour éviter le frottement entre le piston et les parois du moule. Malheureusement, on n'a pas trouvé un moule avec ces dimensions.

✓ **Compactage à l'OPN d'une couche par le marteau vibrant dans le moule Proctor**

Dans les figures VII.19, on présente le profil de densité d'une couche compactée à l'OPN par le marteau vibrant. On note cette fois ci, l'allure a changé (elle est inclinée, elle n'est pas en dos de tortue), la zone de gradient inversé a disparu de telle façon que, la densité sèche diminue jusqu'au fond du moule où la densité est très faible. La teneur en eau moyenne de compactage est de 12,64%. La densité moyenne calculée avant l'extraction du profil est de  $1,65 \text{ g/cm}^3$  ainsi que la densité moyenne calculée après l'extraction du profil est de  $1,59 \text{ g/cm}^3$ , une différence de  $0,06 \text{ g/cm}^3$  est enregistrée entre les deux moyennes de densité.

Cette courbe montre bien, que le compactage par vibration dans des conditions humides, ne produit pas de voltigeage des grains comme dans le compactage à sec, car les grains collent les uns aux autres à l'aide de la cohésion apportée par l'eau.

Moins d'eau implique un plus grand frottement et donc une plus grande résistance au compactage. On pourrait dire aussi, que le compactage par vibration donne des densités plus importantes en surface et des densités extrêmement faibles en profondeur.

En comparant encore une fois les profils de densité des figures VII.18 (à sec) VII.19 (prés de l'OPN), on arrive aux mêmes conclusions que précédemment (dans la fosse). Les profils présentent des densités comparables malgré la grande différence de teneur en eau. En absence de moyen de contrôle de l'énergie, on ne peut pas identifier les énergies de compactage utilisé dans les deux cas.

Incidentement, il semble que la méthode de contrôle du compactage par vibration qui consistait à récréer les conditions de densité d'une couche compactée dans le moule Proctor (chapitre VI), a porté ses fruits.

Les résultats de compactage par vibration sont intéressants. Ils montrent, qu'il est possible d'attendre des niveaux de compacité comparables à ceux des conditions humides, en compactant le sol à sec pour une contrepartie d'énergie.

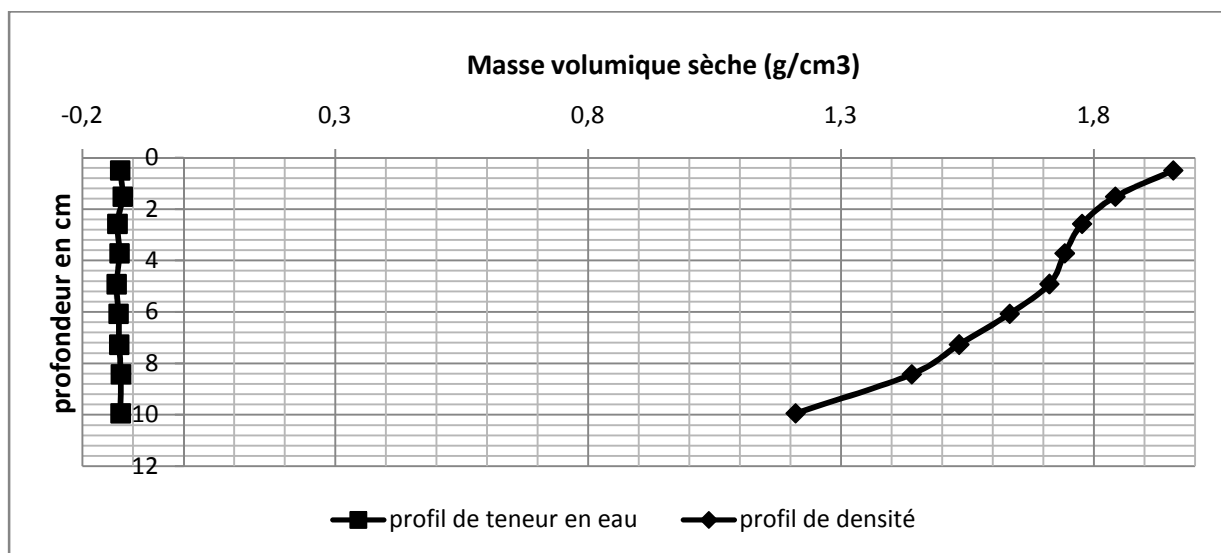


Figure VII.19 : Profil de densité et profil de teneur en eau d'une couche compactée à l'OPN dans le moule Proctor compacté par le marteau vibrant

### 3.2.3.2 Incidence de compactage en plusieurs couches sur le profil de densité

On illustre dans cette section des profils de densité, pour deux couches de sol compactées à différentes teneurs en eau, à l'énergie standard.

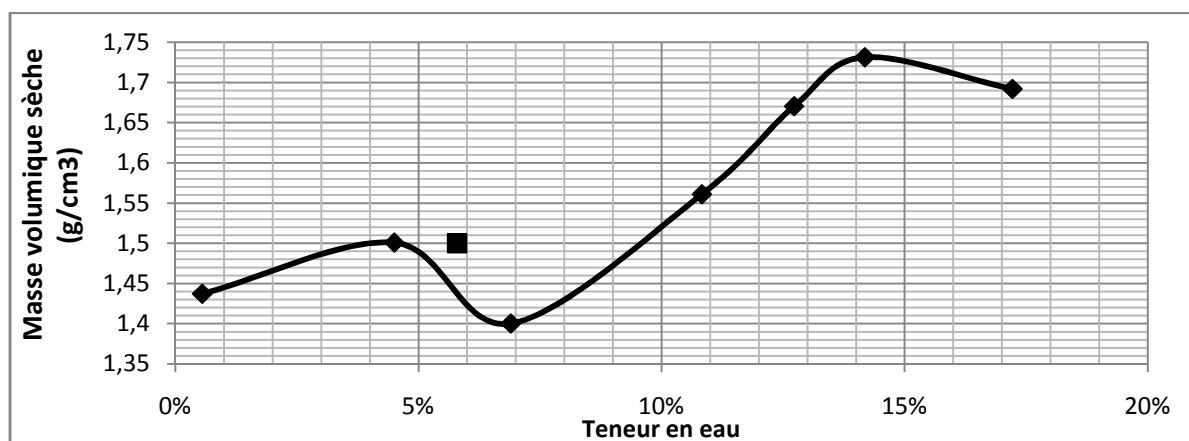


Figure VII.20 : Courbe Proctor complète du sol compacté en deux couches à l'énergie Proctor normal

### Profil de densité pour deux couches compactées à sec

La teneur en eau de compactage 0,56%, la densité moyenne calculée avant de faire l'extraction du profil de densité, est de  $1,44 \text{ g/cm}^3$ , la densité moyenne calculée est de  $1,43 \text{ g/cm}^3$ . L'écart entre les deux moyennes est de  $0,01 \text{ g/cm}^3$ .

On voit sur la figure VII.21 que l'épaisseur de la première couche compactée est égale à 7cm. L'épaisseur de la deuxième couche (en haut) est de 4,5 cm qui est petite, car il y a une partie de la couche qui a disparu, pendant l'opération de surfacage de la couche après le compactage.

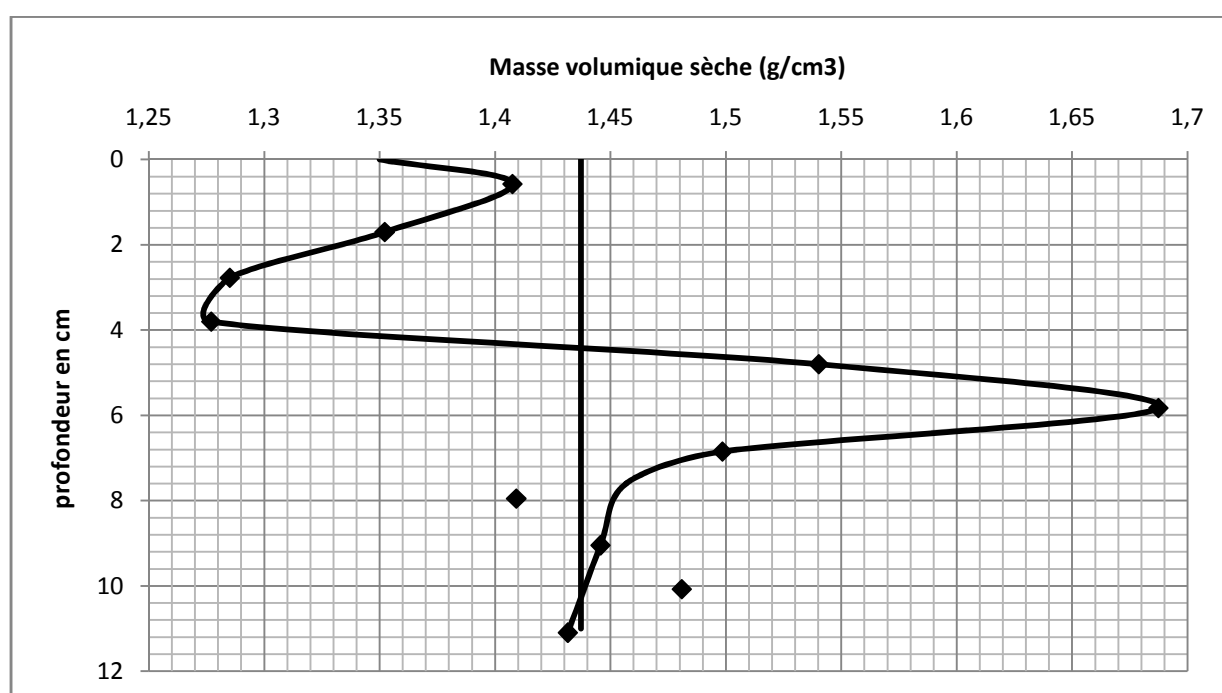


Figure VII.21 : Profil de densité pour deux couches compactées à une teneur en eau de 0,56%

Les résultats de la figure VII.21, montrent que le gradient de la densité pour la couche du fond est plus important que celui de la couche de surface. Globalement la densité moyenne de cette couche de surface est faible. L'allure de la couche du fond montre trois branches. La première branche présente une augmentation de la densité sèche (jusqu'à 6 cm) où la densité sèche est maximum ( $1,69 \text{ g/cm}^3$ ), par la suite, une diminution brusque jusqu'à une profondeur de 7,5 cm, cette branche est très accentuée. La densité sèche sera globalement constante jusqu'au fond du moule. On peut dire aussi, que l'allure de cette couche a globalement la forme de la distribution des contraintes

dans le sol, de BOUSSINESQ. Fait important néanmoins, il semble apparaître, de la figure VII.21 que le compactage de la deuxième couche apporte une augmentation de la densité dans la première couche.

### 3.2.3.3 Influence de l'eau dans les profils de densités

L'eau exerce un rôle primordial, dans la distribution de densité d'une couche de sol compacté. L'effet de l'eau dans l'expression du profil de densité, a été observé plus haut, dans la figure VII.15. Afin de mieux illustrer cette influence de l'eau, on discute les résultats donnés dans la figure VII.22.

On remarque que les profils de densité obtenus, font apparaître clairement la situation des deux couches compactées qui sont manifestement d'épaisseurs inégales.

L'augmentation de la teneur en eau de compactage, améliore les densités sèches, mais c'est un résultat connu. Il apparaît clairement identifié dans le déplacement des profils de densité, vers la densité optimale.

Néanmoins les profils de densités montrent aussi :

- ✓ Pour les faibles teneurs en eau correspondent de très faibles densités pour la couche supérieure et des densités relativement plus importantes pour la couche inférieure (figure VII.22.a et b).
- ✓ Pour des teneurs en eau plus importantes, les profils de densité des deux couches semblent être équivalents (figure VII.22.c et d)

Il semble se dégager de ces résultats, que dans les conditions de faibles teneurs en eau, le compactage de la deuxième couche, participe à l'amélioration de la compacité de la couche inférieure.

Ce phénomène doit aussi être présent, pour les teneurs en eau plus importantes, mais son effet est moindre. Compte tenu de la grande compacité obtenue lors de compactage de la couche inférieure.

Le compactage à faible teneur en eau, d'une couche de sol peut être amélioré par la réalisation de la couche supérieure. Ce qui appelle des procédures de contrôle du compactage différentes sur le chantier.

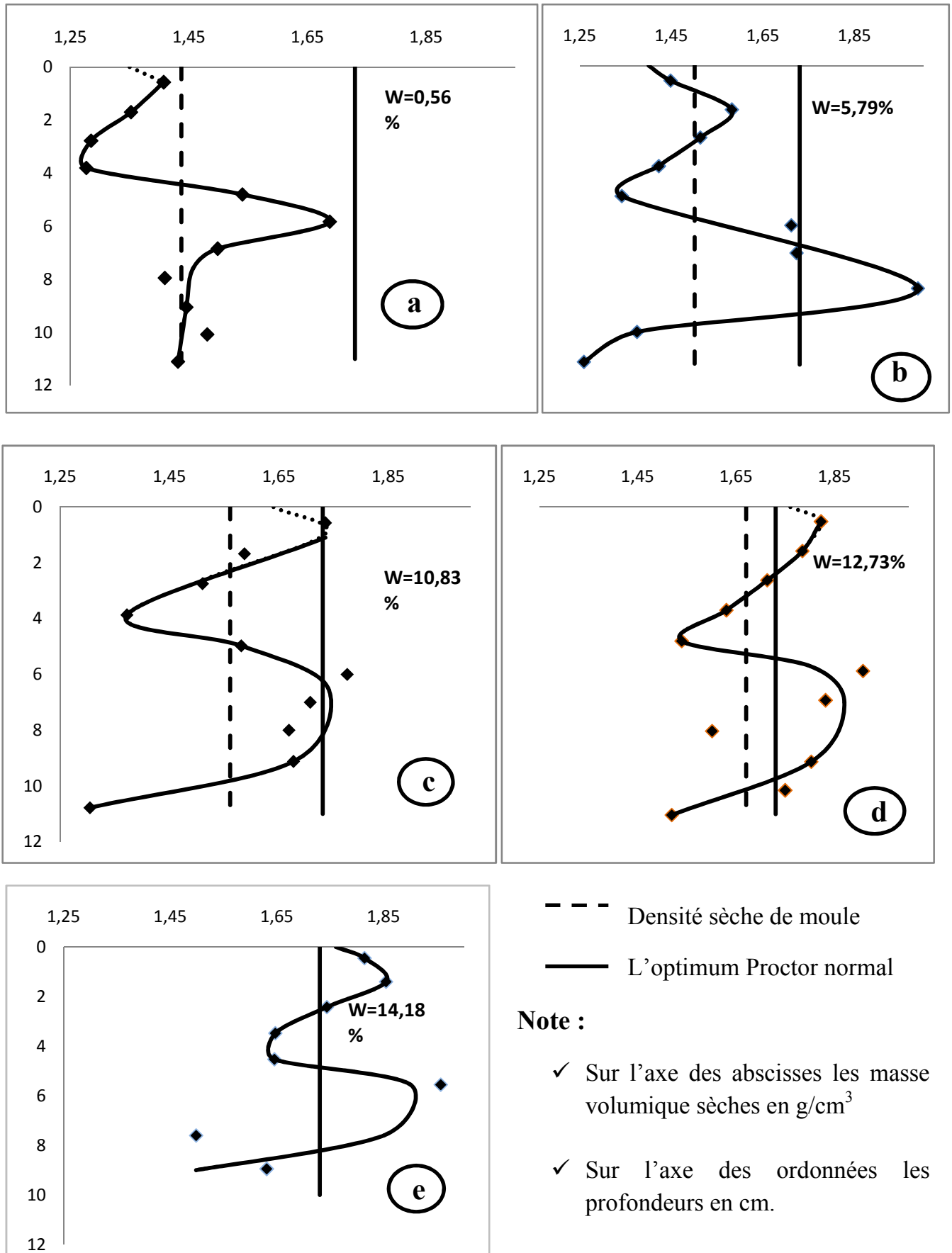


Figure VII.22 : Profils de densités en deux couches compactées à différents teneurs en eau

Pour mieux illustrer cette idée, on présente plus d'analyse dans les sections qui suivent:

### 3.2.3.4 Influence de l'épaisseur et les conditions de compactage

On rassemble dans la figure VII.23, les profils de densité d'un sol compacté en une et deux couches utilisant la même énergie suivant les mêmes conditions.

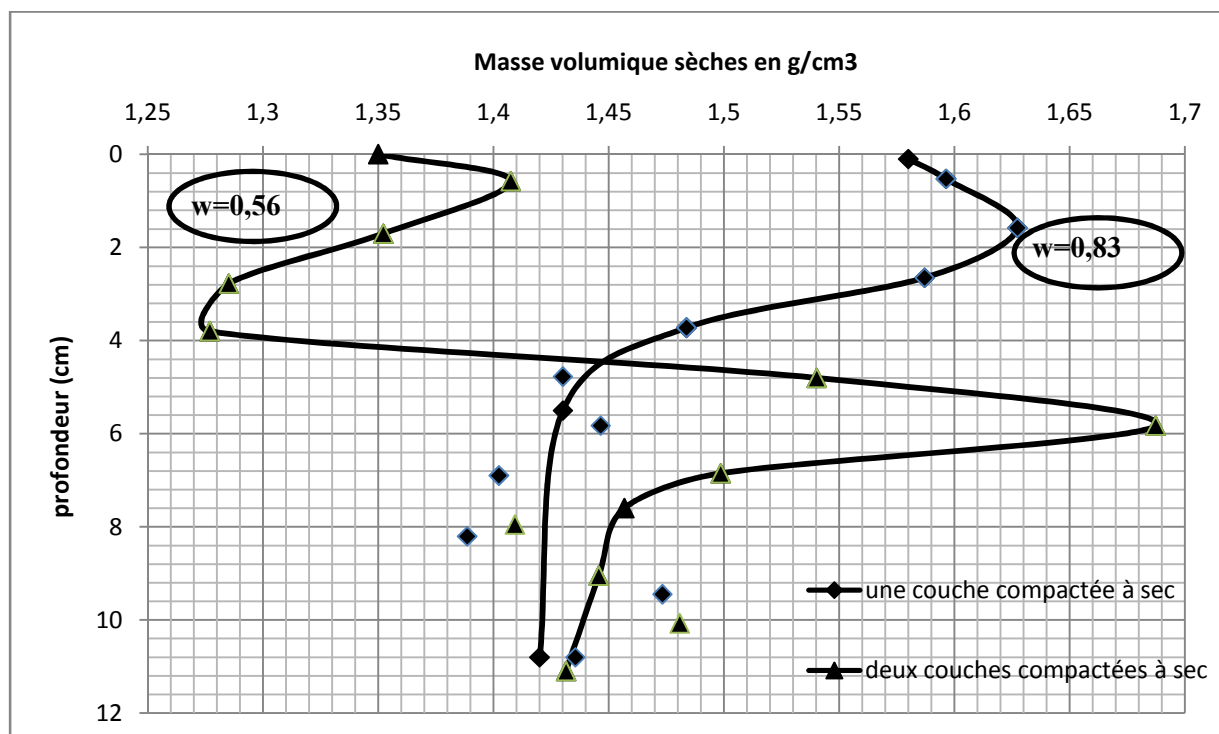


Figure VII.23 : Présentation des profils d'une couche et deux couches compactées à sec

Le compactage en deux couches donne des densités extrêmement faibles en surface et des densités plus intéressantes que celles obtenues dans le compactage en une seule couche. Les densités au fond du moule sont les mêmes pour une et deux couches. On donne dans la figure VII.24, les profils de sol compacté en une seule et deux couches à l'OPN.

Pour le sol compacté près de l'OPN, les profils de densité montrent des densités plutôt équivalentes pour le sol compacté en une seule couche ou en deux couches. On relève néanmoins qu'à l'OPN le compactage en deux couches, améliore les densités en surface et le compactage en une couche améliore les densités au fond du moule.

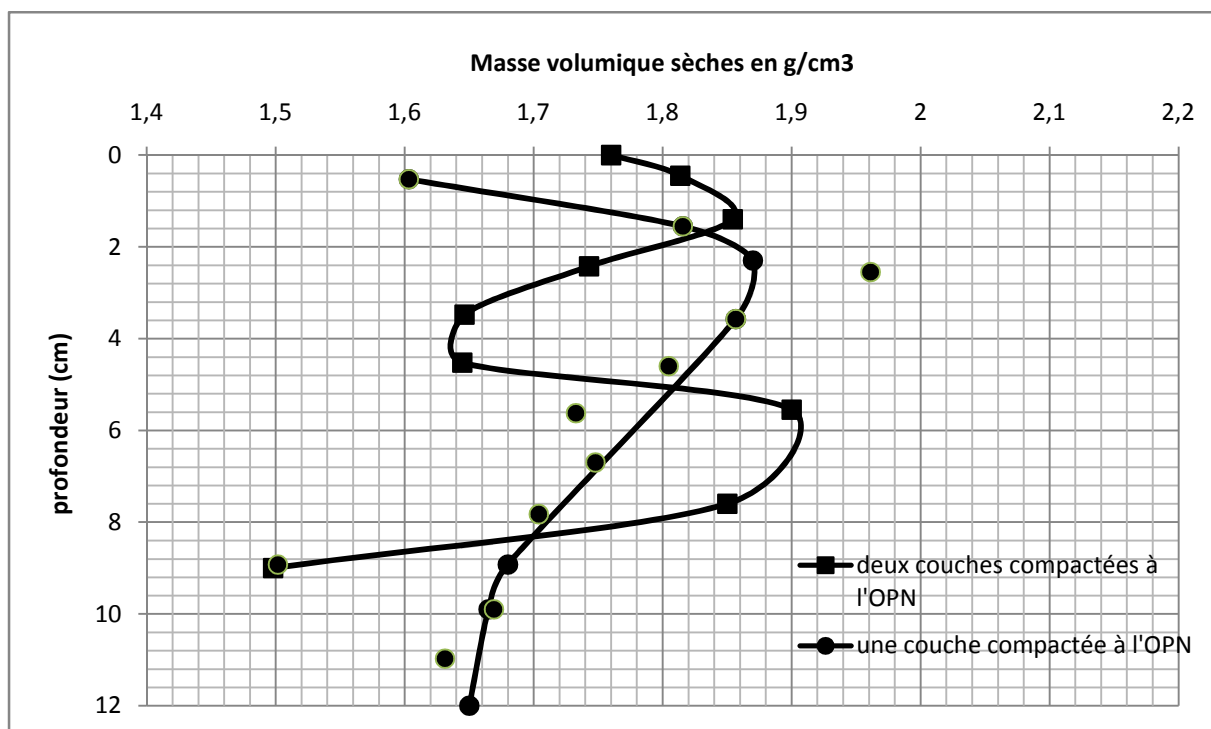
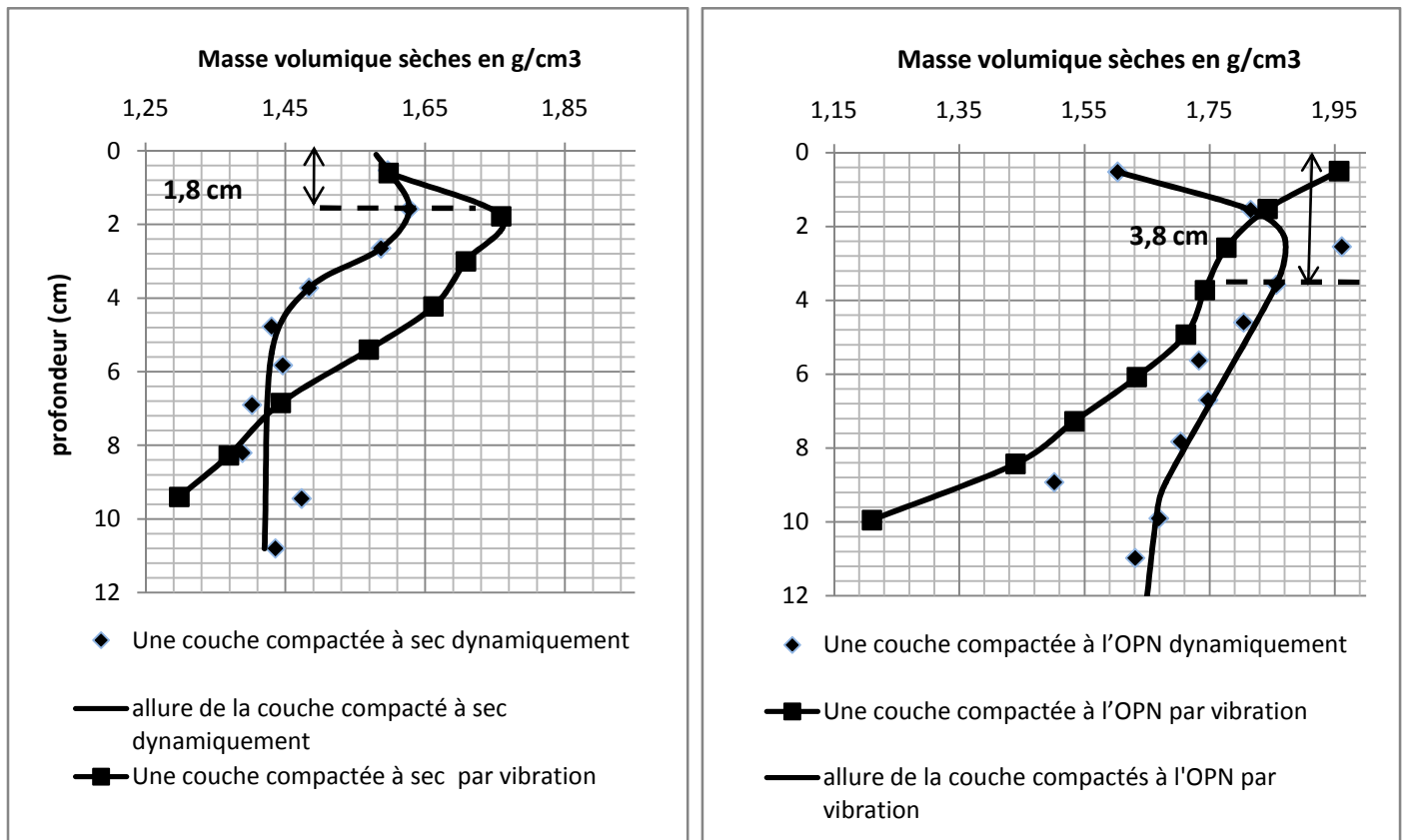


Figure VII.24 : Présentation des profils d'une couche et deux couches compactées à l'OPN

### 3.2.3.5 Effet de mode de compactage sur le profil de densité

Dans la figure VII.25, on présente les profils de densité du sol compacté dans un moule, en une seule couche par compactage dynamique d'une part et par vibration d'autre part, considérant les conditions à sec et à l'OPN. On rappelle qu'on a essayé de contrôler l'énergie, pour le compactage par vibration ; par le contrôle de la quantité de matériau utilisé ainsi que le tassement de ce dernier, en absence de moyen pour s'assurer que la quantité d'énergie soit la même ou du moins comparable pour les deux modes de compactage (l'énergie utilisée est l'énergie Proctor normal).

On constate sur la figure VII.25 qu'en surface pour les deux conditions d'humidité, le compactage par le marteau vibrant, donne un meilleur rendement. Au fond du moule, cependant, les densités du compactage dynamique sont plus importantes par rapport à celles données par le compactage au marteau vibrant. L'influence en profondeur du compactage par vibration n'est pas aussi importante que celle du compactage dynamique dans les conditions d'humidité optimale. Les résultats semblent indiquer que l'effet de compactage dynamique, se propage mieux en profondeur, grâce au phénomène de poinçonnement qui se produit dans le sol avec chaque coup de dame.



Compactage à sec (a)

Compactage à l'OPN (b)

Figure VII.25 : Présentation des profils de densité de sol compactés à sec et à l'OPN par le marteau vibrant et la dame Proctor

A droite de la figure VII.25, pour le profil compacté par vibration, on constate l'absence de la forme en dos de tortue, car l'effet du poinçonnement disparaît (il n'y a pas de cisaillement du sol).

On donne dans les figures VII.26 et VII.27, des croquis qui permettent de schématiser l'effet des modes de compactage dynamique et par vibration, sur les profils de densités obtenus. L'effet de compactage dynamique se propage mieux en profondeur, grâce au phénomène de poinçonnement (figure VII.27), qui se produit dans le sol avec chaque coup de dame. Pour le compactage dynamique lors de chaque impact, la dame poinçonne le sol sur une épaisseur qui est d'autant plus importante que la teneur en eau, s'approche de l'OPN. On se rappelle que la résistance du sol au poinçonnement du sol est d'autant plus importante que le sol est sec. Le poinçonnement du sol sous la dame refoule le sol sur le côté et décompacte le sol en surface. Le poinçonnement de la dame est responsable de la branche à gradient inversé dans le profil de densité.

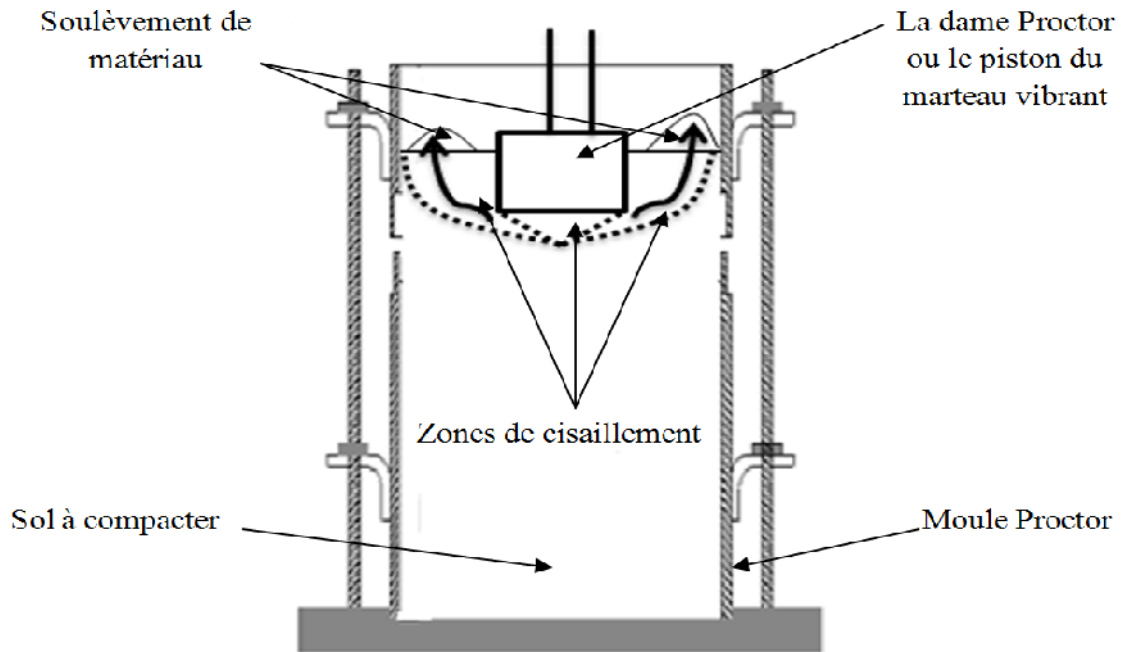
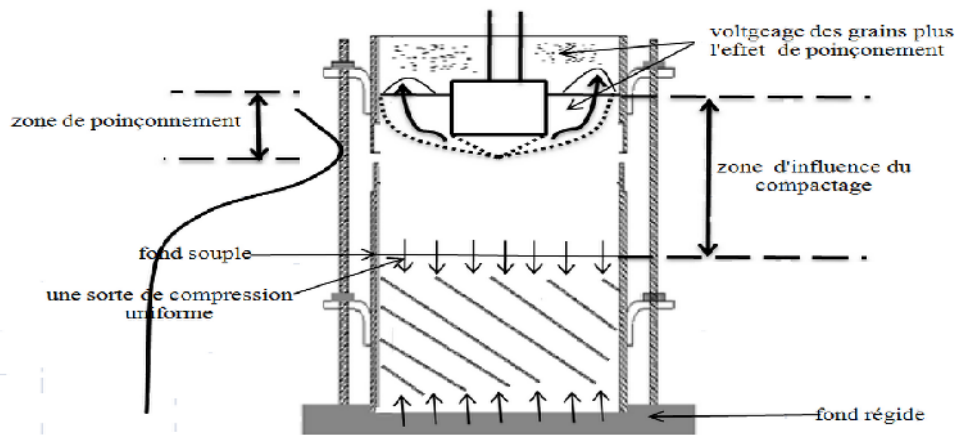


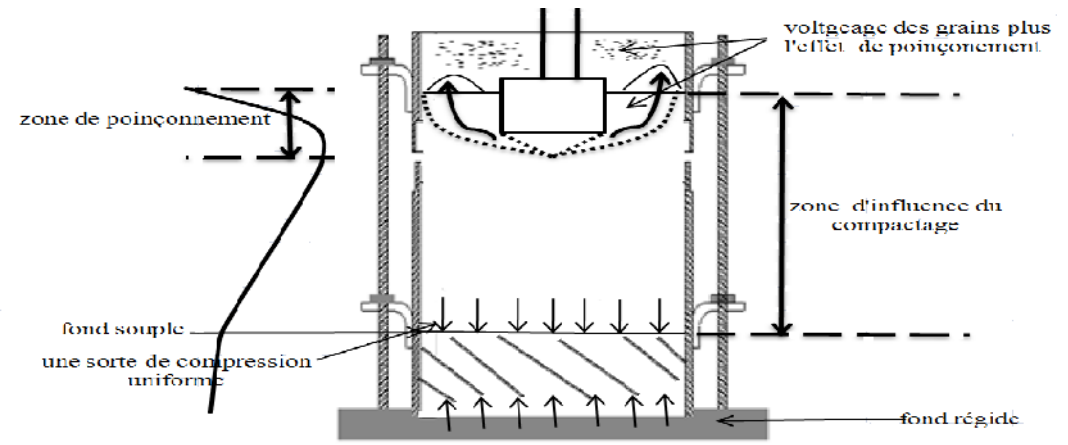
Figure VII.26 : Schéma explicatif de l'effet de poinçonnement de la dame Proctor dans le matériau lors du compactage dynamique

Pour le compactage par vibration, les vibrations du marteau sont transmises au sol à partir de la surface. Dans les conditions de faibles teneurs en eau, on observe le voltigeage des grains autour de la plaque vibrante, ce qui se traduit par l'apparition d'un faible gradient inversé sur une faible épaisseur.

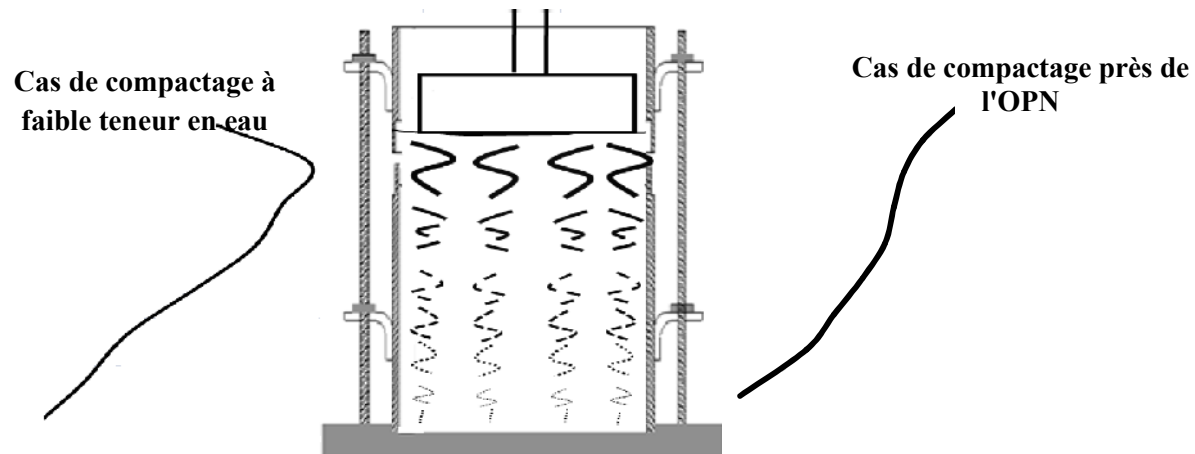
À une teneur en eau proche à l'OPN, par contre le voltigeage ne se produit plus parce que les grains du sol sont maintenus par la cohésion due à la présence de l'eau. Dans ce cas la branche à gradient inversé n'apparaît pas dans le profil de densité obtenu par le compactage par vibration.



**A** Les phénomènes qui se produisent pendant le compactage dynamique expliquant l'allure de profil de densité aux conditions de faible humidité



**B** Les phénomènes qui se produisent pendant le compactage dynamique expliquant l'allure de profil de densité aux conditions de l'OPN



**C** La manière de propagation d'énergie dans le sol dans le cas de compactage vibratoire

Figure IV.27 : Interprétation des profils de densité

#### **4. Effet de l'exposition à l'évaporation de l'eau sur un sol compacté vis-à-vis CBR et du profil de densité**

##### **4.1 Effet de l'exposition à l'évaporation de l'eau sur le CBR (par séchage)**

On rappelle qu'en vue de tester, l'effet de l'exposition du sol compacté à l'évaporation de l'eau sur la résistance, on a réalisé deux séries d'essais CBR. Pour chaque série, on a fait trois essais CBR immédiats. Le compactage est fait à différentes teneurs en eau. On a stocké une série à la température ambiante, et une autre série à une température de 105°C pendant cinq jours. Suite à cette préparation on a déterminé l'indice CBR immédiat de chaque échantillon.

On présente dans la figure IV. 28 (b), deux courbes d'indice CBR en fonction de la teneur en eau de compactage pour les deux températures de conservation des spécimens. On donne dans la même figure les résultats du CBR tracés en fonction des teneurs en eau d'enfoncement, la courbe de la série mise à la température ambiante, est tracée seulement en fonction de la teneur en eau de compactage, car la teneur de compactage et la teneur en eau d'enfoncement sont proches.

Les résultats indiquent que la résistance du sol est plus importante pour des teneurs en eau plus faibles. Ce résultat attendu peut s'expliquer par le fait que l'eau diminue le frottement entre les grains, donc elle diminue la force opposée à la sollicitation de poinçonnement CBR.

Pour les teneurs en eau testées, la courbe verticale, montre deux résistances différentes obtenues pour une même teneur en eau de poinçonnement. On peut alors noter qu'après l'évaporation de l'eau l'échantillon de sol initialement compacté à une teneur en eau importante semble présenter, une résistance plus faible que celui compacté à une teneur en eau plus modeste. L'évaporation d'une quantité plus importante d'eau laisse des vides, ce qui autorise des poinçonnements plus importants. Ce résultat est d'autant plus intéressant que le CBR le plus important est exhibé par le sol compacté à une faible teneur en eau correspondant à une très faible densité.

Selon la littérature, le CBR du sol varie en fonction de la teneur en eau, comme indiqué sur la figure IV.29, du moins pour les teneurs en eau de la courbe Proctor classique.

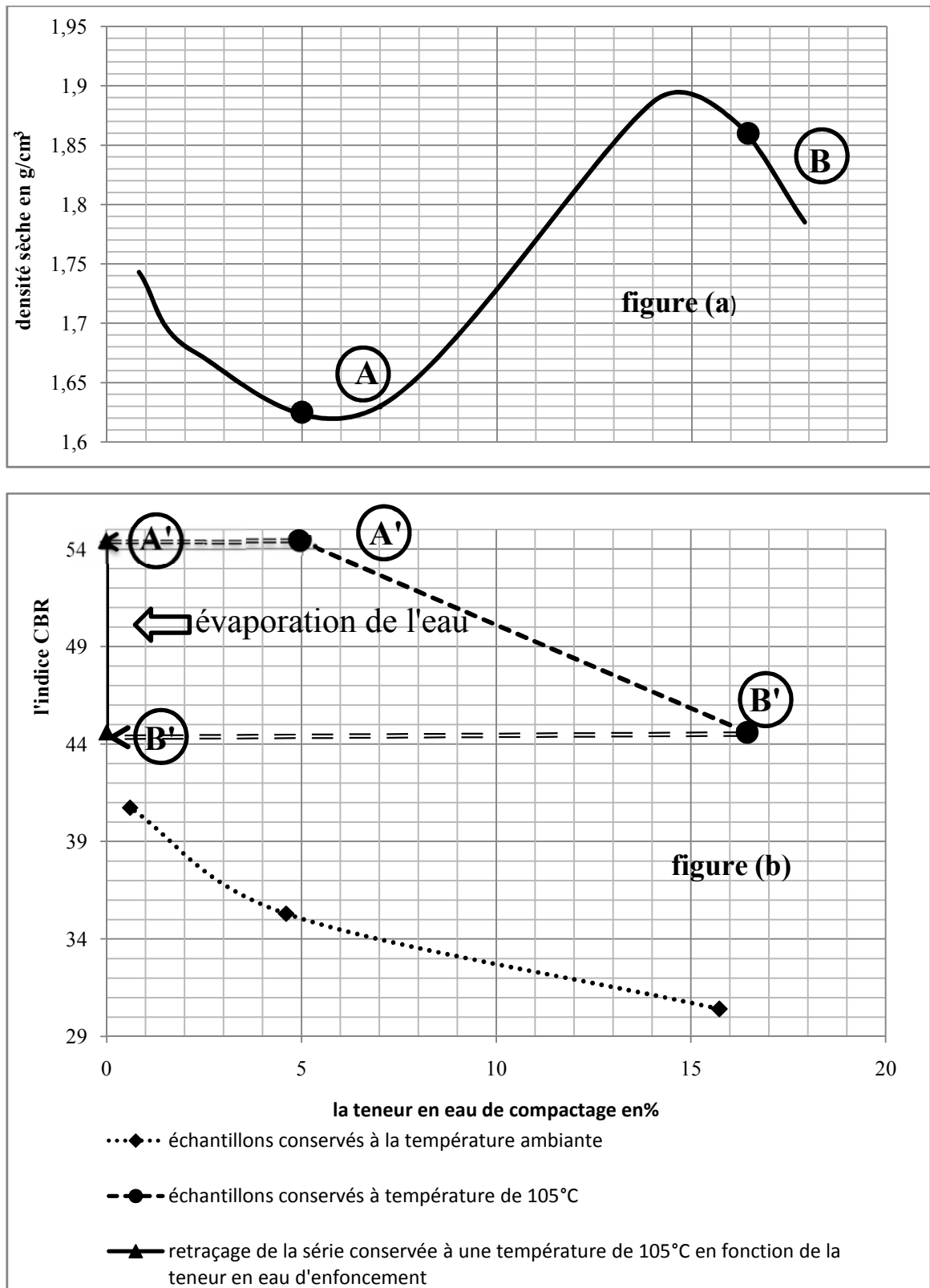


Figure IV. 28 : Courbe Proctor modifié complète et courbes de variation de l'indice CBR pour différents teneurs en eau de compactage

Ces résultats montrent que le CBR diminue substantiellement avec la teneur en eau sur le versant humide de la courbe Proctor traditionnelle et varie peu sur le versant sec de la

même courbe. La variation du CBR pour les teneurs en eau faibles n'est pas connue et n'a pas fait l'objet d'investigation.

Les courbes de la littérature montrent aussi que le maximum du CBR ne coïncide pas nécessairement avec l'OPN. Il est décalé un peu vers la gauche de celui-ci.

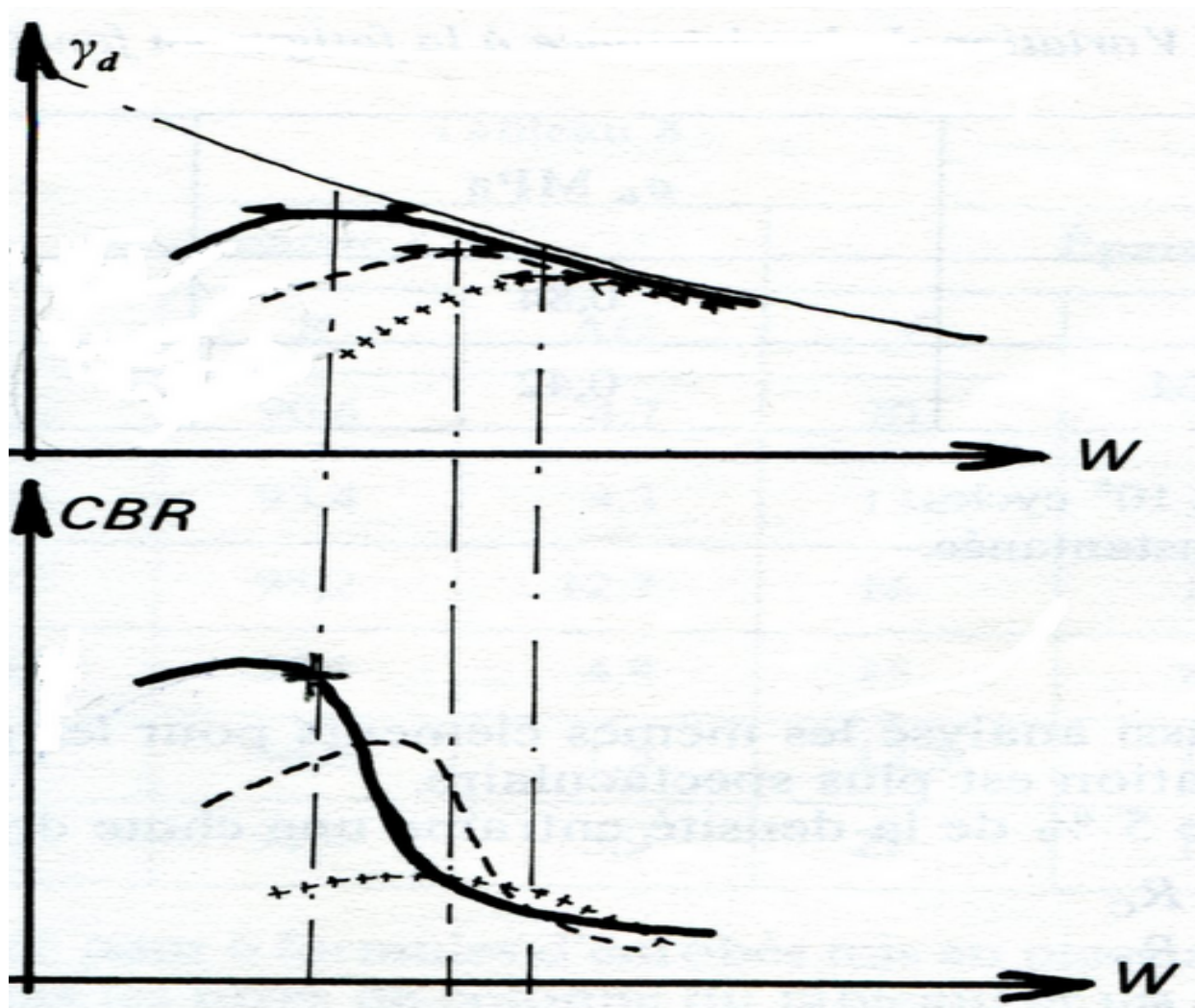


Figure IV.29 : Courbe Proctor et courbe CBR pour un même sol pour trois énergies différentes (Morel et Arquie, 1988)

Pour la variation de l'indice CBR en fonction de teneur en eau, on ne peut pas tracer des courbes, car on n'a pas déterminé un nombre suffisant des points réussis. Pour cela on peut imaginer les résultats en s'inspirant les travaux de la littérature comme indiqué dans la figure IV.30. Si on considère la réalisation d'un remblai dans une région du Sahara Algérien, quelque soit la teneur en eau, à laquelle sera compacté le sol, les conditions climatiques de région provoqueront l'évaporation quasi totale de cette eau. Le sol dans

l'ouvrage sera alors sollicité à des teneurs en eau très faibles. Les résultats exposés dans cette section permettent de noter que le sol compacté initialement à faible teneur en eau offrira une résistance beaucoup plus intéressante que ceux compactés à des teneurs en eau plus importantes.

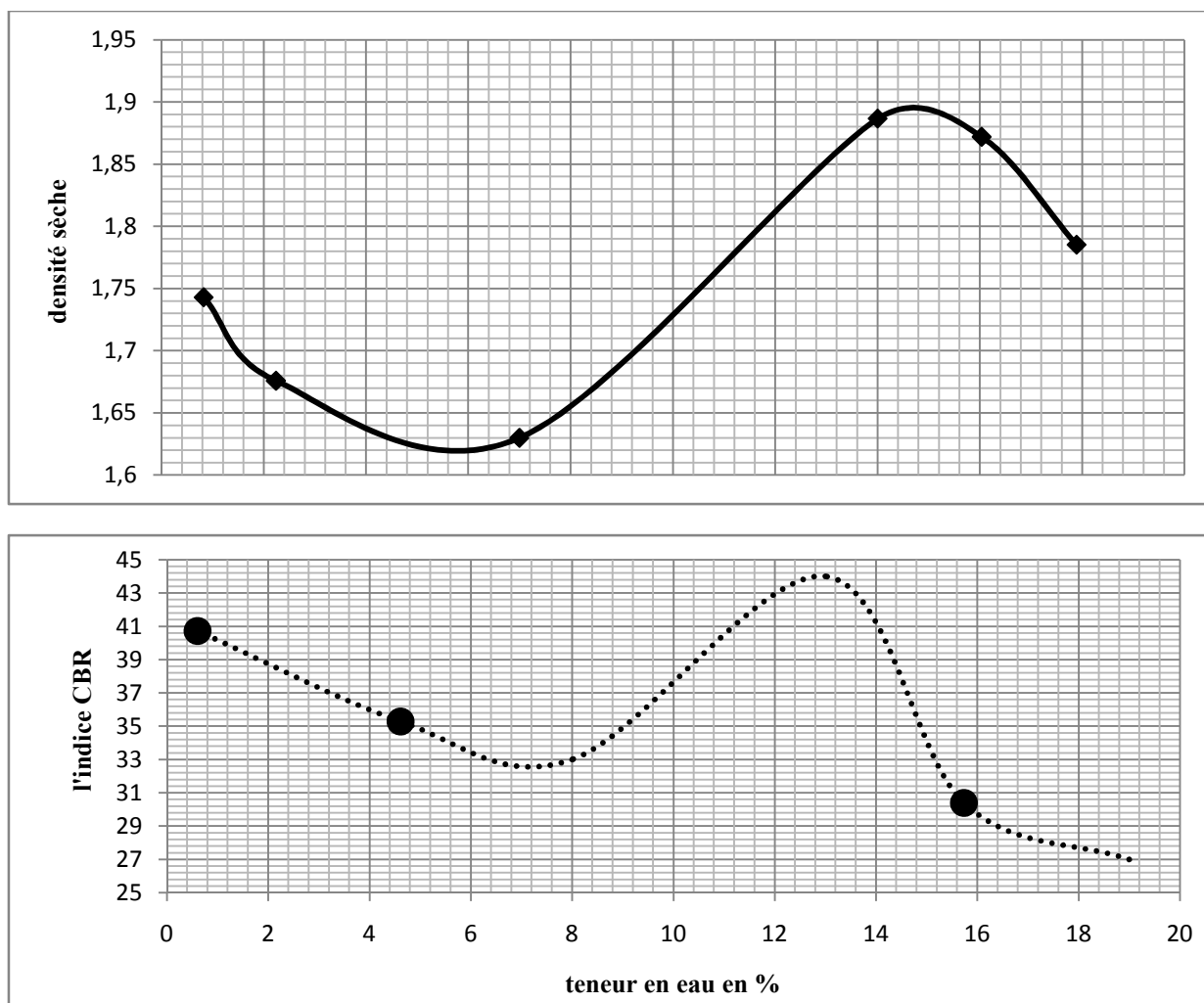


Figure IV.30 : Courbe Proctor modifiée complétée et la courbe hypothétique variation de l'indice CBR en fonction de la teneur en eau

#### 4.2 Effet de l'exposition à l'évaporation de l'eau sur le profil de densité (par exposition du sol) à l'évaporation naturelle

Si on compare le profil de densité juste après compactage et celui après exposition à l'ensoleillement (figure IV.31), on trouve que la densité a diminué en surface et a augmenté en profondeur. La densité moyenne de la couche après ensoleillement est  $1,56\text{g/cm}^3$  et la densité moyenne de la couche après le compactage est  $1,49\text{g/cm}^3$ , donc, globalement la densité a augmenté, en termes de densité moyenne.

Ceci pourrait avoir comme explication le fait qu'au fond du trou avec l'évaporation de l'eau, les grains se rapprochent. En surface le même retrait du matériau provoque une fissuration du sol (figure IV.32).

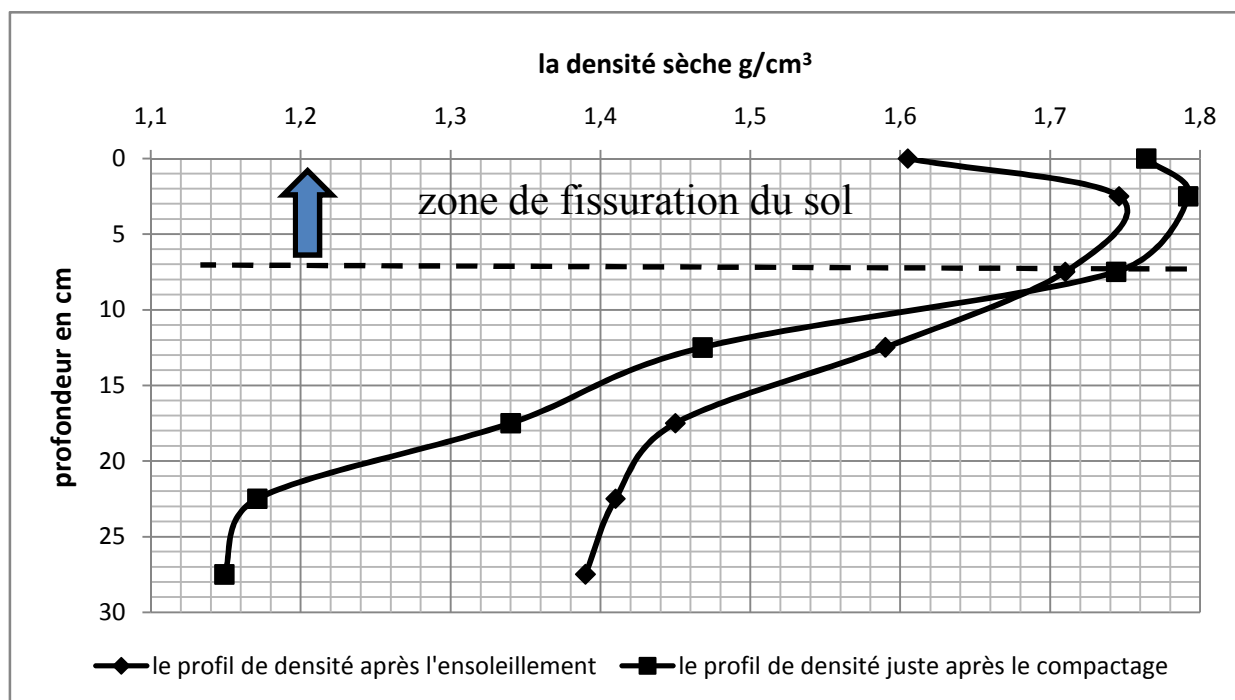


Figure IV.31 : Profil de densité d'une même couche, un après le compactage et après la dessiccation

La figure IV.32, montre la surface de la fosse compactée à l'OPN après exposition de 3 mois au soleil. La surface apparaît desséchée et fissurée. La fosse compactée à sec n'a pas fait malheureusement l'objet de même suivi. On peut néanmoins avancer que le sol compacté à sec ne se fissure pas autant et montrera une meilleure stabilité volumique.



Figure IV.32 : Etat du sol dans la fosse compactée l'OPN après l'ensoleillement.

#### 4. Effets d'adsorption de l'eau sur le compactage du sol

Dans cette partie, on tente de justifier et comprendre la participation des effets physico-chimiques dans l'expression de la courbe Proctor complète. On détermine pour ce faire la succion du sol compacté. On explique d'abord le schéma de développement de la succion dans un sol suivant un chemin de désaturation en démarrant d'un sol saturé.

On donne dans la figure IV.33 l'allure d'une courbe de rétention d'eau du sol ainsi que les succions telles que mesurées dans le sol compacté aux différentes teneurs en eau.

La courbe de rétention d'eau du sol présente trois branches. Dans la branche ①, le sol est saturé. Avec la diminution de la teneur en eau, le sol reste saturé jusqu'au point d'entrée d'air, où il commence à se désaturer. Dans la branche ② le sol se désature rapidement avec la variation de la teneur en eau sans augmentation notable de la succion. Dans la branche ③ se développe dans le sol des succions très importantes provoquées par des pertes d'eau minimales.

Dans la branche ③ se développe dans le sol des succions très importantes provoquées par des pertes d'eau minimales.

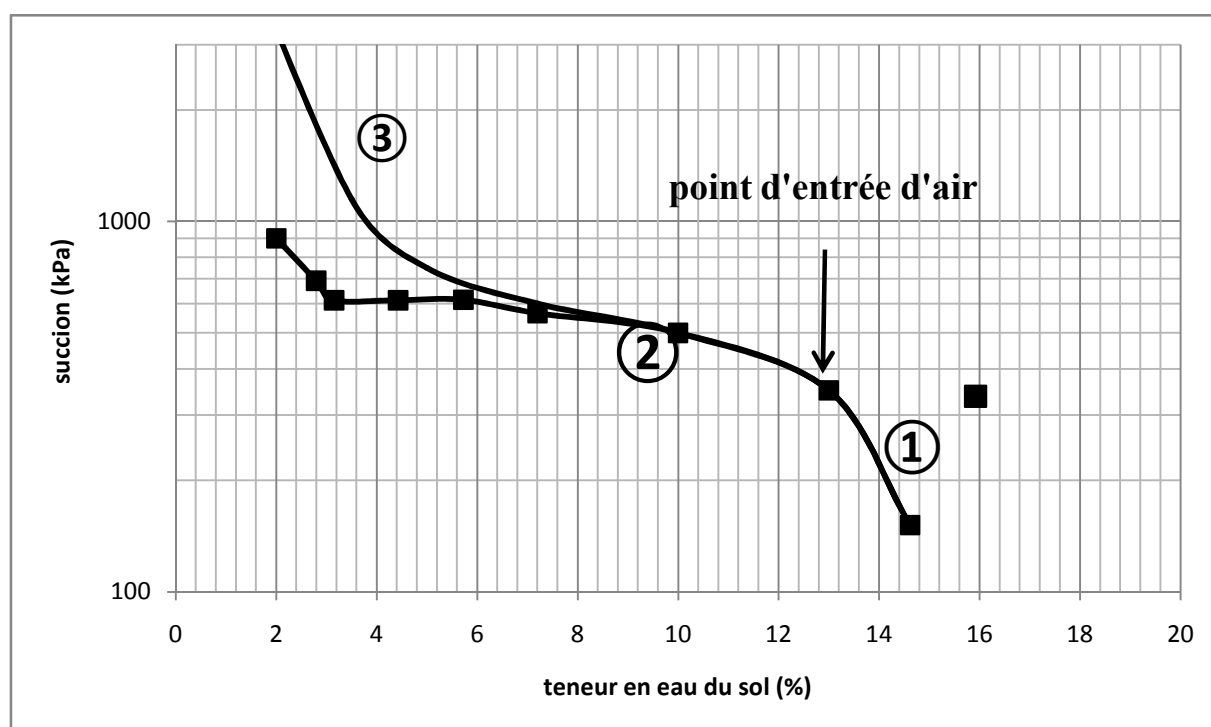


Figure IV.33 : Courbe de rétention d'eau du sol

D'après les succions mesurées dans cette étude, on constate que la succion dans le sol compacté diminue lorsque sa teneur en eau augmente. Le sol étudié étant un sol fin de moyenne plasticité, cette augmentation est liée aux phénomènes de surface (c'est-à-dire que lorsque la teneur en eau diminue les forces dues aux phénomènes de surface augmentent et par conséquent le potentiel de sol augmente et la quantité d'eau absorbée par le papier filtre diminue). On remarque aussi que lorsque la teneur en eau varie entre 13 % et 14,62 % la variation de la succion n'est pas importante donc on peut considérer que le point (13% ; 350.10kPa) comme le point d'entrée d'air. À partir de la teneur en eau résiduelle entre phase 3 et 2, il y a très peu d'eau dans le sol, l'eau est située dans les petits interstices. Dans cette phase la succion est importante, elle agit comme une force de compression isotrope et s'associe à l'effort de compactage et permet d'obtenir des densités importantes.

Sur la figure IV.34, on présente en parallèle les succions mesurées et la courbe Proctor complète. Pour chaque branche, on souligne les éléments qui travaillent pour le compactage et les éléments qui travaillent contre celui-ci, de telle façon, de bien comprendre les phénomènes qui se produisent sur chaque partie de la courbe Proctor étendue aux faibles teneurs en eau.

- ✓ Sur la branche une, le sol contient beaucoup d'eau. L'énergie de compactage est restituée par compression élastique de l'eau. Elle n'est pas encaissée par le sol et ne produit pas tout le 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 en moindre quantité travaille pour le compactage. Elle joue le rôle de lubrifiant, elle diminue le frottement.
- ✓ Sur la branche 3, il y a des teneurs en eau qui font apparaître des effets de surface, sur les autres, branches les effets de surface, ne sont pas très importants. Il y'a très peu d'eau, on a une succion importante qui se développe, la succion à partir de la teneur en eau critique (la teneur en eau résiduelle  $W_R$ ) devient plus importante. Elle participe au serrage des grains et diminue les surfaces offertes au frottement. Dans la branche ④ de la courbe Proctor normale, l'eau a relativement disparu. La succion n'agit plus, elle ne va pas vers l'infini. A partir

de là, il y a de moins au moins d'eau et le sol devient parfaitement sec. Le frottement devient très important, plus on serre plus la résistance au compactage augmente. Dans le cas de la courbe Proctor modifié, par contre le demi pic de cette courbe ne redescend pas, par ce que il y a une petite quantité d'eau qui reste un peu partout, par-ce-que l'énergie est importante, donc les grains sont très serrés. Le phénomène prépondérant dans la plage des faibles teneurs en eau est le phénomène d'adsorption. Ce phénomène est d'autant plus important qu'il existe des particules fines dans le sol.

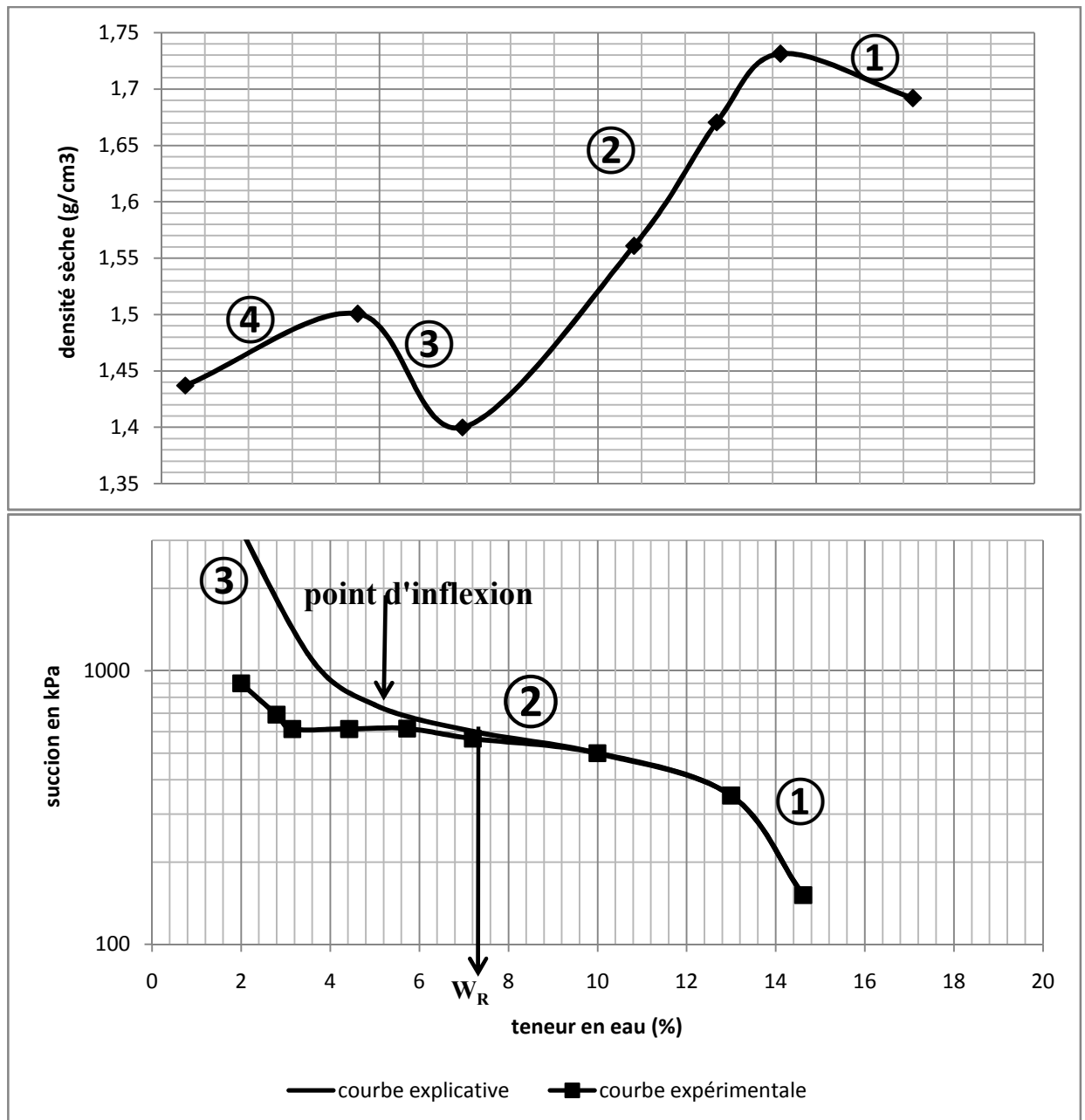
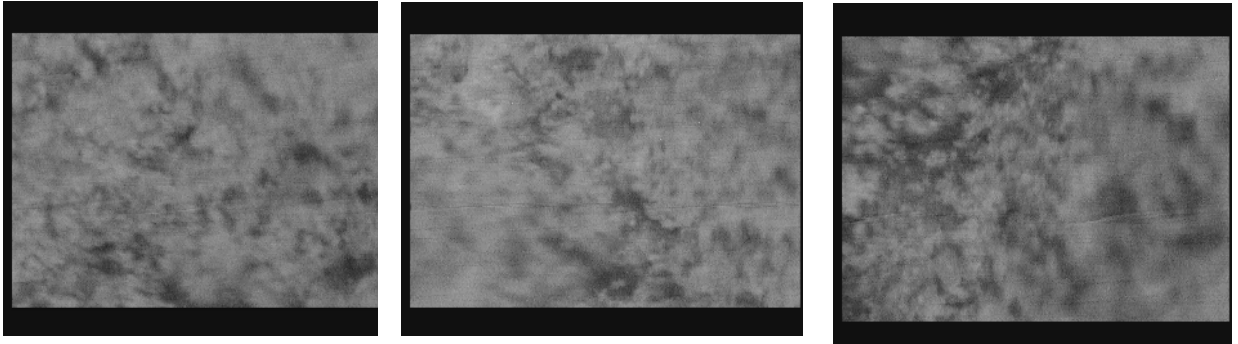


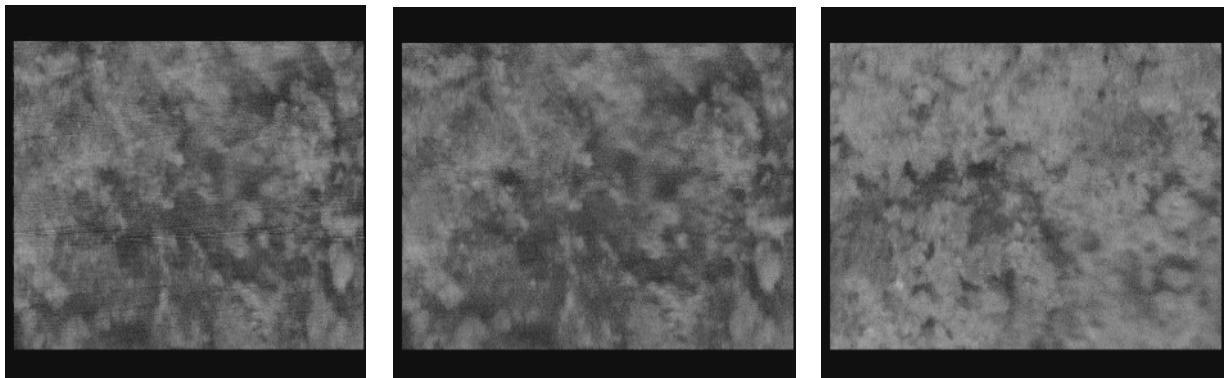
Figure IV.34 : Succion dans le sol compacté en parallèle avec la courbe Proctor complète

### 5. Observation au microscope des spécimens compactés

A fin de tenter d'analyser la structure des échantillons compactés, on a réalisé des observations au microscope de trois échantillons avec un agrandissement de 50 fois.



① Photos d'un sol compacté (Proctor modifié) à une  $w=6\%$ ,  $e=57\%$  et  $A=31,5\%$



② Photos d'un sol compacté (Proctor modifié) à une  $w=8\%$ ,  $e=52\%$  et  $A=25,5\%$



③ Photos d'un sol compacté (Proctor modifié) à une  $w=12\%$ ,  $e=32\%$  et  $A=10\%$

Figure IV.35 : Observation des spécimens avec le microscope

Ont été observés des échantillons compactés à des teneurs en eau de 6%, 8%, 12%. Malheureusement, on n'a pas pu observer des spécimens compactés à une teneur en eau inférieure à 6% ; à cause du manque de cohésion. On donne dans la figure IV.35 les photos correspondant aux observations de ces échantillons.

Pour le spécimen de 6%, la couleur dominante est plutôt blanche, le spécimen de 12% devient sombre. On note que le blanc est la couleur des grains, le noir est la couleur des vides. L'augmentation de la quantité d'eau est évidente avec son action dans l'organisation des grains.

Malgré la mauvaise qualité des photos, leur observation permet de souligner, les conclusions suivantes :

- ✓ La matière blanche (représentant les grains de sol) ① se présente en grands amas interrompus par endroits localisés par de gros vides. Ces vides représentent la macroporosité, les microvides se trouvent à l'intérieur des amas eux-mêmes.
- ✓ En ②. La matière blanche s'organise en amas de taille légèrement plus réduites émaillés par des vides de taille aussi réduite et mieux répartis sur toute la surface du sol. On a l'impression qu'il y a plus de vides malgré un indice des vides plus faible.
- ✓ En ③ la matière blanche apparaît plus finement comme des tous petits points répartis de manière quasi-uniforme avec les vides.

Ces résultats qui peuvent être confirmés par une analyse numérique illustrent le changement de l'organisation des particules du sol (ou la distribution des pores) avec la teneur en eau du sol.

## 6. Distribution porale dans le sol compacté

La vitesse de propagation d'une onde ultrasonique, peut fournir une approche rapide et simple, pour déterminer les caractéristiques d'un sol compacté et évaluer globalement sa structuration interne.

On rappelle que pour ce faire on a réalisé trois séries d'essais. Une première série où on a pris la mesure de la vitesse, immédiatement après le compactage. La deuxième série

été faite après 24<sup>h</sup> du compactage du matériau, d'abord pour vérifier les résultats de la première série ensuite pour voir l'effet de la relaxation du matériau sur les vitesses ultrasoniques. On a aussi profité pour faire une troisième série, lorsqu'on a effectué les essais de la succion ; c'est-à-dire dix jours après le compactage du matériau.

Pour cette série, on a tracé les courbes suivantes :

- ✓ La courbe des vitesses en fonction des teneurs en eau.
- ✓ La courbe Proctor complète correspondante à cette série.
- ✓ La courbe de la densité humide en fonction de la teneur en eau.
- ✓ La courbe des indices des vides en fonction des teneurs en eau.

On donne dans la figure IV.36 les résultats mesurés à l'ultrason avec la courbe Proctor étendue. Les graphes montrent que les vitesses mesurées sont dans la gamme de (350 à 750 m/s).

On remarque que, la relation entre la vitesse des ultrasons et la teneur en eau, est une courbe à deux pics, semblable à la courbe Proctor complète. Ces essais ont montré que, les vitesses des ultrasons dans le sol compacté augmentent avec la densité sèche.

Les vitesses donnent aussi, une idée sur les propriétés microstructurales des sols.

En général, on peut justifier la courbe de variation de la vitesse avec les teneurs en eau comme suit ; les vitesses dans les solides sont plus élevées que dans les liquides, qui sont plus élevées que les vitesses dans les gaz (principe de propagation des ondes dans un matériau). Par conséquent, la vitesse maximale devrait se produire à la teneur en eau optimale. Dans cette situation se conjugue un maximum de densité avec une faible teneur en air. L'augmentation du nombre de contacts solide-solide a pu augmenter la vitesse en plus de la diminution de l'indice des vides.

Si on veut détailler et expliquer la diminution de vitesse ou de la densité sur chaque branche, on trouve qu'il ya un jeu de rôle entre les trois phases (solide, liquide, gaz) sous le principe de propagation cité précédemment.

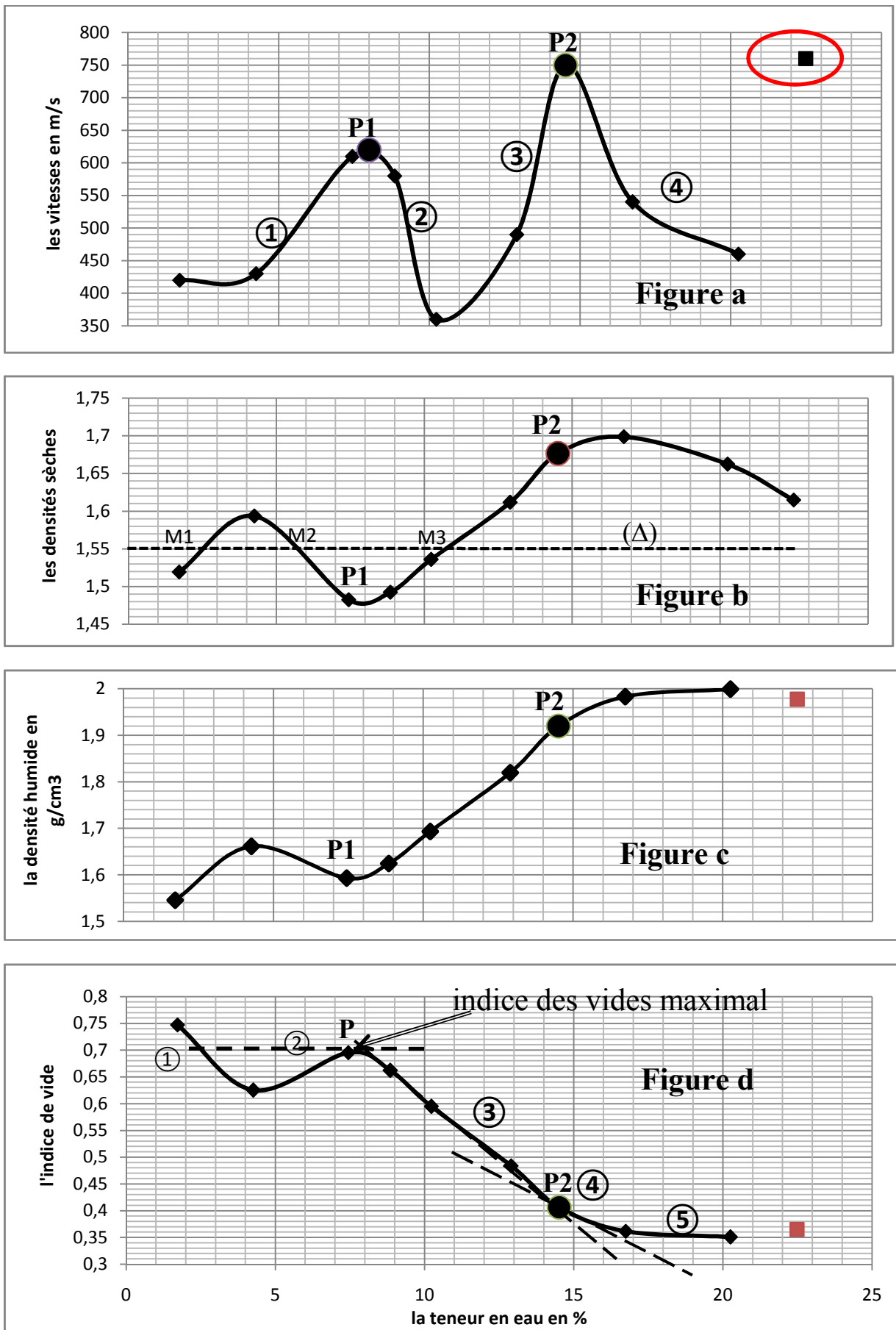


Figure IV.36 : Courbes résultats de mesure à l'ultrason

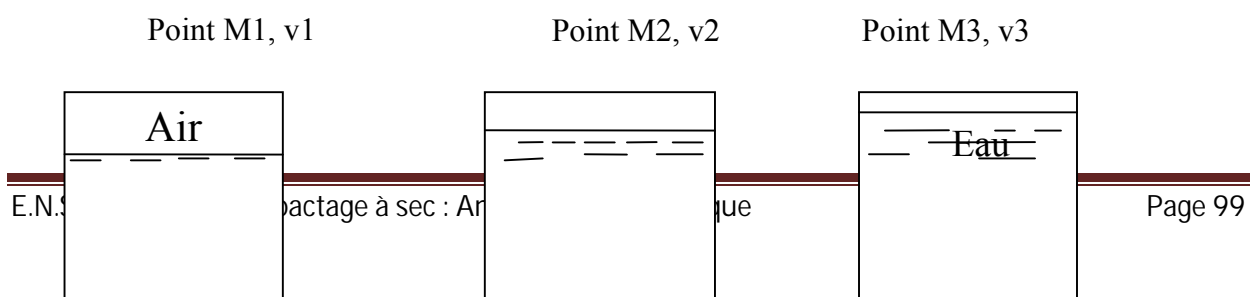
Pour mieux expliquer la structuration du sol en fonction de la teneur en eau, on considère l'exemple illustré sur la figure IV.38.b, qui montre l'intersection de la droite ( $\Delta$ ) horizontale avec la courbe Proctor étendue aux faibles teneurs en eau. La droite ( $\Delta$ ) définit trois points  $M_1$ ,  $M_2$ ,  $M_3$ , qui ont la même densité sèche  $1,55 \text{ g/cm}^3$  et le même indice des vides, ils correspondent à trois vitesses ultrasoniques différentes, successivement  $v_1=415\text{m/s}$ ,  $v_2=540\text{m/s}$ ,  $v_3=370\text{m/s}$  ainsi que trois teneurs en eau différentes  $w_1=2,6\%$ ,  $w_2=6\%$ ,  $w_3=11\%$ .

Pour les trois points on a la même quantité de matériau mais pas la même vitesse de transmission. Finalement, les ondes ne se transmettent pas de la même manière dans les trois points. Cela veut dire que la structuration des grains est différente d'une teneur en eau à une autre, l'organisation des vides diffère en fonction de la teneur en eau. Pour bien expliquer cela, on va utiliser une transmission des ondes ultrasonores similitude avec la perméabilité hydraulique dans le matériau (figure VII.37). Au point  $M_3$  les vides doivent être de taille réduite répartis de manière uniforme sur toute la surface du sol.

Dans les situations les plus sèches  $M_1$  l'eau est solidement attirée par les grains du sol qui s'agglomèrent entre eux en laissant des vides de tailles importantes. La situation de point  $M_2$  est intermédiaire.

On remarque que le pic P2 qui correspond à une vitesse maximale ne coïncide pas avec l'OPN mais se trouve largement décalé à gauche de celui-ci. Ce résultat fait rappeler que le CBR maximum est aussi obtenu pour une situation décalé à gauche de l'OPM (figure IV.30 et figure IV.31). Le pic P1 de la courbe de variation de la vitesse en fonction de la teneur en eau, est associé à la teneur en eau critique  $w_c$  qui correspond à une densité minimale et un indice des vides maximale.

Des observations au microscope devraient permettre de mettre en évidence l'effet de la teneur en eau dans la structuration des éléments du sol. Ainsi on pourra mieux expliciter les résultats des vitesses ultrasoniques obtenues dans cette étude.



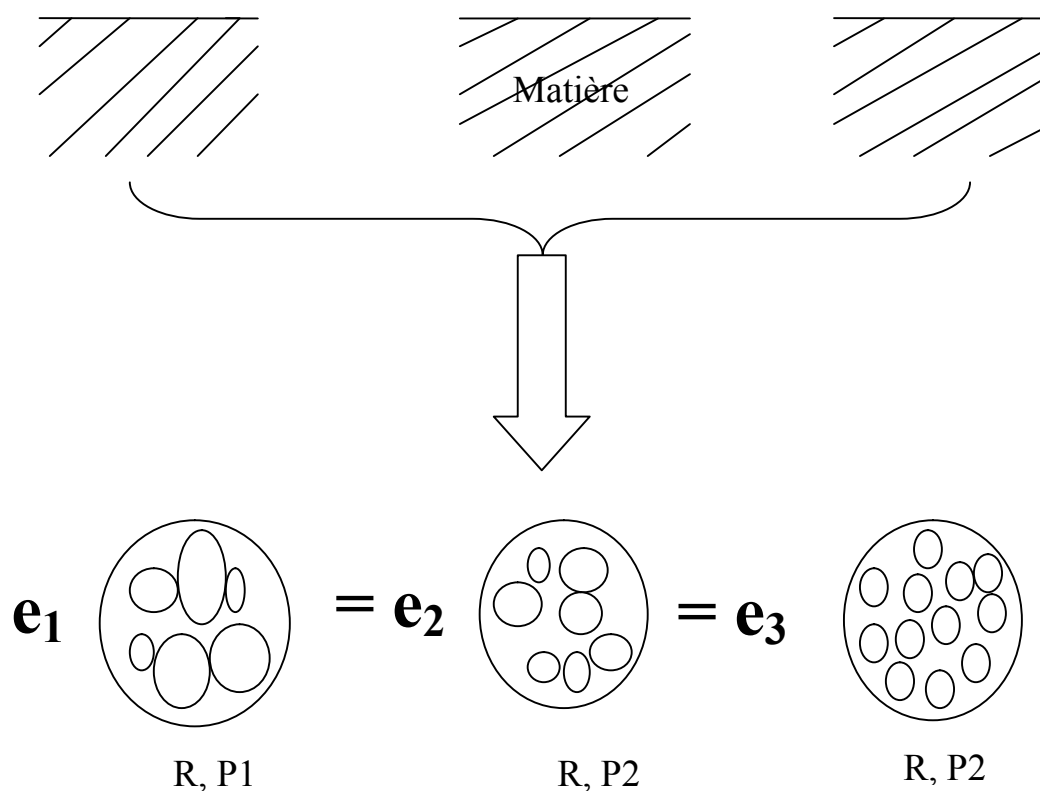


Figure VII.37 : Explication de l'organisation porale par la similitude avec la perméabilité hydraulique

## 7. Conclusion

Dans ce chapitre on a présenté et tenté d'interpréter les résultats obtenus dans cette étude suivant une organisation qui fasse ressortir les considérations saillantes suivantes :

- ✓ Effet de l'énergie de compactage
- ✓ Si on parvient à atteindre des densités intéressantes par le compactage à faible teneur en eau, on est sûr d'avoir des résistances du sol supérieures et une stabilité volumique plus intéressante dans les zones arides.
- ✓ L'effet de nombre de couches
- ✓ Répartition de l'énergie de compactage dans le sol
- ✓ Le profil de densité, a permis de faire des comparaisons entre le compactage à sec et à l'OPN soit dans le moule ou dans la fosse et cela dans les cas des compactages vibratoire et dynamique. On discute aussi les facteurs influant sur le profil de densité :
  - L'apport du compactage par vibration sur le profil de densité.
  - L'incidence de compactage en plusieurs couches sur le profil de densité.

- L'influence de l'eau sur le profil de densités.
  - L'influence de l'épaisseur et les conditions de compactage.
  - L'effet de mode de compactage sur le profil de densité.
  - L'effet de l'exposition à l'évaporation de l'eau sur un sol compacté vis-à-vis du CBR et du profil de densité.
- ✓ Les effets d'adsorption sur le compactage du sol, à fin de trouver une explication de la courbe de Proctor par ces effets.
  - ✓ Observation des spécimens compactés au microscope pour voir l'influence de l'eau sur la répartition des grains.
  - ✓ La distribution porale dans le compactage. à fin de comprendre l'organisation des trois phases dans chaque point de la courbe Proctor.

Toutes ces analyses ont permis d'attendre des conclusions intéressantes concernant le compactage à faible teneur en eau. Parmi ces conclusion on rappelle saillantes.

L'eau de compactage permet d'améliorer le rendement de compactage en diminuant la résistance du sol. Au compactage à faible teneur en eau, le frottement empêche le sol de bien se compacter et ceci donne le lieu à des sols de faible compacité et de grandes teneurs en air.

Il est possible d'améliorer le rendement de compactage à faible teneur en eau en :

- ✓ Augmentant l'énergie de compactage.
- ✓ Considérant des couches minces.
- ✓ Adoptant le compactage par vibration.

## Chapitre VIII

### Conclusions et recommandations

Les expériences menées dans plusieurs pays arides ont montré qu'il y aurait une possibilité de compacter le sol à une teneur en eau faibles et même quasi nulle. Il ne fait aucun doute que la technique de compactage du sol à sec, fournit un avantage capital pour la réalisation des infrastructures routières dans les zones arides. Malheureusement ces expériences qui ont été menées à l'occasion de la réalisation de la transsaharienne n'ont pas été poursuivies pour trancher la question de la faisabilité pratique de la technique.

On rappelle que la contribution réalisée dans ce travail s'est assigné les objectifs suivants :

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

Pour réaliser ces objectifs un programme expérimental a été dimensionné et réalisé dans sa majorité au laboratoire.

Ce programme expérimental a consisté en une série de compactage du sol suivant des configurations différentes qui ont fait varier :

- ✓ le nombre de couches compactées (ou la hauteur de la couche) dans le moule.
- ✓ L'énergie de compactage (Proctor normal, Proctor modifié).
- ✓ Le nombre de couches compactées.
- ✓ La taille du moule.
- ✓ Le type de compactage (dynamique, vibratoire).

Pour les sols ainsi compactés, on a analysé le profil de densité obtenu à chaque fois. On a réalisé aussi des mesures de la propagation des ondes ultrasoniques dans les carottes de sols compactés, des essais CBR et des essais de succion.

En dehors des aspects fondamentaux, les principaux résultats obtenus dans ce travail peut être rappelés :

- ✓ En augmentant l'énergie de compactage sur le terrain, on réalise des économies d'eau de compactage et on diminue la teneur en air.
- ✓ La diminution de la taille du moule, la réduction de l'épaisseur de la couche et l'augmentation de l'énergie de compactage influent sur l'optimum Proctor et augmente la densité sèche.
- ✓ Le compactage en deux couches donne des densités extrêmement faibles en surface et des densités plus intéressantes que celles obtenues dans le compactage en une seule couche.
- ✓ La forme générale de profil de densité (tortue, soit la même pour le compactage dynamique où le compactage vibratoire), On peut expliquer le gradient inverse de la branche de surface, par le saut des grains pendant le compactage avec la dame (le cas de compactage dynamique) ainsi que probablement au poinçonnement de la dame dans le matériau qui provoque la contrainte de cisaillement.
- ✓ Le gradient de densité inversé en surface, est relativement plus important dans le compactage humide, que dans le compactage à sec.
- ✓ Par l'observation des profils de densité du sol compacté à différentes teneurs en eau, on a montré que l'augmentation de la teneur en eau jusqu'à l'OPN améliore le rendement du compactage (densité et profondeur influence du compactage plus importante). Ce résultat est eu relation avec la résistance plus importante que le sol oppose au compactage. Cette résistance diminue sous l'effet la teneur en eau.
- ✓ L'observation des profils de densité en deux couches a permis de mettre en évidence le compactage additionnel de la couche sous-jacente ou du bas lors du compactage de la couche du haut dans le compactage à faibles teneurs en eau.
- ✓ La comparaison des résultats de compactage par vibration et du compactage dynamique a permis de montrer que le compactage dynamique donne de

meilleures densités en profondeur pendant que le compactage par vibration donne une meilleure densité en surface.

- ✓ Le CBR est élevé pour les sols compactés à sec, on réalise des corps de chaussées minces, ce qui entraîne une économie de matériau.
- ✓ Le sol compacté initialement à faible teneur en eau offrira une résistance beaucoup plus intéressante que ceux compactés à des teneurs en eau plus importantes.
- ✓ La combinaison des essais de résistance avec les résultats des vitesses ultrasoniques, ont montré qu'il existe un autre optimum qui présente une très légère diminution de densité et une résistance plus importantes par rapport l'optimum Proctor.
- ✓ La relation entre la vitesse des ultrasons et la teneur en eau, est une courbe à deux pics, semblable à la courbe Proctor complète.
- ✓ On a découvert aussi comment varie la résistance et la vitesse sur la partie sèche en fonction de la teneur en eau (des travaux de ce genre sur la partie sèche sont rares).
- ✓ Les courbes de la littérature de CBR (w), sont très semblables à nos courbes de vitesse ultrasonique en fonction de la teneur en eau, en termes d'allure et la meilleure résistance correspond à la vitesse optimale.
- ✓ Après l'exposition au soleil pour le sol compacté dans des conditions proches à l'OPN, la densité a diminué en surface et a augmenté en profondeur. Ceci pourrait avoir comme explication le fait qu'au fond du trou avec l'évaporation de l'eau, les grains se rapprochent. En surface le même retrait du matériau provoque une fissuration du sol

Concernant les objectifs 1 et 2 qui sont de caractère fondamental. Il a été montré que le sol choisi exhibe une courbe Proctor de forme irrégulière à deux pics pour le standard et un pic et demie pour le compactage à l'énergie Proctor modifiée.

La mesure de la succion dans le sol compacté a permis de mettre en avant les phénomènes et d'adsorption capillaires qui sont responsables de l'augmentation de la densité vers les faibles teneurs en eau.

On a pu montrer dans ce modeste travail que le rendement du compactage à faibles teneurs en eau peut être amélioré en envisageant les précautions suivantes:

- ✓ Par l'application du compactage sur toute la surface du matériau à compacter pour éviter le voltigeage des grains), en évitant le problème de ségrégation des grains et traitement de la surface par un faible arrosage où le rajout d'une couche d'un matériau plus noble (la GNT, le tuf...).
- ✓ La diminution de l'épaisseur de la couche compactée pour avoir des densités plus importantes et pour résoudre le problème de faible densité sur la partie inférieure de la couche.
- ✓ L'application d'une énergie importante pour augmenter la densité sèche et respecter la condition de la teneur en air doit être inférieure à 10%.
- ✓ L'adoption un compactage par vibration.

On a pu montrer que la réalisation de compactage à faible teneur en en eau donne des densités comparables à celles obtenues dans les conditions d'humidité optimale, a permet d'atteindre des résistances plus importantes et une stabilité volumique plus intéressante pour le sol compacté.

Le contrôle de compactage et de compactage à la teneur en naturelle, ne pourra pas se faire couche par couche, mais tout à fait la fin de la construction du remblai. Ceci parce qu'on doit compter ce que le compactage les couches sus-jacentes.

Un tel contrôle pourra se faire par l'une des méthodes modernes présentées dans le chapitre V.

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

## Références Bibliographiques

APWA, 1999. A soil compaction control technology assessment and demonstration, International Public Works Congress.

A.N.R.H, 1986. Ressources en eau et en sols de l'Algérie, rapport.

BEL F, CUCHE D, 1970. Etude des nappes du complexe terminal du bas Sahara. Données géologiques et hydrogéologiques pour la construction du modèle mathématique, D.H.W, Ouargla.

C.D.T.N. 1992. Etude hydrochimique et isotopique des eaux souterraines de la cuvette de Ouargla, rapport.

Chaigne P, Blivet J.C. 1971. Compactage par vibration à teneur en eau nulle. Bulletin de liaison des LPC, 8/9 N°54 P 45-48.

Clifford, J.M. 1976. Impact rolling and construction techniques. Australian Road Research Board Proceedings, Vol. 8 Session 13.

Distribution & Pipeline Technology Division Gas Technology Institute, 2005. evaluation of Soil Compaction.

Ellis, C.I, 1980. Soil compaction at low moisture content field trials in Sudan. 7th Conference for Africa on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Accra, Ghana.

Coyle et West, 1956. Laboratory compaction of a silty clay to simulate field density curves. Department of civil and sanitary engineering.

Fookes, P.G, 1976. Road geotechnics in hot deserts, Jnl Inst Highway Engs, The journal of the institution of Highway engineers.

Ferber, 2005. Sensibilité des sols fins compactés à l'humidification apport d'un model de microstructure, Thèse de doctorat, LCPC.

Forsblad, L. 1974. Vibratory compaction of soil, rock fill and asphaltic concrete. Australian Road Research Board Proceedings Vol. 7, Part 6.

Grace, H., Cocksedge, J.E. 1978. Récente investigations into the dry compaction of sand. IRF regional Conference for Middle East and North Africa, 9-15 april Cairo, Egypt.

International Road Federation, 1978. UNDP Highway Program serve's Africa Sahel Region. World Highways vol. XXIX, n°9 Int. Road Federation.

ISTED, 1987. Compactage à faible teneur en eau des sols et matériaux de terrassement et chaussées.

Kabbaj, M. 1979. National report - Morocco - Question V Low cost and low traffic roads. PIARC XVIth World Road Congress. Vienna.

Laid, F. 2009. Compactage du tuf et du TVO à faible teneur en eau, mémoire de fin d'études, ENSTP, Alger.

LCPC, 1992. Etude de comportement des corps de remblais, bulletin de liaison 179 Réf .3587.

LCTP, 2010. Moyens remarquables, MLCTP.

Lee P.Y. Suedkamp, R.J. 1972. Characteristics of irregularly shaped compaction curves of soils. Highway Research Record n°381. Washington, Highway Research Board.

Lewis, W.A. 1954. Further studies in the compaction of soil and the performance of compaction plant. Road Research Technical Paper No. 33. Department of Scientific and Industrial Research, Road Reseaj~ch Laboratory, London .HMSO.

Lewis, W.A, Parsons, A.W, 1961. The performance of compaction plant in the compaction of two types of granular base material. Road Research Technical Paper No. 53. Department of Sceintific and Industrial Research, Road Reserach Laboratory, London HMSO.

Morris, P.E. 1975. Compaction A Review, ARR Report n° 35, Australian Road Research Board.

Morel.G, Arquie. G, 1988. Le compactage, Eyrolles.

Mtango, H. 1979. An investigation into the dry compaction of lateritic sandy gravel. Norwegian Road Research Laboratory (Vegdirektoratet Veglaboratoriet) Internal Report No. 859 Oslo.

MTP, 1972. Planche d'essais de compactage à sec à Tamanrasset. Algérie.

P. Paige-green, 2009. The use of natural resources for sustainable roads. General science, engineering & technology.

Ramdane, 2007. Analyse de gonflement d'un sol en fonction de la disponibilité de l'eau d'hydratation : influence du mode d'hydratation sur le gonflement, ENTP.

TABOUCHE. N, ACHOUR.S , 2004. Etude de la qualité des eaux souterraines de la région orientale du Sahara septentrional algérien, Université de Biskra, Laboratoire de Recherche en Hydraulique Souterraine et de Surface

Tliba, 1994. Séminaire de la technique routière sahariennes 1994, bni abès, Ministère. de l'Equipement

Todres, H.A. 1970. The use of additives to reduce the quantity of water required for the compaction of soil. Internal Report RC/4/70. National Institute for Road Research. South Africa.

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